

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SALAH BOUBNIDER, CONSTANTINE 03
FACULTE DE GENIE DES PROCEDES
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES DE L'ENVIRONNEMENT

d'ordre :

Série :

Mémoire

PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
EN GENIE DES PROCEDES
OPTION : GENIE DES PROCEDES DE L'ENVIRONNEMENT

VALORISATION DES BOUES DE LA STATION D'ÉPURATION D'IBN ZIAD CONSTANTINE PAR DIMENSIONNEMENT D'UN DIGESTEUR ANAÉROBIE

Présenté Par :

- ❖ *BOUANIKA Nour el Imene*
- ❖ **DJEDIA Arfa**

Dirigé Par :

Dr. ACHOURI Ouafa

Grade : Maître de Conférences

Année universitaire

2019-2020

Session : septembre

Remerciement

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon dieu, celui qui nous a donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail sans oublier le grand merci à nôtres parents.

*Nos gratitudes s'adressent à **Dr. Achouri Ouafa** pour son encadrement, son orientation ses conseils avec tant de compétence et soutien et disponibilité qu'elle nous accordé pour faire avancer le bon travail.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui font l'honneur de présider et d'examiner ce Modest travail.

Enfin nos remerciements avant à toutes les personnes qui ont de près ou loin apporté aide et encouragement.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

- À l'homme, mon précieux du Dieu qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon Cher Père, "**Abderrazak**".
- À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère : "**Nabila**".
- À mes chers frères : "**Nawfel**" et "**Mouad**" que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.
- À mes grands-pères (que dieu ait pitié d'eux), mes grands-mères, mes tantes, mes cousins, que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.
- À mes chères amies : "**Rania**" et "**Dadou**", source de vie, de joie, de motivation et d'amour.
- Sans oublier mon binôme "**Arfa**" pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

"Imene"



Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chères :

*À mon chère **PAPI**, pour ces conseils très constructifs pour ses sacrifices et ses aides précieuses durant tout ma période d'études, mon soutien moral et source de joie, lui qui a toujours poussé et motivé.*

*À ma chère **MAMAN**, enseigné d'amour, qui veut toujours me voir réussir et aller très loin, pour tous ses sacrifices pour mon instruction et mon bien-être, pour son soutien permanent, ses aides, ses conseils, sa patience énorme, et ses prières tout au long de mes études*

*À mes chers frères **NADJIB** et **ASSIL**, pour ses appuis et ses encouragements et amour
Que Dieu les protèges.*

*Une pensée à ma **grande mère** ALLAH yarhamha, et a **mon grand-père** et **grande mère** je dédié ce travail, grâce à leurs prières qui me suivit durent tout mon parcours*

*À ma chère binôme : **NOUR EL IMAN** pour sa patience et sa compréhension. À ma chère amie **HANEN**, qui m'a énormément aidé et encouragé dans tout au long de mon parcours universitaire.*

*À mes chères amies **YOUSRA** et **RANIA** et **SELMA** en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.*

À tous ma famille et mes amies et à tous ceux qui me sont chers et proches

"ARFA"

Sommaire

Remerciement	I
Dédicaces	II
Liste des Figures	III
Liste des Tableaux	IV
Abréviations et Symboles	V
Introduction Générale	1
Chapitre I: Généralité sur les eaux usées et les boues	3
I. Introduction.....	3
II. Historique	3
III. Généralités sur les eaux usées et origines.....	4
III.1 Les eaux usées urbaines	5
III.2 Les eaux usées industrielles	5
III.3 Composition des eaux usées.....	6
III.3.1 Caractéristiques physiques... ..	7
III.3.1.1 La température.....	7
III.3.1.2 Les matières en suspension (MES) et les matières volatiles en suspension (MVS)..	7
III.3.1.3 La turbidité	7
III.3.1.4 La conductivité électrique	7
III.3.1.5 Potentiel d'Hydrogène (PH).....	7
III.3.2 Caractéristiques chimiques... ..	8
III.3.2.1 Demande chimique en oxygène (DCO)	8
III.3.2.2 Demande biochimique en oxygène (DBO5)	8
III.3.2.3 Les micropolluants organiques et non organiques	8
III.3.2.4 Eléments traces	9
III.3.2.5 Les substances nutritives	9
III.3.3 Caractéristiques microbiologiques... ..	10

Sommaire

IV. Généralité sur les boues.....	11
IV.1 Classification des boues	11
IV.1.1 Classe organique-hydrophile.....	11
IV.1.2 Classe minérale-hydrophile.....	12
IV.1.3 Classe huileuse	12
IV.1.4 Classe minérale-hydrophobe	12
IV.1.5 Classe-minérale-hydrophile-hydrophobe	12
IV.1.6 Classe fibreuse	12
IV.2 Traitement des boues d'épuration	12
IV.2.1 L'épaississement et déshydratation des boues	13
IV.2.2 La stabilisation	14
IV.2.3 L'hygiénisation	15
V. Composition de la matière organique des boues d'épuration.....	15
VI. Les destinations finales	16
VI.1 Les trois principales destinations	16
VI.1.1 Le recyclage	16
VI.1.2 Valorisation énergétique	16
VI.1.3 La mise en décharge.....	17
VI.2 Les contraintes de traitements liés à la destination finale	17
VI.2.1 Pour le recyclage	17
VI.2.2 L'élimination des boues	17
VI.2.3 Mise en décharge.....	17
Chapitre II : Le procédés de la digestion anaérobie	18
I. Introduction.....	18
II. Historique	18
III. Aspects Générales de la Digestion Anaérobie.....	19
III.1 Définition.....	19
III.2 Principes de la digestion anaérobie	20

Sommaire

III.2.1 L'Hydrolyse.....	20
III.2.2 L'acidogenèse.....	20
III.2.3 L'acétogenèse.....	21
III.2.4 La méthanogenèse.....	21
III.3 Les paramètres influencent le procédé de la digestion anaérobie.....	22
III.3.1 Température.....	22
III.3.2 PH.....	23
III.3.3 Le rapport C/N.....	23
III.3.4 Les inhibiteurs.....	23
III.3.5 Temps de rétention hydraulique (TRH).....	24
III.3.6 Acides gras volatils.....	24
III.3.7 La Charge organique.....	24
III.4 Potentiel méthanogène des substrats.....	25
IV. Différents types de réacteurs de digestion anaérobie.....	26
IV.1 Modes d'alimentation et arrangement des réacteurs anaérobies.....	26
IV.1.1 Mode discontinu ou batch.....	26
IV.1.2 Mode continu.....	27
IV.1.3 Mode semi-continu.....	27
IV.2 Technologies des réacteurs continus.....	28
IV.2.1 Réacteurs parfaitement mélangés.....	28
IV.2.2 Réacteurs à écoulement piston.....	29
IV.2.3 Réacteurs à bio film ou granules.....	29
IV.2.4 Réacteurs à lit fixe.....	29
IV.2.5 Réacteurs à lit mobile.....	30
IV.2.6 Réacteur UASB.....	32
IV.2.7 Réacteurs en une étape ou deux étapes.....	32
V. Paramètres opérationnels des digesteurs.....	33
V.1 Charge organique appliquée.....	33

Sommaire

V.2 Temps de séjour hydraulique.....	33
V.3 Volume utile	34
V.4 Température.....	34
V.5 Démarrage des digesteurs anaérobies.....	34
V.6 Inoculation.....	34
V.7 Montée en charge	35
VI.Bilan énergétique de la digestion anaérobie.....	35
VI.1 Production d'énergie par la digestion anaérobie	35
VI.1.1 Production en fonction de la quantité de MS introduites	35
VI.2 Rendements et valorisation énergétique et finale de la digestion anaérobie.....	36
VI.2.1 La valorisation thermique	36
VI.2.2 La valorisation électrique	37
VI.2.3 La création d'un biocarburant	37
VI.2.4 L'injection de biogaz dans le réseau de distribution	37
VI.2.5 La valorisation du digestat	38
VI.3 Consommation d'énergie	38
VI.3.1 Chaleur	38
VI.3.2 Electricité	39
VI. 3.3 Globalement	39
Chapitre III : Présentation de la station d'épuration d'Ibn Ziad Constantine.....	40
I. Introduction.....	40
II. Présentation de la station d'épuration	40
II.1 Localisation de la station d'épuration IBN ZIAD	40
II.2 Données générales sur la station d'épuration	41
II.3 Les équipements dans la station d'épuration	41
II.3.1 Filière de prétraitement	41
II.3.2 Filière de traitement biologique	42
II.3.3 Filière de traitement des boues	42

Sommaire

II.3.4 Bâtiment d'exploitation.....	42
II.4 Capacité du traitement des eaux usées.....	42
II.5 Qualité des eaux usées brutes	42
II.6 La qualité de l'effluent traité	42
III. Les Etapes du traitement de la station d'épuration Ibn Ziad	44
III.1 Prétraitement	44
III.1.1 Criblage grossier.....	44
III.1.2 Deux canaux de dessableurs.....	45
III.2 Traitement primaire	45
III.3 Traitement Biologique.....	46
III.3.1 La boue activée.....	46
III.3.2 Clarification et décantation.....	46
III.3.3 Les Boues de retour	47
III.4 L'étape de Désinfection.....	48
III.5 Traitement des boues en excès	48
Chapitre IV : Dimensionnement d'une installation de traitement anaérobie	49
I. Introduction.....	49
II. Dimensionnement du procédé de la digestion anaérobie.....	49
II.1 Caractéristiques des boues de la STEP d'Ibn Ziad Constantine	50
II.2 Chaîne de traitement des boues par digestion anaérobie	50
II.2.1 Dimensionnement de l'épaississeur.....	50
II.2.2 Dimensionnement du digesteur anaérobie.....	53
III. Température et bilan thermique.....	58
IV. L'épuration du biogaz	60
V. Fonctionnement et contrôle des digesteurs de boues anaérobies	61
VI. Résumé des résultats	61
Conclusion Général	64

Sommaire

Références Bibliographiques...	65
---------------------------------------	-----------

Liste des Figures

Figure I.1: Etape d'épaississement des boues par flottation..... 13

Figure II.1: Devenir du carbone et de l'énergie dans le traitement des eaux usées aérobie et anaérobie20

Figure II.2: Principales étapes de la digestion anaérobie.....22

Figure II.3: Histogramme du potentiel méthanogène des matières organiques... 26

Figure II.4: Différents types de Bioréacteurs.....27

Figure II.5: Exemples du digesteur parfaitement mélangé 28

Figure II.6: Digesteur à pales avec un axe longitudinal.....29

Figure II.7: Digesteur à lit fixe : a) à flux descendant, b) à flux ascendant 30

Figure II.8: Digesteur à lit fluidisé (a) à flux ascendant, (b) à flux descendant, (c) à lit turbulent inverse31

Figure II.9: Digesteur à lit de boues à flux ascendant (UASB)... 32

Figure II.10: Valorisation possible des produits de la digestion anaérobie 36

Figure III.1: Vue géographique de la station d'Ibn Ziad... 40

Figure III.2: Conduite principale des eaux usées qui alimentent la station d'épuration d'IBN ZIAD...43

Figure III.3: Canaux d'entrées de l'eau usée au criblage grossier, avec des ouvertures manuelles..... 44

Figure III.4: Criblage grossier...45

Figure III.5: Séparation du sable et de la graisse..... 45

Figure III.6: Bassins d'aération... 46

Figure III.7: Bassins d'anoxie.....46

Figure III.8: Clarificateur.....47

Figure III.9: Pompes à vis de retour de boue..... 47

Figure III.10: Les lits de séchage des boues... 48

Liste des Figures

Figure IV.1: La digestion anaérobie dans la chaine de traitement des eaux usées	49
Figure IV.2: Schéma d'un bioréacteur CSTR.....	54
Figure IV.3: Digestion avec stockage intégré du biogaz	57
Figure IV.4: Schéma du traitement des boues de STEP par digestion anaérobie.....	63

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Types d'eaux usées... ..	04
Tableau I.2: Composants majeurs typique d'eau usée domestique	06
Tableau III.1: Indicateurs de performance à la STEP (juin 2016)	41
Tableau III.2: Les caractéristiques physiques du prétraitement... ..	41
Tableau III.3: Capacité nominale de traitement et qualité moyenne requise des eaux usées avant traitement... ..	43
Tableau IV.1: Production des boues	50
Tableau IV.2: Taux de chargement des solides pour la conception d'épaisseurs gravitaires	51
Tableau IV.3: Paramètres de conception typique pour les digesteurs des boues anaérobies... ..	53
Tableau IV.4: Composition typique du biogaz généré dans les digesteurs anaérobie	57
Tableau IV.5: Paramètres de conception des digesteurs de boues anaérobies.....	62

Liste des Abréviations

AGV: Acides gras volatiles.

AGLC: Acides gras à longue chaîne.

AVT: Acidité Volatile Total.

BSR: Bactéries sulfato-réductrices.

CET: Centre d'enfouissement technique.

CH₄: Méthane.

CO₂: Dioxyde de carbone.

COOH: Acide carboxylique.

CSD: Centre de stockage de déchets.

CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor.

C/N: Rapport carbone sur azote.

C_p: Chaleur spécifique de l'eau.

D: Diamètre.

DA: Digestion anaérobie.

DBO₅: Demande biologique d'oxygène à 5 jours.

DCO: Demande chimique en oxygène.

ERI: Etude de réalisation industrielle.

FS: Solides fixes.

H: Profondeur des eaux latérales.

HRT: Temps de rétention hydraulique.

HRL: La charge hydraulique (hydraulic loading rate).

MES: Les matières en suspension.

Mr: Débit de boues brutes introduites dans le digesteur.

MVS: Les matières volatiles sèches.

MO: Matière organique.

Liste des Abréviations

MS: Matière sèche.

MV: Matière Volatiles.

OVH: Oxydation par voie humide.

PCI: Pouvoir calorifique inférieur.

PH: Le potentiel d'Hydrogène.

Q: Demande énergétique quotidienne du digesteur de boue.

Q: Débit des boues.

S: Surface du digesteur.

SS: Solid sludge.

SBR: Sequencing Batch Reactor.

STEP: Station de traitement et d'épuration.

T= θ_c : Temps de rétention hydraulique.

TAC: Alcalinité total.

TC: Les coliformes totaux.

TS: Solides totaux (Total solids)

TVS: Solides volatils totaux (Total volatile solids).

TRH: Temps de rétention hydraulique.

TS_{cons}: Concentration de TS.

TSH: Temps de séjour hydraulique.

U: Coefficient de transfert de chaleur.

UASB: Up flow Anaerobic Sludge Blanket.

V: Volume.

ΔT_1 : Différence entre la température des boues brutes et la température du digesteur(°C).

ΔT_2 : Différence entre la température intérieure du digesteur et la température extérieure (°C).

Introduction Générale

Introduction Générale

La population mondiale et la demande énergétique augmentent à un niveau plus élevé durant les dernières décennies, ce qui entraîne une forte augmentation de l'utilisation des combustibles fossiles. L'épuisement continu des combustibles fossiles et son prix croissant entraînent une augmentation de l'écart des besoins énergétiques des pays industrialisés.

Après la combustion de combustibles fossiles, il y a une augmentation des émissions de gaz à effet de serre et des polluants, et entraîne des effets néfastes sur l'environnement et l'écologie, qui a stimulé l'accroissement d'intérêt pour le développement des sources d'énergie durables et renouvelables afin de réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Il existe donc un besoin intense de produire des énergies renouvelables alternatives aux combustibles fossiles conventionnels, qui devraient être sûrs, efficaces, peu coûteuses, durables, de nature écologique et une demande énergétique croissante.

Les biocarburants pourraient être considérés comme une source d'énergie durable, écologique et alternative pour les combustibles fossiles afin de maintenir l'atmosphère propre, réaliser des économies de devises et d'éviter la pollution de. Parmi les procédés développés pour la production de ces biocarburants y a la *Digestion Anaérobie* ou *Méthanisation*, qui est un procédé biologique de traitement des déchets organiques tels que les déchets de cuisine, les déchets des industries alimentaires, et l'un des déchets les plus volumineux et d'une production progressive : les boues des stations d'épuration.

Au cours de cette dernière décennie, le traitement et l'élimination des boues sont devenus un enjeu majeur dans nos sociétés modernes. En réponse à une législation de plus, en plus restrictive, le volume de boues issues des procédés de traitement des eaux usées a considérablement augmenté. La production de méthane par digestion anaérobie profiterait à la société en fournissant un grand pouvoir énergétique grâce à la valorisation du méthane, permettant la production de chaleur et d'électricité.

L'objectif du travail présenté est le dimensionnement d'un digesteur anaérobie pour la station d'épuration des eaux usées d'Ibn Ziad CONSTANTINE, comme un traitement alternatif des boues produites par cette station.

Le travail présenté se compose de 4 chapitres précédé par une introduction générale et finaliser par une conclusion générale. Les chapitres de ce mémoire sont comme suit :

-Chapitre I : Généralités sur les eaux usées et les boues : les objectifs sont de fournir un aperçu général sur les eaux usées et les boues, origines, composition, etc., afin de bien déterminer la source du substrat utilisé dans le procédé anaérobique.

-Chapitre II : Le procédé de la digestion anaérobie : Dans ce chapitre, des généralités sur le procédé biologique seront présentées en détail ; qui est l'une des méthodes de valorisation des boues.

-Chapitre III : Présentation de la station d'épuration d'Ibn Ziad Constantine

-Chapitre IV : Dimensionnement d'une installation de traitement anaérobie: Des calculs étaient faits pour le dimensionnement d'un système de traitement anaérobie des boues, et donner une idée sur l'énergie qui peut être produite par ces déchets.

Enfin, ce manuscrit est clôturé par une conclusion générale où nous présentant les résultats obtenus avec les perspectives que nous jugeons utiles pour un meilleur aboutissement de ce travail.

Chapitre I
Généralités sur les eaux
usées et les boues

Chapitre I

Généralités sur les eaux usées et les boues

I. Introduction

En raison de l'industrialisation poussée et l'augmentation de la densité de population et des sociétés urbanisées, le monde est confronté à des problèmes liés à la gestion des eaux usées. Au quotidien, les effluents générés par les activités domestiques et industrielles constituent la principale cause de pollution des masses d'eau réceptrices, ce qui pèse lourdement sur la gestion de la qualité de l'eau. Certains de ces polluants sont des micro-organismes pathogènes, du phosphore et de l'azote, des hydrocarbures, des métaux lourds, et de la matière organique.

Ce premier chapitre est à des fins d'orientation. Ses objectifs sont de fournir un aperçu général sur les eaux usées et les boues, origines, composition, etc., afin de bien déterminer la source du substrat utilisé dans le procédé anaérobique.

II. Historique

Le traitement des eaux usées est une pratique relativement nouvelle, bien que des systèmes de drainage aient été construits bien avant le XIX^e siècle. Avant cette époque, du «sol de nuit » était placé dans des seaux le long des rues et les travailleurs les vidaient dans des réservoirs de « wagons de miel ». Cela a été envoyé dans les zones rurales et disposés sur des terres agricoles. Au XIX^e siècle, les toilettes à chasse d'eau ont entraîné une augmentation du volume de déchets pour ces terres agricoles. En raison de ce défi de transport, les villes ont commencé à utiliser des égouts et des égouts pluviaux pour acheminer les eaux usées dans les plans d'eau contre la recommandation d'Edwin Chadwick en 1842 que «la pluie dans la rivière et les eaux usées dans le sol ». Le rejet de déchets dans les cours d'eau a entraîné une pollution grave et des problèmes de santé pour les utilisateurs en aval[1].

En 1842, un ingénieur anglais du nom de Lindley a construit le premier système d'égout «moderne» pour le transport des eaux usées à Hambourg, en Allemagne. L'amélioration du système Lindley repose essentiellement sur des matériaux améliorés et l'inclusion de regards et d'accessoires d'égout - les principes Lindley sont toujours respectés aujourd'hui. Le traitement des eaux usées n'est devenu apparent qu'après que la capacité d'assimilation des plans d'eau a été dépassée et que les problèmes de santé sont devenu intolérables. Entre la fin

des années 1800 et le début des années 1900, diverses options ont été essayées jusqu'en 1920, les processus que nous avons aujourd'hui ont été essayés. Sa conception était cependant empirique jusqu'au milieu du siècle[1]. Des systèmes centralisés de traitement des eaux usées ont été conçus et encouragés. Le coût du traitement des eaux usées est supporté par les communautés rejetant dans l'usine.

Aujourd'hui, de grandes avancées ont été réalisées pour fabriquer de l'eau potable à partir des eaux usées. Ces derniers temps, quelle que soit la capacité du cours d'eau récepteur, un niveau de traitement minimum est requis avant l'octroi de permis de rejet[1].

III. Généralités sur les eaux usées et origines

L'eau usée est une eau dont les caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques sont dégradées suite à son utilisation dans différents domaines (domestique, agricole, industriel, etc.). Pour cette raison, ces eaux usées devront être traitées avant d'être restituée au milieu naturel et éviter ainsi de causer d'autre pollution notamment des sols[2].

Les principaux objectifs du traitement des eaux usées sont :

- ✓ Réduction des substances organiques biodégradables ;
- ✓ Réduction de la concentration en nutriments dans l'environnement ;
- ✓ Élimination des agents pathogènes ;
- ✓ Recyclage et réutilisation de l'eau.

Les eaux usées proviennent de plusieurs sources. Les composants des eaux usées peuvent être divisés en catégories principales selon le tableau I.1. La contribution des constituants peut varier considérablement.

Tableau I.1: Types d'eaux usées[3]

Eaux usées de la société	Eaux usées générées en interne dans les stations d'épuration
Eaux usées domestiques	Surnageant de l'épaississement
Eaux usées des institutions	Surnageant de digesteur
Eaux usées industrielles	Rejeter l'eau de la déshydratation des boues
Infiltration dans les égouts	Drainage de l'eau des lits de séchage des boues
Eaux pluviales	L'eau des filtres de lavage
Lixiviats septique	Eau de nettoyage de l'équipement

On définit les eaux usées comme étant des eaux ayant été utilisées pour des usages domestiques, industriels ou même agricole, constituant donc un effluent pollué et qui sont rejetées dans un émissaire d'égout. Les eaux usées regroupent les eaux usées domestiques (les eaux vannes et les eaux ménagères), les eaux de ruissellement et les effluents industriels (eaux usées des usines)[4].

III.1 Les eaux usées urbaines

Les eaux usées urbaines comprennent les eaux usées domestiques et les eaux de ruissellement (eaux pluviales, eaux d'arrosage des voies publiques, eaux de lavage des caniveaux, des marchés et des cours) Les eaux qui ruissellent sur les toitures, les cours, les jardins, les espaces verts, les voies publiques et les marchés entraînent toutes sorte de déchets minéraux et organiques : de la terre, des limons, des boues, des silts, des sables, des déchets végétaux (herbes, pailles, feuilles, graines, etc...). et toute sortes de micropolluants hydrocarbures, pesticides venant des jardins, détergents utilisés pour le lavage des cours, des voies publiques, des automobiles, débris microscopique de caoutchouc venant de l'usure des pneumatiques des véhicules. Plomb venant du plomb tétra éthyle contenu dans l'essence, retombées diverses de l'atmosphère, provenant notamment des cheminées domestiques et des cheminées d'usines [5].

III.2 Les eaux usées industrielles

Tous les rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc...[5].

La variété des eaux usées industrielles est très grande. Certains de ces eaux sont toxiques pour la flore et la faune aquatiques, ou pour l'homme. Il faut bien distinguer les eaux résiduaires et les liquides résiduaires de certaines industries. Les eaux résiduaires sont celles qui ont été utilisées dans des circuits de réfrigération, qui ont servi à nettoyer ou laver des appareils, des machines, des installations, des matières premières ou des produits d'une usine, ou qui ont servi à retenir des poussières de fumées ; elles peuvent contenir des substances chimiques utilisées au cours des fabrications[6].

Les liquides résiduaux sont des liquides résultant des fabrications ; c'est le cas des solutions de produits chimiques, des solutions de sous-produits, c'est le cas des liquides acides provenant de la vidange des cuves de décapage des métaux [6].

Les rejets industriels peuvent donc suivre trois voies d'assainissement soit :

- ✓ Directement rejetés dans le réseau domestique ;
- ✓ Prétraités puis rejetés dans le réseau domestique ;
- ✓ Entièrement traités sur place et rejetés dans le milieu naturel[6].

III.3 Composition des eaux usées

La composition des eaux usées (Tableau I.2), est extrêmement variable en fonction de leur origine (industrielle, domestique, etc.).

Tableau I.2: Composants majeurs typique d'eau usée domestique[7]

Constituants	Concentration (mg/l)		
	Fort	Moyen	Faible
Solide totaux	1200	700	350
Solides dissous (TDS)	850	500	250
Solides suspendus	350	200	100
Azote (en N)	85	40	20
Phosphore (en P)	20	10	6
Chlore	100	50	30
Alcalinité (enCaCO ₃)	200	100	50
Graisses	150	100	50
DBO ₅	300	200	100

La composition des eaux usées dépend de:

- L'activité humaine (eaux ménagères et eaux vannes),
- La composition des eaux d'alimentation en eau potable et, accessoirement, de la nature des matériaux entrant dans la constitution des canalisations d'eau, pour les composés chimiques,
- La nature et de la quantité des effluents industriels éventuellement rejetés dans le réseau urbain[8].

Elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux micro-organismes. En fonction de leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et du danger sanitaire qu'elles représentent, ces substances peuvent être classées

en quatre groupes : les micro-organismes, les matières en suspension, les éléments traces minéraux ou organiques, et les substances nutritives[8].

III.3.1 Caractéristiques physiques

III.3.1.1 La température

La température est un facteur écologique important du milieu. Elle permet de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment)[9].

III.3.1.2 Les matières en suspension (MES) et les matières volatiles en suspension (MVS)

Les matières en suspension sont en majeure partie de nature biodégradable. La plus grande part des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées est transportée par les MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt pour l'irrigation des cultures[9].

Les matières volatiles en suspension (MVS) représentent la masse de partie organique (donc biodégradable) des matières en suspension. Elles sont obtenues par différence entre les MES et leurs résidus secs après passage au four à 550°C; expression des résultats en mg/L ou en pourcent de MES. Les MVS sont utilisées pour déterminer la part de matière organique présente dans les MES permet tant d'estimer la stabilité des boues, c'est-à-dire leur capacités à ne pas fermenter[9].

III.3.1.3 La turbidité

La turbidité des effluents résiduaires et des eaux polluées est en général très élevée. Cette mesure est effectuée au moyen d'un spectrophotomètre à 720 nm, car à cette longueur d'onde l'influence de la couleur est négligeable. Pour éviter l'interférence due à la présence de grosses particules décantables, il convient de les éliminer au préalable par décantation [9].

III.3.1.4 La conductivité électrique

La conductivité électrique, en tant que paramètre brut, mesure la concentration en ions d'une solution. Plus il y a de sels, d'acides ou de bases dissociés dans une solution, plus sa conductivité sera élevée. La conductivité exprime ainsi la charge en sels de l'eau usée [9].

III.3.1.5 Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le potentiel d'Hydrogène « pH » mesure la concentration en ions H⁺ de l'eau. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. Il joue un rôle important dans :

- Les propriétés physique-chimiques (l'acidité et l'alcalinité);
- L'efficacité de certains procédés (coagulation-floculation);
- Les processus biologiques[9].

III.3.2 Caractéristiques chimiques

III.3.2.1 Demande chimique en oxygène (DCO)

Elle s'exprime en milligramme par litre (mg/l) d'oxygène et correspond effectivement à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder dans des conditions opératoires définies, les matières organiques présentes dans un échantillon donné [10]. La valeur du rapport DCO/DBO indique le coefficient de la biodégradable d'un effluent, il permet aussi de définir son origine. Généralement la valeur de la DCO est :

- DCO = 1.5 à 2 fois DBO pour les eaux usées urbaines.
- DCO = 1 à 10 fois DBO pour tout l'ensemble des eaux résiduaires.
- DCO > 2.5 fois DBO pour les eaux usées industrielles.

La relation empirique de la de la matière organique (MO) en fonction de DBO₅ et DCO est donnée par l'équation suivante[10] :

$$MO = \frac{2DBO_5 + DCO}{3} \quad (1)$$

III.3.2.2 Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La DBO₅ exprime la quantité d'oxygène consommée par les bactéries à 20°C et à l'obscurité pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablementensemencé, temps qui assure l'oxydation par voie aérobie. Pour la mesure, on prend comme référence la quantité d'oxygène consommée au bout de 5 jours c'est la DBO₅[10].

III.3.2.3 Les micropolluants organiques et non organiques

Les micropolluants sont des éléments présents en quantité infinitésimale dans les eaux usées. La voie de contamination principale, dans le cas d'une réutilisation des eaux usées épurées, est l'ingestion. C'est la contamination par voie indirecte qui est généralement préoccupante. Ainsi, certains micropolluants, comme les métaux lourds ou les pesticides, peuvent s'accumuler dans les tissus des êtres vivants, et notamment dans les plantes cultivées. Il peut

donc y avoir une contamination de la chaîne alimentaire et une concentration de ces polluants dans les organismes[11].

III.3.2.4 Eléments traces

Les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux; les plus abondants (de l'ordre de quelques $\mu\text{g/l}$) sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc..) sont présents à l'état de traces. Leur origine est multiple : ils proviennent « des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels »[11].

Certains éléments traces, peu nombreux, sont reconnus nécessaires, en très faibles quantités, au développement des végétaux : le bore, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le molybdène. L'irrigation, à partir d'eaux usées, va apporter ces éléments[11].

III.3.2.5 Les substances nutritives

L'azote, le phosphore, le potassium, et les oligo-éléments, le zinc, le bore et les soufre, indispensables à la vie des végétaux, se trouvent en quantités appréciables, mais en proportions très variables par rapport aux besoins de la végétation, dans les eaux usées épurées ou non. D'une façon générale, une lame d'eau résiduaire de 100 mm peut apporter à l'hectare :

- De 16 à 62 kg d'azote ;
- De 2 à 69 kg de potassium ;
- De 4 à 24 kg de phosphore ;
- De 18 à 208 kg de calcium ;
- De 9 à 100 kg de magnésium ;
- De 27 à 182 kg de sodium[11].

a) L'azote : L'azote se trouve dans l'eau usée sous forme organique ou ammoniacale dissoute. Il est souvent oxydé pour éviter une consommation d'oxygène (O_2) dans la nature et un risque de toxicité par l'ammoniaque gazeux dissous (NH_3), en équilibre avec l'ion ammoniac (NH_4^+). La nitrification est une transformation chimique de l'azote organique par l'intermédiaire de bactéries et passe par les étapes :

- N organique à NH_4^+ : ammonification
- NH_4^+ à NO_2^- : nitritation par Nitrosomonas

- NO_2^- à NO_3^- : nitratisation par Nitrobacter [12].

b) Le phosphore : La concentration en phosphore dans les effluents secondaires varie de 6 à 15 mg/l (soit 15 à 35 mg/l en P_2O_5). Cette quantité est en général trop faible pour modifier le rendement. Mais s'il y a excès, il est pour l'essentiel retenu dans le sol par des réactions d'adsorption et de précipitation ; cette rétention est d'autant plus effective que le sol contient des oxydes de fer, d'aluminium ou du calcium en quantités importantes. On ne rencontre pas en général de problèmes liés à un excès de phosphore [12].

c) Le potassium : (K^+) Le potassium est présent dans les effluents secondaires à hauteur de 10 à 30 mg/l (12 à 36 mg/l de K_2O) et permet donc de répondre partiellement aux besoins. Il faut noter cependant que, s'il existe, un excès de fertilisation potassique conduit à une fixation éventuelle du potassium à un état très difficilement échangeable, à une augmentation des pertes par drainage en sols légers, à une consommation de luxe pour les récoltes [12].

d) Chlore et sodium : Leur origine est : Naturelle (mer : 27g/l NaCl, et terrains salés) ; humaine (10 à 15g/l NaCl dans les urines/j) ; industrielle (potasse, industrie pétrolière, galvanoplastie, agroalimentaire). Les chlorures et le sodium peuvent également poser problème, notamment en bord de mer, quand les réseaux d'égout drainent des eaux phréatiques saumâtres [12].

III.3.3 Caractéristique microbiologique

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes.

- Les coliformes totaux (TC) englobent les coliformes fécaux ainsi que les microorganismes communs du sol et constituent un indicateur général d'une éventuelle contamination de l'eau.
- Les coliformes fécaux (FC) sont un indicateur de la contamination de l'eau par des matières fécales. L'indicateur principal commun est la bactérie *Escherichia coli* ou *E. coli*.
- L'analyse des helminthes recherche des œufs de vers dans l'eau : Comme il y a d'autres paramètres caractérisant les eaux usées exemples : potentiel redox, la couleur, l'odeur, etc.. [13].

IV. Généralité sur les boues

Le traitement des eaux usées entraîne la production de boues d'épuration. Les boues d'épuration sont les matières résiduelles semi-solides qui sont produites comme sous-produit lors du traitement des eaux usées industrielles ou municipales [10].

Lorsque des eaux usées fraîches rentrent dans un décanteur primaire, environ 50% des matières solides en suspension se déposent rapidement. Cette collection de solides est connue sous le nom de boues brutes ou solides primaires et est dite «fraîche».

Le plus souvent, les boues fraîches sont extraites en continu du fond du décanteur en forme de trémie par des racleurs mécaniques et passées dans des réservoirs de digestion des boues séparés [10].

Le processus de traitement secondaire génère également des boues composées en grande partie de bactéries et de protozoaires avec des solides fins entraînés, qui sont éliminés par décantation dans des réservoirs de décantation secondaires. Les deux flux de boues sont généralement combinés et sont traités par un procédé de traitement anaérobie ou aérobie à haute température ou à température ambiante. Après une longue période de digestion, le résultat est appelé boue "digérée" et peut être éliminé par séchage puis mise en décharge [10].

IV.1 Classification des boues

Deux caractères majeurs sont à la base de la classification des boues :

a) Caractère organique ou minéral : le caractère organique entraînera généralement la nécessité d'une stabilisation des matières organiques ou permettra une dernière étape d'oxydation thermique ;

b) caractère hydrophile ou hydrophobe : la déshydratation de la boue liquide sera d'autant plus difficile que les matières en suspension seront très liées à l'eau, donc hydrophiles.

Cette composition dépend à la fois de la nature de la pollution initiale de l'eau et des procédés d'épuration auxquels cette eau a été soumise : traitements physiques, physico-chimiques, biologiques[14].

IV.1.1 Classe organique-hydrophile

C'est une des classes les plus étendues. Les difficultés de déshydratation de ces boues sont dues à la présence d'une fraction importante de colloïdes hydrophiles. Se rangent dans cette

catégorie toutes les boues résultant du traitement biologique d'eaux résiduaires, et dont la teneur en matières volatiles peut atteindre 90 % de la totalité des matières sèches (eaux résiduaires d'IAA, de chimie organique, par exemple)[14].

IV.1.2 Classe minérale-hydrophile

Ces boues contiennent des hydroxydes métalliques formés au cours des procédés physico-chimiques par précipitation d'ions métalliques présents dans l'eau à traiter (Al, Fe, Zn, Cr)[14].

IV.1.3 Classe huileuse

Elle est caractérisée par la présence dans les effluents de quantités même faibles d'huiles ou de graisses minérales (ou animales). Ces huiles sont en émulsion ou adsorbées sur les particules boueuses hydrophiles ou hydrophobes, en particulier sur les floccs biologiques (ex : traitement d'eaux résiduaires de raffinerie)[14].

IV.1.4 Classe minérale-hydrophobe

Ces boues sont caractérisées par un taux prépondérant de matières particulaires à faible teneur en eau liée (sables, limons, scories, battitures, sels cristallisés...), typique des traitements de débouillage d'eaux potables ou des boues de certains traitements primaires en ERI[14].

IV.1.5 Classe-minérale-hydrophile-hydrophobe

Ces boues comprennent principalement des matières hydrophobes mais aux quelles sont mélangées suffisamment de matières hydrophiles pour que l'influence défavorable de celles-ci en déshydratation devienne prépondérante. Ces matières hydrophiles sont souvent les hydroxydes métalliques résultant de la précipitation des coagulants minéraux (sels de Fe et Al)[14].

IV.1.6 Classe fibreuse

Ces boues sont généralement faciles à déshydrater sauf lorsque la récupération poussée de fibres fait évoluer cette classe vers le type hydrophile, par suite de la présence d'hydroxydes ou de boues biologiques[14].

IV.2 Traitement des boues d'épuration

La maîtrise et la valorisation des boues d'épuration sont devenues une priorité pour l'avenir, face à l'expansion des zones urbaines, à la multiplicité des sites de dépollution, et à la législation toujours plus contraignante. Les boues ainsi issues des différentes étapes de

traitement des eaux, ont vu leur volume considérablement augmenter ces dernières années[15].

Les filières de traitement des boues se sont ainsi développées et améliorées en parallèle des sites de dépollution des eaux. La destination finale des boues conditionne le choix de traitement. En fonction de leur devenir, les boues sont soumises à un cahier des charges précis régissant leur qualité. Ces filières ont pour objectifs principaux, de produire une boue de meilleure qualité en moindre quantité tout en générant des boues sans risques pour l'environnement.

Il existe différents types de boues selon l'étape de traitement des eaux duquel elles sont issues[15].

On rencontre ainsi des boues primaires, secondaires et des boues physico-chimiques. Trois étapes de traitement sont ici distinguées : la réduction de la teneur en eau via l'épaississement et la déshydratation, la stabilisation et l'hygiénisation.

IV.2.1 L'épaississement et déshydratation des boues

Cette première étape permet de réduire trois à six fois le volume des boues, réduisant ainsi les coûts de stockage, d'élimination et de transport. La teneur en eau est ainsi visée. Cet épaississement peut se faire soit par simple égouttage, par flottation comme présenté sur la Figure I.1, par centrifugation ou par voie gravitaire au moyen d'un concentrateur. Cette étape a pour effet d'augmenter la proportion en matières sèches dans les boues[15].



Figure I.1. Etape d'épaississement des boues par flottation. (Fiche technique assainissement, les différents types de boues d'épuration et leurs traitements, édités par l'ADEME)

La déshydratation est une étape de réduction de volume d'eau également, mais encore plus poussée que l'épaississement. Au moyen de centrifugeuses, filtres-presses ou des filtres à bandes, la siccité, c'est-à-dire la teneur en matières sèches des boues est augmentée. Selon les techniques utilisées, elle varie de 15 à 20%, au terme de cette étape.

IV.2.2 La stabilisation

Les boues d'épuration sont composées de matières organiques dégradables, de matières minérales et d'organismes pathogènes. Comme son nom l'indique, cette technique induit la stabilisation du caractère fermentescible des boues, en dégradant les matières organiques ou en bloquant les réactions. Elle jouit d'avantages majeurs tels que la valorisation énergétique du biogaz produit lorsque la stabilisation s'effectue par voie anaérobie. On distingue, en effet, différents procédés de stabilisation : par voie aérobie, anaérobie, et chimique.

La stabilisation par voie aérobie peut se faire dans des bassins d'aération. Le compostage est également un procédé de stabilisation par voie aérobie. Il reproduit en accéléré le processus de décomposition de la matière organique dans le sol. Brièvement, le procédé s'effectue en deux étapes majeures : la première durant laquelle la matière organique fraîche est dégradée à hautes températures (50 à 70 °C) sous l'action de bactéries. Cette élévation de température est essentiellement d'origine biologique due à l'activité microbienne ; la deuxième phase dite de maturation est une phase de dégradation moins soutenue. C'est après la phase de maturation que le compost peut être utilisé comme amendement pour les sols. Le fait de transformer les boues en compost permet de limiter les nuisances olfactives et de changer l'aspect des boues en de conventionnels terreaux[15].

La stabilisation par voie chimique est également employée et se réalise par chaulage ; Contrairement au compostage, le chaulage ne transforme pas la matière organique mais bloque toute évolution des boues par augmentation du pH. Les boues sont ainsi déshydratées et stabilisées (blocage de tous les micro-organismes provoquant l'arrêt des fermentations et l'émission de mauvaises odeurs). Par ailleurs, le chaulage ne modifie pas le caractère nutritif des boues pour le sol.

La digestion anaérobie est particulièrement intéressante pour les STEP de moyenne et grande capacité puisque la quantité de biogaz produite et valorisable ce procédé sera présenté en détails dans le chapitre suivant.

IV.2.3 L'hygiénisation

Les boues d'épuration contiennent des micro-organismes vivants en provenance des eaux usées et des processus de traitement. Cette étape de traitement des boues permet d'obtenir un résidu dépourvu d'agents pathogènes et encourage un épandage contrôlé et sans risques. Elle est indispensable dans certains contextes d'épandages agricoles, et reste une étape marginalisée dans certains pays. Le chaulage représente un mode d'hygiénisation puisque les organismes potentiellement pathogènes sont rendus inertes par l'augmentation de pH[16].

V. Composition de la matière organique des boues d'épuration

Les boues sont constituées de matières organiques complexes non dégradées, de matières inorganiques (minéraux, métaux lourds), de microorganismes (bactéries, agents pathogènes)[15].

La matière organique est principalement constituée de quatre grandes familles : les protéines, les lipides, et les carbohydrates, Les fibres.

Les protéines constituent une des principales classes de molécules présentes chez tous les organismes vivants. Elles sont essentielles à la cellule et sont formées par condensation d'acides aminés, longues chaînes portant un groupement acide COOH et un groupement NH₂. On les retrouve dans les cellules des bactéries, des résidus organiques et d'autres virus susceptibles d'être emprisonnés dans les boues[15].

Les lipides constituent la matière grasse des vivants, et regroupent toutes les molécules organiques extractibles aux solvants organiques apolaires tels que le chloroforme, l'éther, le méthanol..etc. Les acides gras sont des acides carboxyliques aliphatiques et se retrouvent essentiellement dans les bactéries, dans les graisses animales et végétales (graisses de cuisine) et dans la matière fécale humaine. C'est un constituant essentiel des parois membranaires chez les organismes vivants. La membrane est en effet, constituée d'une bicouche lipidique où chaque lipide ayants tête polaire hydrophile orientée vers l'extérieur de la membrane et sa queue hydrophobe tournée vers l'intérieur. Enfin, les lipides représentent une réserve d'énergie mobilisable[15].

Les stérols sont aussi une classe de lipides se retrouvant dans les boues d'épuration, puisqu'elles sont présentes dans toutes les cellules eucaryotes et également dans la matière fécale humaine. Chez les vertébrés, on retrouve les stérols en tant que constituant

membranaire et comme précurseur de molécules biologiques comme les acides biliaires, hormones stéroïde set vitamines.

Les carbohydrates regroupent les sucres et les fibres. Ce sont des composés organiques simples composés d'unités de base appelées monosaccharides comme le glucose, ou le fructose. Les monosaccharides peuvent se combiner entre eux pour donner des polysaccharides. Ils sont associés aux acides aminés ou aux lipides et sont contenus dans les parois et membranes des bactéries. Les carbohydrates jouent un rôle important chez les organismes vivants, notamment dans le stockage d'énergie. Ils contribuent également au port structural des végétaux, en particulier grâce aux fibres lino-cellulosiques[15].

Les fibres proviennent de la paroi cellulaire des végétaux. On en distingue deux sortes, les fibres solubles dans l'eau telles que la pectine, et des fibres insolubles dans l'eau regroupant la cellulose, l'hémicellulose et la lignine[15].

VI. Les destinations finales

VI.1 Les trois principales destinations

Il existe trois principales destinations pour les boues de station d'épuration:

VI.1.1 Le recyclage

Principalement en agriculture, avec ou sans complémentation, mais aussi en réhabilitation de terrains dégradés (carrières, remblais routiers, revégétalisation de décharges...), en sylviculture, en paysagisme urbain. Le recyclage permet de réintégrer, via le sol, les principaux éléments constitutifs de la boue (carbone, azote, phosphore) dans les grands cycles géochimiques, en utilisant leur pouvoir fertilisant [17].

VI.1.2 Valorisation énergétique

L'élimination ou destruction de la MO avec revalorisation énergétique par des procédés thermiques (incinération dédiée ou Co-incinération, pyrolyse/gazéification, oxydation par voie humide, voir traitement des boues déshydratées), on cherche à oxyder le plus complètement et le plus économiquement possible la matière organique constitutive de la boue pour ne récupérer qu'un résidu minéral ultime. Ce dernier pourra, selon les réglementations en vigueur, être valorisé en génie des matériaux ou être mis en décharge avec ou sans obligation d'inertage selon les résultats de tests de lixiviation[17].

VI.1.3 La mise en décharge

Aussi appelée « centre d'enfouissement technique » (CET) ou plus récemment, « centre de stockage de déchets » (CSD) [17].

VI.2 Les contraintes de traitements liés à la destination finale

VI.2.1 Pour le recyclage

L'épandage des boues déshydratées non stabilisées ne sera plus possible ; un traitement de stabilisation (digestion, chaulage, compostage, séchage poussé) est obligatoire ; le recyclage sera favorisé en cas d'évacuation de la station d'une boue structurée (éviter les filières produisant des boues pâteuses et collantes) ; enfin, il faut veiller à concevoir une filière de déshydratation et de traitement des boues qui permette une voie de secours, si l'épandage n'est plus possible (mise en décharge, incinération...)[17].

VI.2.2 L'élimination des boues

Les procédés d'élimination des boues par destruction thermique (incinération, OVH, pyrolyse) ont tendance à se développer du fait des contraintes réglementaires grandissantes, de l'acceptabilité sociale médiocre du recyclage et donc du manque de visibilité à moyen-long terme de la filière recyclage.

En ce qui concerne l'incinération dédiée, on cherchera à obtenir la meilleure siccité possible en déshydratation mécanique (en essayant de diminuer fortement le conditionnement minéral) afin de réduire ou de supprimer la consommation de combustible d'appoint et le débit de fumées à traiter. Le choix de cette filière doit guider également les choix concernant la filière eau afin d'obtenir, si possible, des boues riches en MV et à forte siccité (PCI élevé)[18].

VI.2.3 Mise en décharge

Les coûts de plus en plus élevés de mise en décharge des boues, rendent cette destination de moins en moins compétitive. La réduction maximale des tonnages par des traitements appropriés (séchage, OVH, incinération...) devient une nécessité. En Europe, la directive 1999/31/EC du 26 avril 1999 décrit les stratégies nationales à mettre en place visant à planifier jusqu'en 2015 une réduction progressive de la mise en décharge des déchets municipaux biodégradables comme les boues (déchets non ultimes)[18].

Chapitre II
Le procédé de la
digestion anaérobie

Chapitre II

Le procédé de la digestion Anaérobie

I. Introduction

La digestion anaérobie (DA) est largement considérée comme une technologie de préservation de l'environnement pour divers déchets organiques, y compris les boues d'épuration. Bien que l'utilisation de la digestion anaérobie comme méthode alternative de traitement des boues d'épuration puisse être observée dans de nombreux pays, son utilisation en Algérie reste très faible.

Dans ce chapitre, des généralités sur le procédé biologique seront présentés en détail, son principe, ses étapes biologiques, les paramètres contrôlant le bon déroulement du procédé, les paramètres de fonctionnement des digesteurs anaérobies, et d'autres points seront discutés pour bien présenter la digestion anaérobie.

II. Historique

Les premières recherches menant à l'identification du méthane, sont associées à Volta, en 1776. Il identifie le méthane comme étant un gaz à fort potentiel combustible et donc valorisable sous forme d'énergie. Des applications exploitant la digestion anaérobie, apparaissent par la suite en France, en 1881, avec le procédé Mourras, où une chambre hermétique permettait le traitement des eaux domestiques. Le même procédé sera appliqué en fosse septique, quatre années plus tard en Angleterre. Bombay, en Inde, verra, en 1897, l'installation du premier procédé de méthanisation collectant des excréments humains afin de fournir de l'électricité aux lampadaires de la ville[6].

En 1940, les premières installations de méthanisation se développent en Europe, elles s'implantent dans les fermes, afin de fournir de l'énergie à partir des déchets agricoles et des lisiers produits par l'élevage. Elles alimentent ainsi en électricité ces petites exploitations, tout en permettant de traiter une partie de la matière polluante générée. Toutefois, la montée de la pétrochimie et l'utilisation des énergies fossiles, freinent considérablement le développement de ce type de valorisation.

Dans les années 70, la première crise pétrolière, relance l'intérêt pour cette solution alternative aux énergies fossiles et de plus en plus de digesteurs anaérobies sont construits dans les fermes et les campagnes. La situation financière en Chine, au Népal et en Inde,

entraînant un impact moins fort du cours du pétrole sur les projets de DA, de nombreux programmes de recherche leurs sont dédiés.

La forte activité rurale et agricole présente dans ces pays, favorise alors ce mode de valorisation locale. En Europe, l'essor de la digestion anaérobie va être concentré sur le Danemark, la Suisse et l'Allemagne. Cette dernière va compter plus de 1500 unités de méthanisation installées en moins de 30 ans[6].

III. Aspects Générales de la Digestion Anaérobie

III.1 Définition

La digestion anaérobie (DA) représente la conversion microbiologique de la matière organique en méthane (CH_4) en l'absence d'oxygène. Le processus est également connu sous le nom de méthanisation et a été largement utilisé par la société moderne pour stabiliser les boues primaires et secondaires dans les stations d'épuration des eaux usées. La DA est couramment utilisée pour le traitement du fumier animal, des déchets organiques des zones urbaines et des industries alimentaires (Co-digestion), plus souvent associée à la récupération d'énergie et au recyclage du substrat digéré (digeste) comme engrais pour le secteur agricole.

La digestion anaérobie (DA) est un processus naturel au cours duquel les bactéries décomposent le carbone dans les matières organiques. Ce processus produit un mélange de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), un mélange appelé « *biogaz* ». Le processus se produit uniquement en l'absence d'oxygène, d'où le terme « *anaérobie* » (qui signifie littéralement « sans air »)[19].

Ce procédé est opposé au traitement aérobie largement utilisé dans tous les pays pour le traitement des eaux usées, la figure II.1 montre le devenir du carbone et de l'énergie dans le traitement des eaux usées aérobie et anaérobie. En supposant que l'oxydation de 1 Kg de DCO nécessite 1 KWh d'énergie d'aération[20].

Contrairement au traitement anaérobie, le traitement aérobie est généralement caractérisé par des coûts opérationnels élevés (énergie), tandis qu'une très grande partie des déchets est convertie en un autre type de déchets (boues), le traitement aérobie dans un procédé classique à boues activées produit environ 50% (ou plus) de nouvelles boues à partir de la DCO convertie, qui nécessite un traitement supplémentaire, tandis que pour le traitement anaérobie une énergie renouvelable est générée par le traitement, et un taux de production de boue trop faible[20].

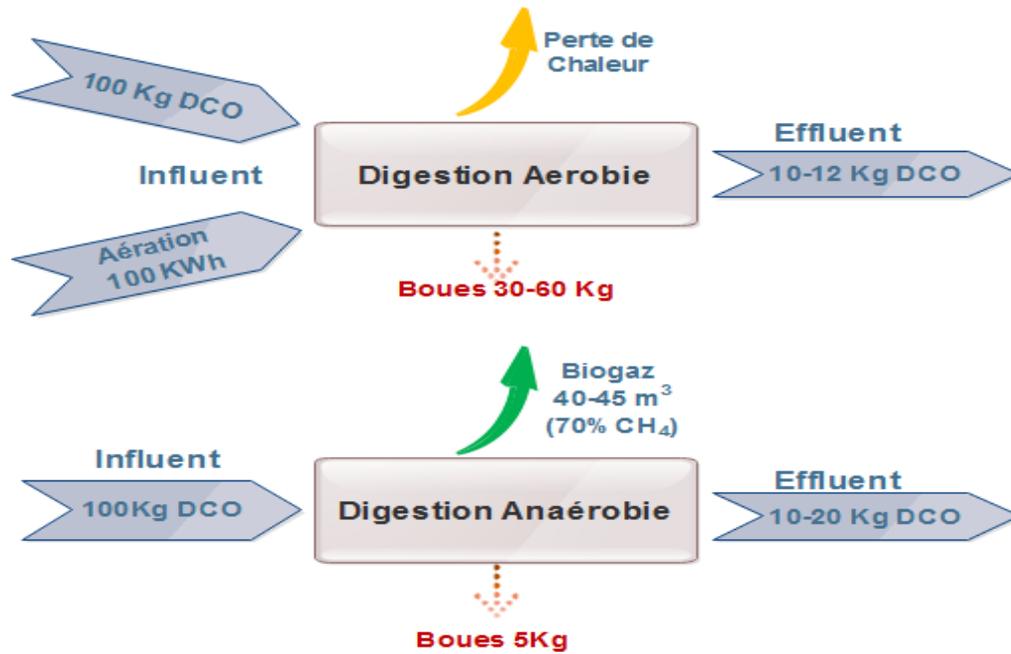


Figure II.1 Devenir du carbone et de l'énergie dans le traitement des eaux usées aérobie et anaérobie.

III.2 Principes de la digestion anaérobie

Les grandes étapes de la méthanisation sont illustrées par la figure II-2. Les détails de chaque étape de la méthanisation (hydrolyse, acidogènes, et méthanogènes) sont développés dans les paragraphes qui suivent :

III.2.1 L'Hydrolyse

La phase l'hydrolyse correspond à la désintégration des matières organiques complexes. Pendant cette phase, les polymères (polysaccharides, lipides, protéines, acides nucléiques) se transforment en monomères (monosaccharides (glucose), acides gras et acides aminés et bases azotées). Les étapes de transformations sont assurées par des bactéries hydrolytiques de la fermentation anaérobie. Ces bactéries ont un métabolisme de type anaérobie strict ou facultatif. Pendant la phase de la désintégration, les micro-organismes secrètent des enzymes extracellulaires qui hydrolysent les polymères solubles, celle-ci est assurée par les enzymes extracellulaires[21].

III.2.2 L'acidogènèse

C'est la phase pendant laquelle les monomères sont transformés en acides gras volatils (AGV) tels que les acides formiques, acétique, propénoïque, butyrique, isobutyrique, valérique et iso-valérique, et en alcool. Le gaz produit pendant la phase de la fermentation est

très riche en dioxyde de carbone à 80% (CO₂) et une partie en hydrogène à 20% (H₂). Les bactéries acidogènes (Clostridium) sont très souvent anaérobies strictes ou facultatives. Parmi les 4 étapes de la méthanisation, l'acidogénèse est l'étape la plus rapide à cause du temps de multiplication des bactéries très court. La surcharge organique d'un réacteur est souvent traduite par une accumulation d'intermédiaires tels que l'hydrogène et l'acétate pendant l'étape de l'acidogénèse[21].

III.2.3 L'acétogénèse

Sous l'action des bactéries acétogènes, les produits des deux phases précédentes se transforment en acétate, en hydrogène, et en dioxyde de carbone (CO₂). Différents types de bactéries sont responsables de l'acétogénèse. Il s'agit des bactéries syntrophiques : ce sont les bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène, les bactéries homo-acétogènes qui sont divisées en deux groupes de bactéries selon l'origine de l'acétate produit. Le premier groupe constitue l'acétate provenant d'un substrat carboné, le deuxième groupe l'acétate obtenu par la réduction du CO₂ par le H₂. Les bactéries sulfato-réductrices (BSR) sont aussi regroupées en deux groupes. Le premier groupe utilise le lactate comme source de carbone et l'oxyde de manière incomplète en acétate et CO₂, tandis que les bactéries du deuxième groupe oxyde de manière complète jusqu'au CO₂ l'acétate ainsi que certains acides à longues chaînes[21].

III.2.4 La méthanogénèse

Les produits obtenus par les phases précédentes sont transformés en méthane (CH₄). Les bactéries méthanogènes hydrogénophiles (hydrogénotrophes) et acétoclastes (acétotrophes) sont les responsables de cette transformation.

En général la réaction de la méthanisation est résumée par :



Les méthanogènes hydrogénotrophes ou hydrogénophiles utilisent la réduction du dioxyde de carbone ou de l'acide formique par l'hydrogène comme source d'énergie[21], selon l'équation suivante :



Pour le cas des méthanogènes acétoclastes ou acétotrophes, les organismes produisent du méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamine. Parmi les deux types des

bactéries souvent rencontrés dans un réacteur comme le Méthanosarcina et Méthanosaeta[21], les Archaea du genre Méthanosaeta utilisent l'acétate comme unique source de carbone pour produire le méthane selon la réaction suivante :

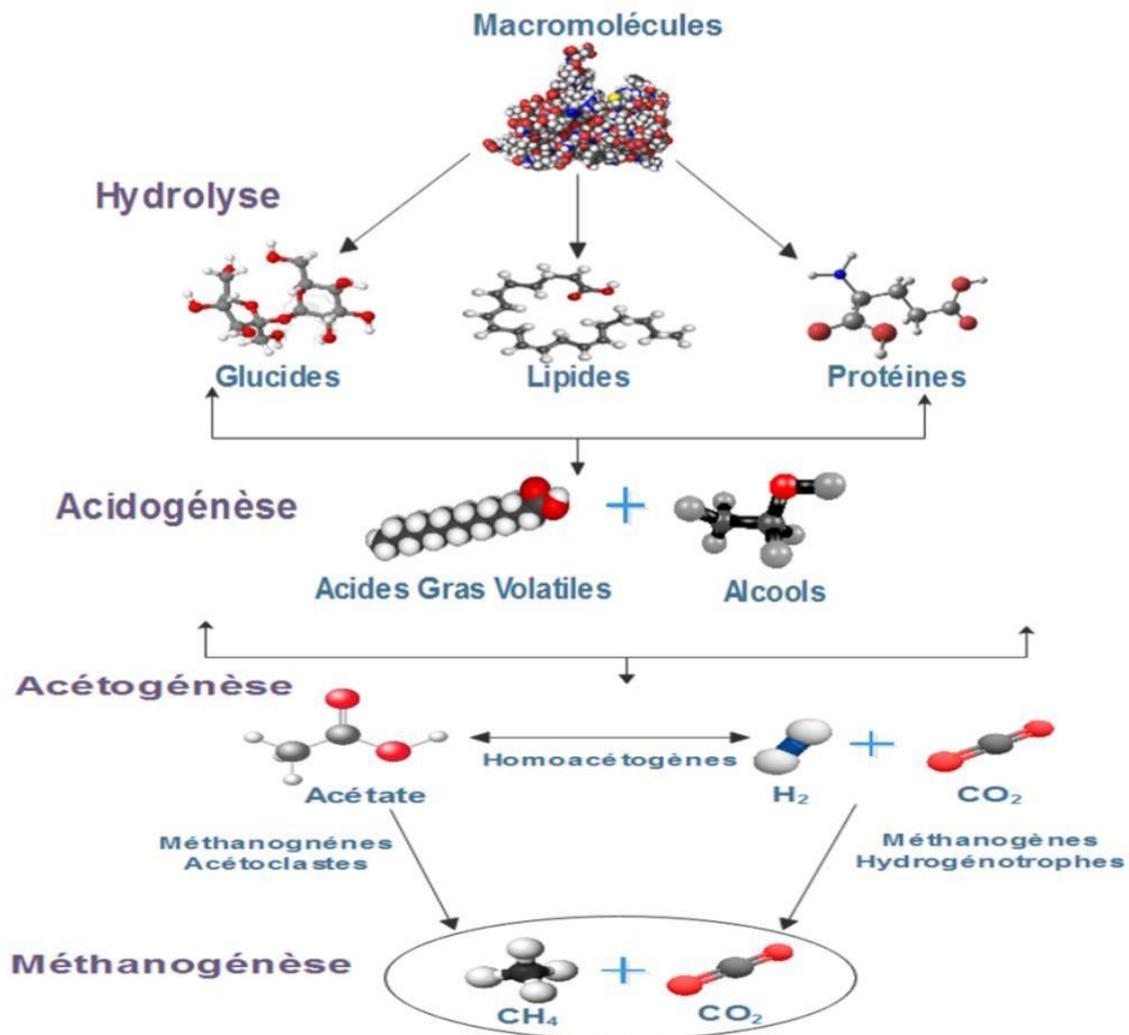
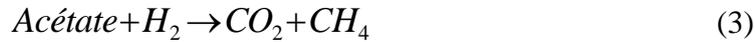


Figure II.2 Principales étapes de la digestion anaérobie.

III.3 Les paramètres influencent le procédé de la digestion anaérobie

III.3.1 Température

La température est un facteur primordial dans la digestion anaérobie en raison de son impact sur la cinétique, la thermodynamique des réactions et la croissance des micro-organismes. En effet, plus elle augmente, plus les réactions chimiques s'accélèrent et plus la croissance microbienne augmente. Il existe trois types de digestion anaérobie : la digestion psychrophile (5 à 20 °C), la digestion mésophile (20 à 45 °C) et la digestion thermophile (45 à 60 °C). Des

températures optimales existent, en particulier dans les zones mésophiles (autour de 37 °C) et thermophiles (autour de 55 °C)[22].

III.3.2 PH

La plage de pH optimale pour la digestion anaérobie se situe autour de la neutralité, entre 6,5 et 8,5. Le pH a un effet direct sur le fonctionnement du système par la modification des équilibres chimiques des acides et bases faibles, notamment les acides gras volatils (AGV) et l'azote ammoniacal dont la forme non ionisée (NH_3) peut inhiber la DA. Il est donc impératif de le suivre et, si nécessaire, de contrôler ses teneurs par l'ajout de soude ou de bicarbonate de sodium[23].

III.3.3 Le rapport C/N

Le rapport C/N est important pour la stabilité du processus. Si ce rapport est trop important, le carbone a du mal à être complètement dégradé. A l'inverse, un rapport trop faible peut entraîner une production importante d'ammoniac qui inhibe les bactéries à de faibles concentrations. Pour avoir une bonne stabilité, le rapport C/N doit être compris entre 10 et 30 environ[23].

III.3.4 Les inhibiteurs

Outre les facteurs physico-chimiques, comme le pH et la température, plusieurs substances peuvent avoir un effet nocif sur la digestion anaérobie[24].

***Ammoniac (NH_3)** : l'ammoniac en concentrations au-delà de quelques grammes par litre peut inhiber la phase méthanogène de la digestion anaérobie. Ces concentrations de NH_3 peuvent être causées par un apport élevé de matières riches en protéines, comme les restes d'élevage et les déchets agroalimentaires.

*** H_2S** : des substrats riches en protéines sulfurées et en sulfates peuvent mener à une augmentation de la production de H_2S . Il est également toxique pour les microorganismes méthanogènes, en plus d'être corrosif pour les matériaux.

***Substances toxiques** : les hydrocarbures aliphatiques chlorés et les acides gras à longue chaîne (AGLC) sont les substances organiques les plus toxiques pour la digestion anaérobie ; les antibiotiques et les antiseptiques entravent également le développement des bactéries méthanogènes. À propos des éléments inorganiques, les plus toxiques sont les cations comme le sodium (Na^+), le potassium (K^+) et les métaux lourds comme le cuivre, le nickel, le zinc et le plomb, en plus du NH_3 et du H_2S [24].

III.3.5 Temps de rétention hydraulique (TRH)

Ce paramètre correspond au temps moyen passé par le substrat dans le digesteur, pour un fonctionnement continu ou semi-continu. Le TRH correspond au rapport de volume du réacteur sur le débit de l'effluent. La détermination de ce paramètre permet le dimensionnement d'un réacteur, en fonction de la vitesse de dégradation du substrat et de la durée de séjour souhaitée. Ce choix conditionne, de plus, les caractéristiques du digestat produit, de par son impact sur le rendement épuratoire du procédé. Ainsi, l'augmentation du TRH induit généralement une meilleure dégradation du substrat due à un temps d'hydrolyse plus long, une production de méthane supérieure mais des coûts de fonctionnement et de dimensionnement également plus importants. A l'inverse, un TRH court, est économiquement préférable, mais peut toutefois favoriser l'accumulation d'AGV, inhibiteur de la méthanisation et nécessiter un post-traitement plus important du digestat. Un équilibre est donc nécessaire entre le temps de dégradation, la production de biogaz et le dimensionnement des installations[6].

III.3.6 Acides gras volatils

Les acides gras volatils (AGV) sont les intermédiaires les plus importants de la digestion anaérobie. Leur accumulation dans le digesteur traduit un dysfonctionnement de la méthanisation qui s'accompagne d'une baisse du pH et d'une augmentation de la concentration en hydrogène pouvant mener à une inhibition de la méthanogénèse. Pour un bon déroulement d'un procédé de digestion anaérobie, la concentration en acides volatils (AVT, Acidité Volatile Totale), doit être inférieure à 2 g eq. $\text{CH}_3\text{COOH}\cdot\text{L}^{-1}$ afin d'empêcher une inhibition des bactéries méthanogènes. L'un des critères permettant de confirmer la stabilité des bioréacteurs anaérobies est le rapport AVT/TAC qui doit être inférieur à 0,4[22].

III.3.7 La Charge organique

La charge organique entrante est un paramètre important. Elle correspond à la masse de substance organique entrante par unité de volume de digesteur et par unité de temps. La charge organique est généralement comprise entre 1 et 3 kg de matière organique par m^3 de digesteur et par jour pour la DA infiniment mélangée. Une charge organique trop importante peut provoquer une accumulation d'acides dans le digesteur et un arrêt de la réaction (l'acétogénèse ne pourra pas suivre le rythme de l'acidogénèse qui sera richement nourrie en matière). A l'inverse, une charge trop faible ne permettra pas aux bactéries de se développer correctement[23].

III.4 Potentiel méthanogène des substrats

Théoriquement, toutes les matières organiques peuvent être méthanisées sauf les produits trop ligneux comme le bois. Cependant, la réalité est moins évidente et le mélange de substrats entrant dans un digesteur doit être bien équilibré pour que les conditions du milieu permettent le bon déroulement de la réaction. De plus, tous les substrats ne vont pas produire la même quantité de biogaz[23].

Les ressources de la DA sont diverses, on peut les séparer en différents types de déchets selon leur provenance :

➤ *Les déchets issus de l'industrie agro-alimentaire*

Par les déchets des industries agro-alimentaires nous désignons les déchets d'abattoir, par exemple les eaux usées condensées, les os, les peaux, le sang... Ces déchets ont un potentiel méthanogène élevé. En effet, ils sont capables de générer un volume de méthane oscillant entre 50 et 100 mètres cube par unité de tonne.

➤ *Les déchets de nature « verte »*

Cela concerne les restes des collectivités au niveau des jardins (gazon tondu, feuilles mortes...). Ces derniers possèdent aussi un pouvoir méthanogène considérable qui est en moyenne de 90 mètres cubes par unité de tonne.

➤ *Les déchets issus des matières grasses*

Au niveau des déchets gras, nous distinguons un mélange d'eau, de graisses, de protéines et surtout de matière minérale, qui permettent une production de gaz importante en milieu anaérobie. Ils sont nombreux, mais les plus rentables du point de vue de la production du volume de méthane restent les graisses usagées du domaine agroindustrielles, par exemple, les huiles de friture. Leur pouvoir méthanogène est hors norme, une tonne de ce type de résidu peut produire jusqu'à 460 mètres cube de méthane.

➤ *Les déjections animales*

Les déjections animales peuvent être séparées en deux catégories :

- D'une part le lisier, une mixture où baigne les excréments et l'urine des animaux, il est essentiel à la méthanisation car son état liquide permet aux producteurs une manipulation facile, de plus, c'est un grand régulateur de pH.

- D'autre part le fumier, qui est un mélange de lisier et de paille sèche. De même, il présente un grand nombre d'avantages pour la méthanisation. Premièrement, par son taux de matière sèche élevée, qui homogénéise le mélange visqueux, et deuxièmement, le fumier est souvent connu pour sa capacité à supporter les bactéries, qui sont essentielles au bon déroulement des réactions dans le digesteur.

La figure II.3 regroupe potentiel méthanogène des matières organiques qui sont regroupé dans les quatre secteurs d'activités suivants: secteur agropastoral (déjections animales, résidus de culture), secteur ménager (déchets ménagers), secteur industriel (déchets d'industrie agro-alimentaire) et le secteur urbain (déchets de collectivités, boues urbaines de station d'épuration 'STEP'). Une autre solution fonctionnelle consiste à associer des effluents d'élevage (faible potentiel méthanogène mais pouvoir tampon et apportant des bactéries) et des résidus de cultures ou d'industries agro-alimentaires (bon potentiel méthanogène).

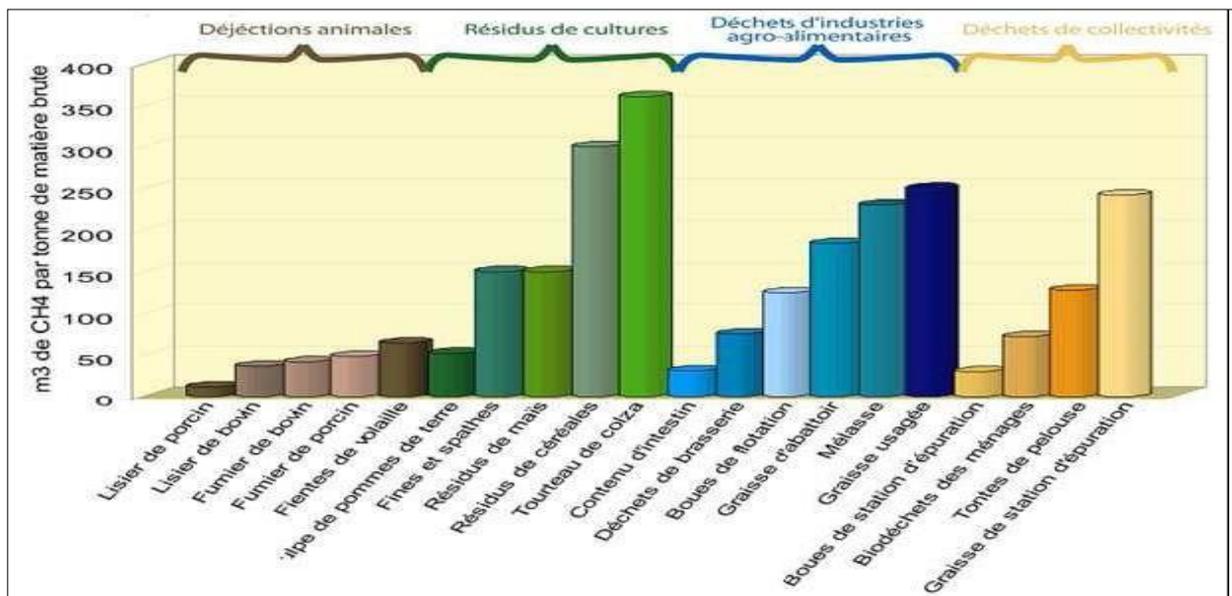


Figure II.3 Histogramme du potentiel méthanogène des matières organiques [24].

IV. Différents types de réacteurs de digestion anaérobie

IV.1 Modes d'alimentation et arrangement des réacteurs anaérobies

IV.1.1 Mode discontinu ou batch

En mode discontinu (Batch), le réacteur hermétiquement fermé est initialement rempli de matière organique à traiter etensemencé avec de l'inoculum. La réaction se déroule sans échange de matière avec l'extérieur et se poursuit jusqu'à épuisement du substrat à dégrader. Ce mode est généralement utilisé pour déterminer le potentiel méthanogène des déchets[22].

IV.1.2 Mode continu

Le fonctionnement en mode continu est le plus courant à l'échelle industrielle. Les réacteurs continus sont alimentés en permanence à un régime dit « nominal », qui correspond généralement à un débit de matière constant. En parallèle, une quantité égale de digestat est retirée du réacteur qui conservera ainsi son volume réactionnel. Cette technologie est idéale pour les installations de grandes tailles. Ce mode de fonctionnement est simple et adapté généralement au traitement des effluents fortement chargés en matières organiques (déchets agricoles, boues urbaines, ...)[22].

IV.1.3 Mode semi-continu

Ce mode de fonctionnement appelé également Fed-batch ou mode discontinu séquentiel (SBR, Sequencing Batch Reactor) est un mode hybride entre le continu et le discontinu. Il consiste à appliquer, dans un digesteur, des cycles alternant le remplissage, la réaction et la vidange[22]. L'avantage est de retenir tout ou une partie des microorganismes dans le réacteur pour le cycle suivant. Ce mode est bien adapté aux petites installations de méthanisation.

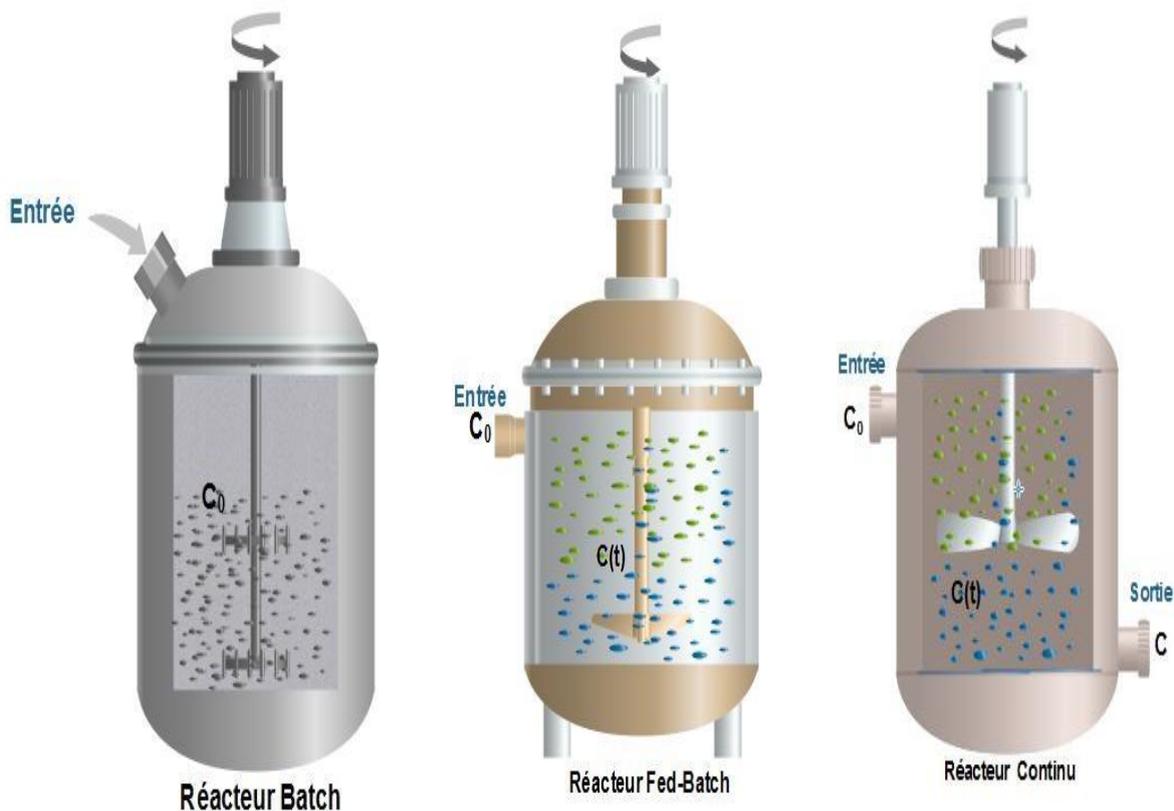


Figure II.4. Différents types de Bioréacteur

IV.2 Technologies des réacteurs continus

Comme la majorité des bioréacteurs industriels fonctionnent en mode continu, les sections suivantes concernent les bioréacteurs anaérobies continus généralement utilisés.

IV.2.1 Réacteurs parfaitement mélangés

Les réacteurs parfaitement mélangés sont appelés également CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) (Figure II.5). Leur contenu est maintenu homogène par brassage mécanique régulier ou par recirculation du biogaz ou du liquide ce qui favorise le contact entre la biomasse et le substrat à traiter. Une viscosité suffisamment basse est nécessaire pour permettre un mélange efficace dans l'ensemble du digesteur et pour assurer une bonne digestion de la matière organique bio-disponible. Cependant, un mélange incomplet favorise l'accumulation de matière particulaire ce qui diminue à long terme le volume utile du digesteur et réduit par conséquent les performances du procédé. Il convient de noter que ces réacteurs les plus utilisés actuellement dans le secteur industriel[22].

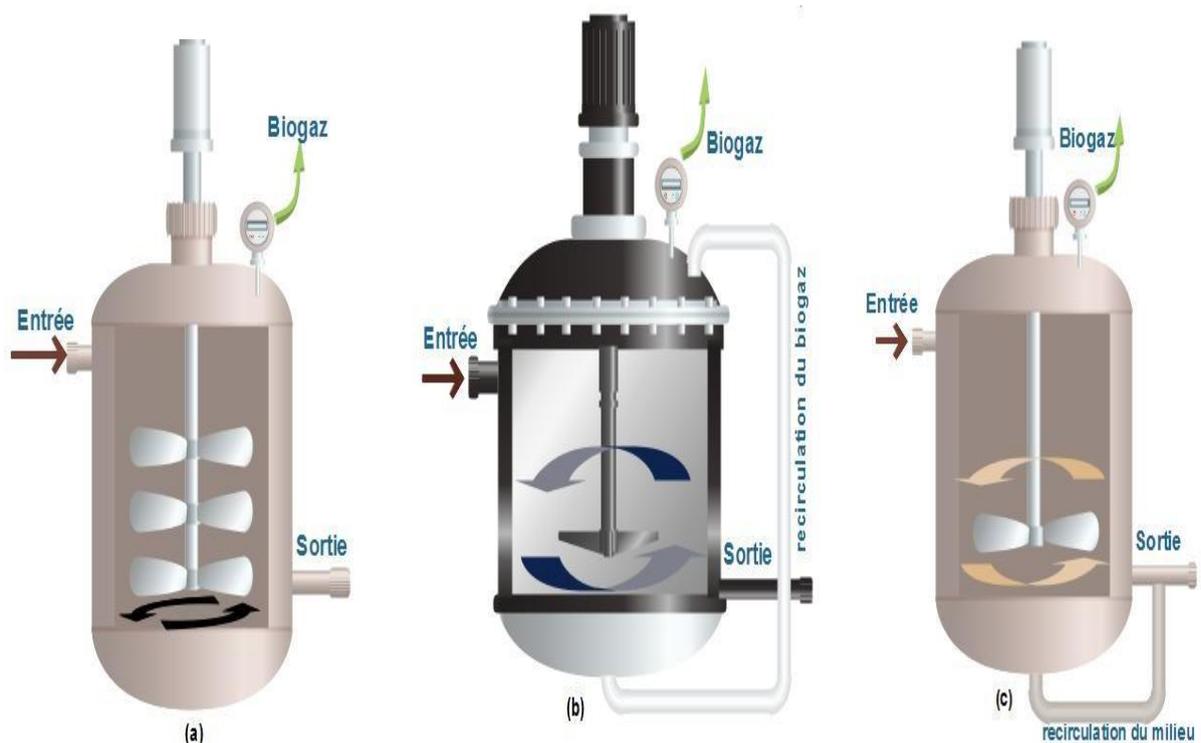


Figure II.5. Exemples du digesteur parfaitement mélangé : a) mécaniquement par pâles, b) par compression et recirculation du biogaz, c) par recirculation du milieu.

IV.2.2 Réacteurs à écoulement piston

À l'inverse des réacteurs précédents, le flux piston nécessite un état de la matière suffisamment visqueux pour conserver ses caractéristiques. Dans un réacteur piston horizontal, les systèmes d'agitation principalement utilisés sont la recirculation du digestat par une pompe extérieure, la recirculation du biogaz sous pression et les pales avec un axe longitudinal ou transversal (Figure II.6). Dans un réacteur piston vertical, une recirculation du bas vers le haut permet un effet de mélange et une inoculation du déchet à traiter[25].

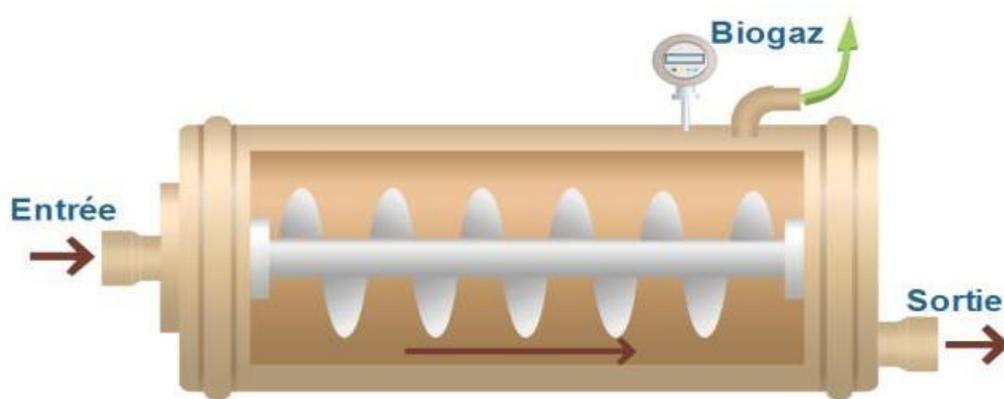


Figure II.6. Digesteur à pales avec un axe longitudinal

IV.2.3 Réacteurs à bio film ou granules

Un biofilm est constitué d'une matrice de polymères biologiques qui contient un groupe de micro-organismes pouvant se développer sur un support mobile ou fixe. Les espèces composant le biofilm adhèrent les unes aux autres et forment donc des granules. La biomasse est ainsi bien attachée ce qui facilite l'application d'importants débits sans risque de lessivage bactérien. Ces réacteurs sont alors plus robustes face à des chocs hydrauliques que les réacteurs à cultures libres[26].

IV.2.4 Réacteurs à lit fixe

Le support utilisé dans ces réacteurs est un garnissage, qui peut avoir une structure ordonnée ou peut être placé en vrac (Figure II.7). Ces réacteurs sont utilisés pour la méthanisation de rejets liquides contenant principalement des matières organiques solubles. Cependant, un risque de colmatage peut être rencontré en raison des matières particulaires présentes[26].

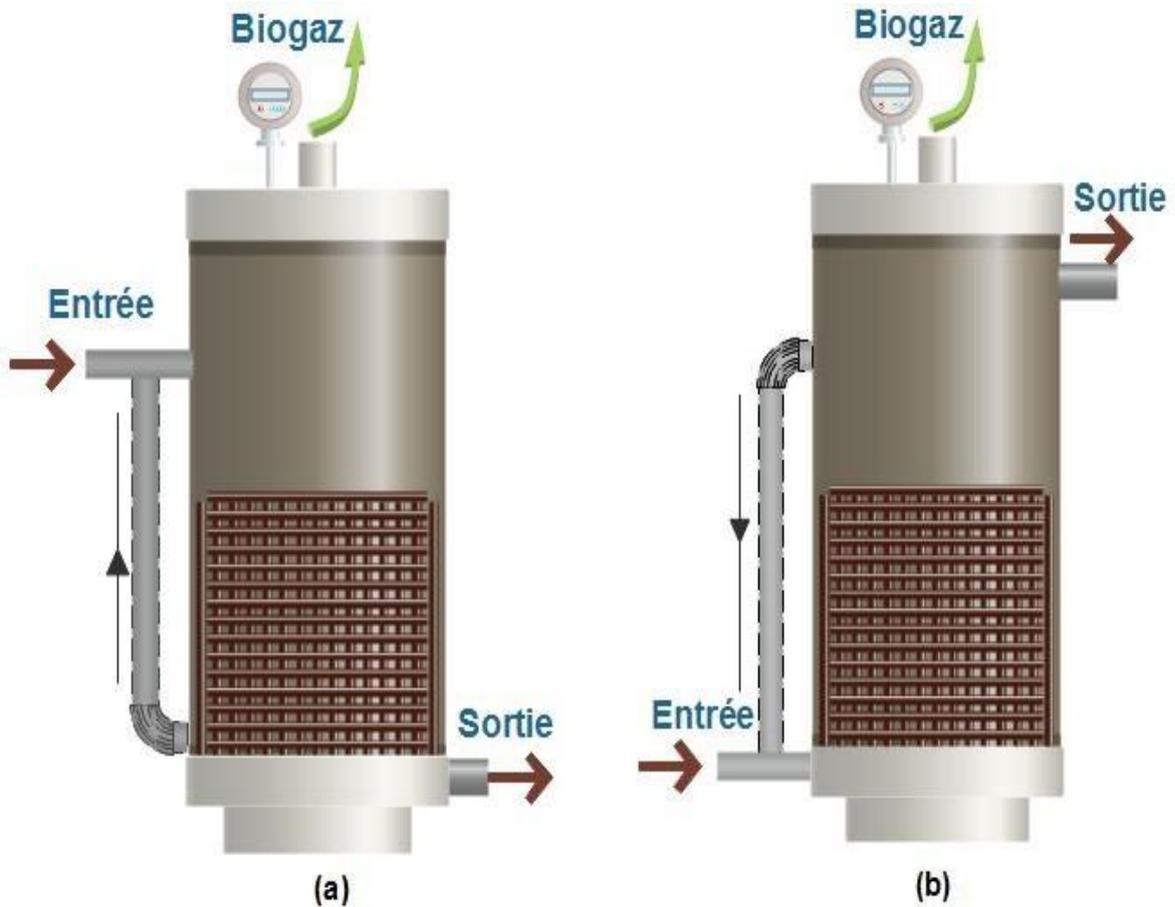


Figure II.7. Digesteur à lit fixe : a) à flux descendant, b) à flux ascendant

IV.2.5 Réacteurs à lit mobile

Ces réacteurs ont été développés pour combiner les avantages des réacteurs à biomasse fixée (taux de rétention de la biomasse élevés autorisant de grands débits d'alimentation) et de ceux à cellules libres (moindre sensibilité au colmatage et bonne homogénéité du milieu)[22]. Le support est un matériau granulaire ou un ensemble d'éléments mobiles spécifiques, mis en mouvement soit par un flux de liquide, soit par le biogaz. Les modèles généralement utilisés sont les réacteurs à lit fluidisés ascendants ou descendants, et les lits turbulés (Figure II.8). Cependant, comme dans le cas des réacteurs à lit fixe, la biomasse peut se retrouver piégée entre les supports[27].

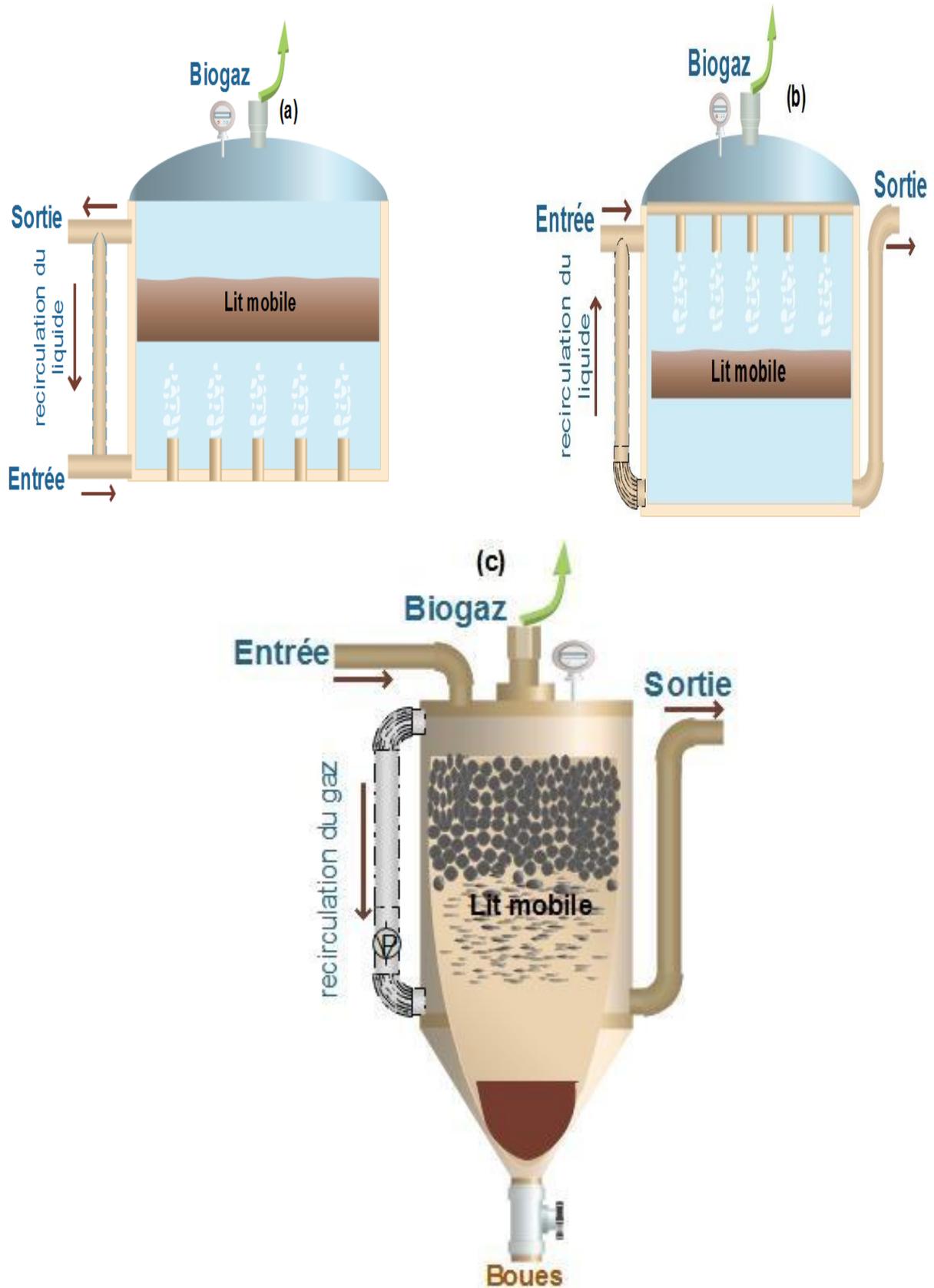


Figure II.8. Digesteur à lit fluidisé (a) à flux ascendant, (b) à flux descendant, (c) à lit turbulé inverse.

IV.2.6 Réacteur UASB

Le digesteur UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), Ils consistent à faire passer l'effluent à traiter à travers un lit de boues, au-dessus duquel se forme une séparation entre les boues et le liquide (Figure II.9). Les microorganismes forment des floccs et la décantation a lieu dans le digesteur. Cette technologie convient aux effluents qui sont rapidement biodégradables et contiennent peu de matières particulaires. Les réacteurs à lit de boues expansé EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) sont des digesteurs UASB dans lesquels le flux ascendant est nettement supérieur ce qui augmente la hauteur du lit de boue. Dans ce cas la cuve est plus haute, et le diamètre moindre[26].

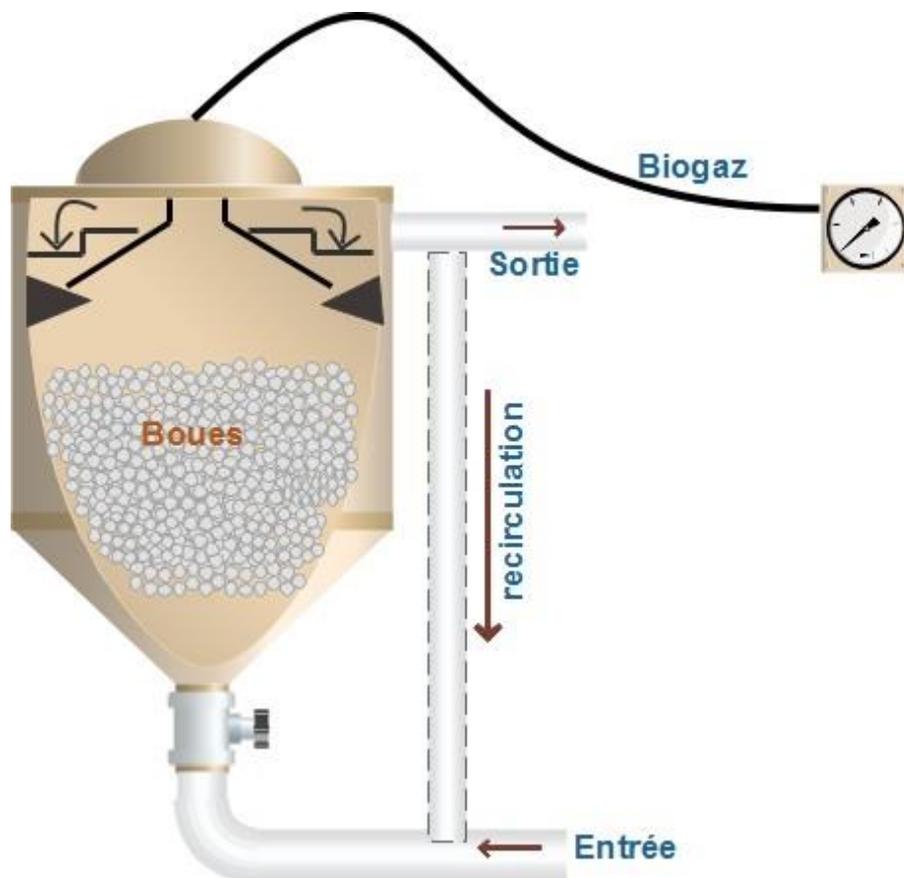


Figure II.9. Digesteur à lit de boues à flux ascendant (UASB : Up-flow Anaerobic Sludge Blanket).

IV.2.7 Réacteurs en une étape ou deux étapes

Dans les procédés précédents dits « à une étape », toutes les réactions ont lieu dans le même réacteur. Or, en cas de surcharge organique, l'acidogenèse générerait les acides à une vitesse plus importante que la capacité des bactéries méthanogènes à les éliminer. Ceci est

principalement dû aux différences dans les conditions optimales de croissance des bactéries acidogènes et des méthanogènes. Pour y remédier, le principe de l'approche en deux étapes consiste à effectuer dans un premier réacteur la phase d'hydrolyse et d'acidogénèse qui rejoindra alors un second réacteur, dans lequel se dérouleront l'acétogénèse et la méthanogénèse. Le temps de séjour dans le réacteur d'acidogénèse étant plus court, il présente en général un volume plus petit que le second réacteur dédié à la méthanogénèse. La méthanisation en deux étapes est choisie dans le cas de substrats rapidement fermentescibles, facilement disparus lors de l'acidogénèse, telle que les sucres et autre[8].

V. Paramètres opérationnels des digesteurs

V.1 Charge organique appliquée

La charge organique appliquée est le flux des intrants ramené à l'unité de volume du réacteur. Elle s'exprime souvent en Kg DCO par m³ du réacteur et par jour. Il convient de noter qu'une grande charge appliquée permet une croissance élevée des microorganismes et une importante production de biogaz, mais elle exerce également une pression sur les microorganismes ce qui peut conduire à un effondrement du processus dû à l'accumulation d'acides[28].

V.2 Temps de séjour hydraulique

Le respect du temps de séjour hydraulique (TSH) est un paramètre essentiel dans le dimensionnement des installations de méthanisation. Il correspond au temps requis pour que les microorganismes anaérobies dégradent les composés biodégradables avec un rendement satisfaisant. Il est calculé en divisant le volume utile du digesteur par le volume de digest extrait[28].

Le TSH doit être plus long que la durée du cycle de croissance des populations bactériennes. Le non-respect de cette contrainte entraîne leur diminution progressive dans le réacteur ; on parlera alors de lessivage bactérien. En outre, le TSH affecte l'efficacité des digesteurs anaérobies, à l'égard de la dégradation de la matière organique et la production de gaz. Un temps de séjour plus long nécessite habituellement un plus grand volume de digesteur, en même temps qu'il augmente le potentiel d'acclimatation de la flore bactérienne et minimise les effets dus à la toxicité. Au contraire, un temps plus court permet l'utilisation d'un digesteur de taille réduite, avec moins de capitaux financiers et d'espace, mais entraîne

aussi un plus grand risque de lessivage bactérien et donc un dysfonctionnement du digesteur[28].

V.3 Volume utile

L'un des principaux paramètres de dimensionnement d'un digesteur anaérobie est le volume utile. Ce volume est souvent affecté par l'accumulation de mousses et de particules solides liée à la présence de matières inorganiques et éventuellement un déficit d'agitation[28].

V. 4 Température

À l'échelle industrielle, différentes stratégies sont utilisées considérant la température. Le fonctionnement à température ambiante permet une économie importante au niveau des investissements, mais n'assure pas la durabilité du fonctionnement de l'installation durant l'année surtout dans les zones froides. Le fonctionnement en mode mésophile est le plus utilisé dans la pratique, compromis entre les dépenses énergétiques dues aux apports d'énergie thermique et surtout pour sa grande stabilité. Finalement, les températures élevées du mode thermophile, permettent d'augmenter la vitesse d'hydrolyse par rapport au mode mésophile et de lui confier un caractère plus hygiénisant par rapport aux germes pathogènes. Néanmoins, le mode thermophile est connu être moins stable, à cause des risques de production rapide d'AGV et d'hydrogène lors de l'étape d'hydrolyse et d'acidogenèse, qui peuvent entraîner l'inhibition du système[28].

V.5 Démarrage des digesteurs anaérobies

La phase de démarrage du digesteur, souvent longue et difficile, comprend l'inoculation par un écosystème anaérobie méthanogène suivie d'une montée en charge jusqu'à atteindre la charge organique nominale. En effet, ce démarrage doit se dérouler dans des conditions bien maîtrisées afin de maintenir l'équilibre complexe entre les différentes populations microbiennes et pour obtenir ainsi un système stable et robuste. Dans le cas des digesteurs à forte charge organique, cette phase varie généralement entre 2 et 9 mois jusqu'à 12 mois ou plus pour les digesteurs fonctionnant en mode thermophile. La réduction de la durée de démarrage semble nécessaire pour augmenter la compétitivité de ces digesteurs[28].

V.6 Inoculation

L'inoculation consiste à introduire dans le réacteur une flore microbienne adaptée et efficace en termes de dégradation de la matière organique. L'idéal est d'utiliser un inoculum

provenant d'un réacteur traitant le même type d'intrants et dans les mêmes conditions, en particulier la température. Dans la pratique, il est possible d'utiliser un inoculum mésophile pour démarrer un digesteur anaérobie thermophile traitant des effluents liquides ou des déchets solides. L'utilisation de boues anaérobies de stations urbaines à haute diversité microbienne est souvent préconisée par les chercheurs. En moyenne, une période d'acclimatation de 1 à 3 semaines est suffisante, mais certaines études ont été conduites sur des périodes plus longues, de 2 mois à 3 mois[29].

V.7 Montée en charge

Cette phase suit l'étape d'inoculation et s'achève lorsque le digesteur atteint sa charge organique nominale et des performances épuratoires stabilisées. Une montée trop rapide entraîne une surcharge organique pouvant aller jusqu'à l'arrêt de l'installation, tandis qu'une montée trop lente se traduit par une faible croissance des microorganismes et une durée de démarrage très longue. Généralement, deux types de démarrages sont réalisés. Le premier est effectué selon la stratégie de l'épuration maximale. Il est fondé sur une augmentation par paliers de la charge appliquée en fonction du rendement épuratoire. Cette stratégie est souvent accompagnée d'une montée en charge par paliers de 5 à 30% par rapport à la charge précédente, lorsque le rendement épuratoire atteint un seuil minimal de 80 %. Le deuxième démarrage s'effectue selon la stratégie basée sur une augmentation exponentielle de la charge organique par accroissement de la concentration de l'alimentation mais à TSH constant. Cette technique de montée en charge est plus rapide que la première, mais elle est plus risquée en raison d'une accumulation plus importante des AGV durant le démarrage. Ce type de stratégie « agressive » nécessite une surveillance plus étroite que la première stratégie[26].

VI. Bilan énergétique de la digestion anaérobie

A ce jour, la majorité des installations de DA oriente la valorisation du biogaz vers la production d'électricité et de chaleur. Toutefois, il existe d'autres types de valorisation telles que l'injection de biogaz dans le réseau de gaz de distribution ou encore la production de biocarburant (figure II.10)[25].

VI.1 Production d'énergie par la digestion anaérobie

VI.1.1 Production en fonction de la quantité de MS introduites

La production d'énergie peut s'exprimer en fonction de la quantité de matières sèches entrante en digestion. Le PCI du méthane est de 9,95 KWh /m³. Cette production énergétique sera

différente selon le type de boues. Il faut noter que tous les résultats et pourcentages ci-dessous sont donnés à titre indicatif et pour un fonctionnement en mode mésophile[30].

a) *Boues mixtes*

- ✓ La production de méthane est de 220 m³ / t de MS introduite ;
- ✓ Soit 2 190 KWh / t de MS introduite.

b) *Boues biologiques de faible charge*

- ✓ La production de méthane est de 110 m³ / t de MS introduite ;
- ✓ Soit 1 095 KWh / t de MS introduite.

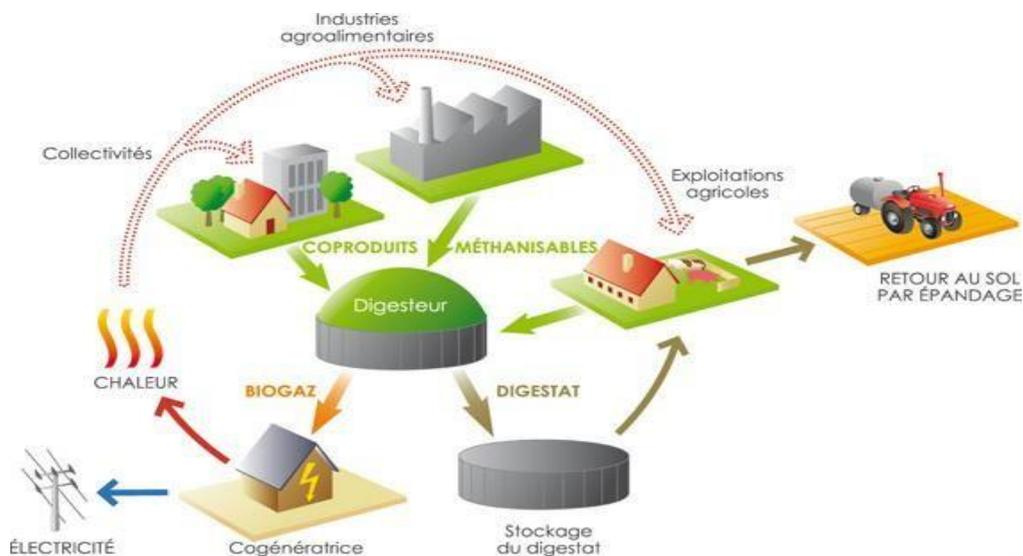


Figure II.10: Valorisation possible des produits de la digestion anaérobie [31].

VI.2 Rendements et valorisation énergétique et finale de la digestion anaérobie

VI.2.1 La valorisation thermique

La chaleur provenant de la combustion du biogaz est utilisée pour la production d'eau chaude et/ou de vapeur. On retient globalement que la production de cette chaleur est en partie consommée (20 à 30 % de la chaleur produite) par le chauffage du digesteur par l'intermédiaire de serpentins ou de conduites en inox permettant le passage de l'eau chaude maintenant le digesteur à une température donnée (37 ou 55 °C).

Le reste de la chaleur produite est utilisé en grande partie pour chauffer les bâtiments agricoles (séchage du digestat, séchage de foin, chauffage de serres...) ou domestiques. Toutefois, les potentiels utilisateurs de cette chaleur doivent se situer à proximité immédiate de l'unité déméthanisation car, aujourd'hui, la création d'un réseau de distribution de chaleur

de grande ampleur n'est pas viable économiquement parlant car cela nécessite des investissements financiers élevés pour des recettes faibles[25].

VI.2.2 La valorisation électrique

Une autre source de valorisation possible est la production d'électricité. En effet, le biogaz peut produire de l'électricité à l'aide d'un moteur à biogaz ou une turbine à vapeur qui entraîne un alternateur produisant ainsi de l'électricité. Cette électricité est ensuite utilisée par l'exploitant, voire revendue en étant exportée via le réseau de distribution, lorsqu'elle est produite en excès[25].

VI.2.3 La création d'un biocarburant

Le biogaz peut également représenter une alternative aux carburants traditionnels. Le biogaz produit par une installation de méthanisation doit être épuré (lavage à l'eau, système membranaire, adsorption modulée en pression, absorption chimique, cryogénie) pour obtenir un niveau de concentration en méthane d'au moins 95%. Une fois comprimé, le bio-méthane obtenu pourra être injecté dans le réseau et permettre d'alimenter des stations de carburant distribuant du gaz naturel pour véhicule[25].

VI.2.4 L'injection de biogaz dans le réseau de distribution

Enfin, l'injection de biogaz dans le réseau de distribution de gaz de ville constitue la dernière filière de valorisation du biogaz. Le bio-méthane injecté dans le réseau de distribution permet de couvrir les usagers du gaz naturel (chaleur, cuisson...) à des endroits éloignés du point d'injection.

Néanmoins, avant toute installation de ce type, le gestionnaire du réseau doit valider en amont la faisabilité de l'injection dans le réseau, en vérifiant notamment qu'un réseau de distribution se situe à proximité du site d'injection, et que le débit produit par l'installation de méthanisation est compatible avec la consommation en aval (il n'est en effet pas possible d'injecter plus de bio-méthane que la consommation de gaz sur la zone d'injection). De plus, il est indispensable que le biogaz injecté ait subi des traitements afin d'en garantir la qualité. A titre d'exemple, il peut être cité le silicium présent dans le bio-méthane. A une concentration donnée, lors de la combustion du bio-méthane, le silicium présent dans le bio- méthane peut être libéré et ainsi se combiner avec l'oxygène sous forme de silicates. Les silicates se caractérisent par un dépôt de couleur blanche pouvant adhérer aux surfaces métalliques. Dans le cadre d'une utilisation de bio-méthane dans une chaudière, ce dépôt

aurait pour conséquence d'endommager l'installation et provoquerait ainsi une baisse de rendement de la chaudière, une potentielle augmentation d'émissions de monoxyde de carbone ou encore d'éventuelles fuites de gaz générées par l'accumulation de ces dépôts sous la soupape d'échappement[25].

VI.2.5 La valorisation du digestat

A l'issue du processus de méthanisation, une matière résiduaire organique appelée : le digestat, est utilisée généralement comme fertilisant pour les sols dans le cadre de plans d'épandage. Avant l'épandage, le digestat pourra subir des modifications de sa composition (déshydratation par séparation de phases, enrichissement/appauvrissement en éléments minéraux...) afin de répondre à des contraintes techniques, économiques et règlementaires. Ce digestat possède une valeur agronomique que l'on définit par la valeur amendant et la valeur fertilisante. La valeur amendant correspond à la capacité à augmenter la teneur en matières organiques des sols, et la valeur fertilisante constitue la teneur en éléments nutritifs pouvant être assimilés par les plantes (minéral). Il faut souligner que la valeur agronomique des digestats, c'est-à-dire son « potentiel fertilisant », est étroitement liée aux matières organiques injectées dans le réacteur et aux procédés de méthanisation utilisés et que la composition des substrats, c'est-à-dire le mélange des déchets injectés dans le réacteur, a pour conséquence une concentration plus ou moins importante des éléments fertilisants (N, P, K)).

De plus, la séparation des phases des déchets (liquide / solide) intégrés dans le réacteur permet de maîtriser la production des digestats et ainsi obtenir des digestats ayant des caractéristiques différentes notamment en ce qui concerne la teneur en azote et phosphore[25].

VI.3 Consommation d'énergie

VI.3.1 Chaleur

La consommation de chaleur pour le chauffage des digesteurs représente en moyenne, en métropole :

- 32 % en moyenne de l'énergie valorisable pour des boues mixtes.
- 65 % dans le cas de digestion de boue biologiques de faible charge (étant donné la production plus faible de méthane pour ces dernières).

En tenant compte des températures réunionnaises et de la possibilité d'utiliser un échangeur thermique, qui permet de réchauffer les boues qui entrent en digestion avec les boues « chauffées » qui sortent du digesteur, les valeurs pourraient être les suivantes:

- 15 % de l'énergie valorisable pour des boues mixtes.
- 30 % de l'énergie valorisable pour des boues biologiques de faible charge[25].

VI.3.2 Electricité

La consommation d'électricité est liée principalement au brassage du digesteur et secondairement au pompage et à la circulation des boues pour le chauffage. Elle représente en moyenne[25]:

- 5 % de l'énergie valorisable pour des boues mixtes.
- 10 % de l'énergie valorisable pour des boues biologiques de faible charge.

VI. 3.3 Globalement

Les besoins énergétiques de la digestion anaérobie, compte tenu des températures réunionnaises, pourrait représenter :

- 20 % de l'énergie valorisable pour des boues mixtes.
- 40 % de l'énergie valorisable pour des boues biologiques de faible charge.

La méthanisation est donc une étape de traitement au bilan énergétique positif. Ceci sans compter les économies d'énergies réalisables sur les traitements aval des boues du fait de la réduction de volume[30].

Il faut noter que :

- L'énergie dite valorisable, correspond à 95 % de l'énergie potentiellement disponible à partir du biogaz. En général, 5 % de cette énergie totale ne vont pas être utilisés. En effet, il est nécessaire de maintenir un excès de potentiel de production de méthane par rapport à la consommation des installations de combustion, de façon à garantir une alimentation à débit nominal des brûleurs. Le biogaz non utilisée stalsorséliminéentorchère.
- Compte tenu des conditions climatiques locales, il pourrait être intéressant d'envisager le chauffage (complet ou partiel) du digesteur, par un système de « chauffage solaire » (eau chaude solaire, autre). Les technologies de chauffage solaire étant très développées sur l'île. La digestion anaérobie consommerait ainsi moins d'énergie « biogaz » et une plus grande quantité d'énergie serait alors utilisable et valorisable[30].

Chapitre III
Présentation de la station
d'épuration d'Ibn Ziad
Constantine

Chapitre III

Présentation de la station d'épuration d'Ibn Ziad Constantine

I. Introduction

L'eau est un élément indispensable à la survie des êtres vivants. Elle fait actuellement l'objet d'une exploitation concurrentielle entre les besoins de la population, ceux de l'agriculture et de l'industrie qui se disputent une disponibilité limitée. Les activités humaines ne cessent de polluer les eaux donnant ainsi des eaux usées. Face à cette grandissante montée des eaux usées et de la pénurie de l'eau, des stations d'épuration sont mises en place dans de nombreux pays afin de garder une bonne qualité de cette eau et aussi sa disponibilité. L'Algérie n'est pas restée en marge de tout cela. La Station d'épuration Ibn Ziad est l'une des réalisations algériennes qui nous vous décrivons cette dite station, de sa localisation à son fonctionnement[32].

II. Présentation de la station d'épuration

II.1 Localisation de la station d'épuration IBN ZIAD

La Station d'épuration des eaux usées IBN ZIAD est située au Nord la wilaya de Constantine Sud Ain Smara, Est Hamma Bouziane, Ouest El Regrege à 12 km de la ville de Constantine, dans la daïra de Hamma Bouziane, sur la route de Mila. Elle s'étend sur une superficie de 12 Hectares (figure 1). Elle se trouve au nord de MechtatOuldjet El Cadi, en bas de la route nationale RN°2.



Figure III.1. Vue géographique de la station d'Ibn Ziad[33]

II.2 Données générales sur la station d'épuration

- Date de mise en service: 12 mai 1997 avec un débit nominal de 69120 m³/j.[34]
- Type d'épuration : épuration par boues activées en aération prolongée avec une zone D'anoxie entête du bassin d'aération.[34]
- Indicateurs de performance : Comme présente le tableau suivant :

Tableau III.1: Indicateurs de performance à la STEP (juin 2016)[35]

	DCO (mg/L)	MES (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)
Entrée	722	500	50
Sortie	70	≤10	≤3
Rendement finale	90%	98%	94%

II.3 Les équipements dans la station d'épuration

La station d'épuration d'Ibn Ziad équipé par les éléments suivants :

II.3.1 Filière de prétraitement

Cette filière contient :

- Le dégrilleur dont les caractéristiques sont données dans le tableau III.2 ;
- Le bassin de dessablages à deux aspirateurs de sable avec une puissance de moteur de 2,2 KW ;
- Le bassin de déshuilages contient 2 souffleurs à air avec une capacité de 874 m³/heure[34].

Tableau III.2 : Les caractéristiques physiques du prétraitement[34]

Dégrilleurs à barreau râtaux mécanique		Le bassin de Dessablages/déshuilages	
Nombre d'unités	3(2 en service, 1 de secours)	Nombre d'unités	2
Capacité (chacun)	1200 L/s	Longueur	14.5 m
Largeur	2 m	Largeur	5 m
Épaisseurs du barreau	12 mm	Profondeur	5 m
Espacement des barreaux	20 mm	Le volume de bassin	362.5 m ³

II.3.2 Filière de traitement biologique

Cette filière contient :

- 4 bassins d'aération prolongés avec un volume de 14817.6 m³ ;
- 2 bassins d'anoxie avec des mélangeurs immergibles [34].

II.3.3 Filière de traitement des boues

L'épaississement des boues s'effectue dans 2 bassins qui ont un diamètre interne de 17 m et une profondeur de 3,5 m, ces bassins sont équipés par des ponts de type barrière à pieux à pont fixe bras double avec une puissance de 1,5 KW ; et pour le séchage des boues il y a 24 lits de faible profondeur s'étale sur une superficie de 21600 m²[34].

II.3.4 Bâtiment d'exploitation :

La station se dispose d'un laboratoire en vue de réaliser les différentes mesures nécessaires à la caractérisation de l'état de l'effluent : mesure de DCO, DBO₅, MES, pH, conductivité etc. Ainsi que d'autres appareils faisant partie des protocoles expérimentaux : hôte, plaques chauffantes, fours (200°C et 3000°C) etc..[34].

II.4 Capacité du traitement des eaux usées

La station d'épuration d'IBN ZIAD a été conçue en 1978 par des ingénieurs Yougoslaves, pour traiter les eaux d'Oued Rhumel, le plus important cours d'eau de Constantine, par un système d'épuration à boues activées, prévue pour 450.000 habitants équivalents. Elle a été mise à l'essai le 15/05/1997, et en service réel le 15/09/1997, elle traite aujourd'hui une partie des rejets d'eaux usées déversées par la ville de Constantine[32].

II.5 Qualité des eaux usées brutes

Les eaux usées se classent généralement en deux catégories : les eaux d'égout et les eaux industrielles. La station d'épuration d'IBN ZIAD traite les eaux usées d'égout de Constantine; ces eaux proviennent de diverses origines : ce sont aussi bien les eaux usées industrielles que domestiques. Elles sont acheminées à la station par une conduite à écoulement gravitaire.

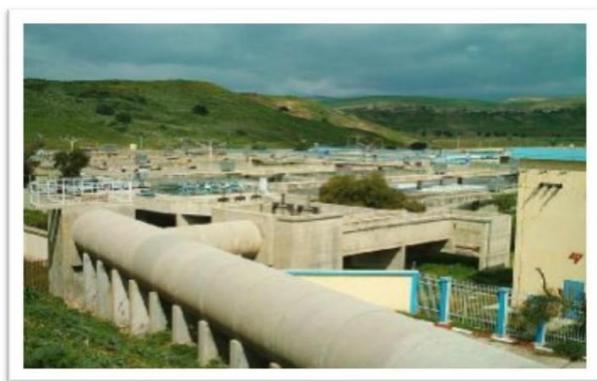


Figure III.2. Conduite principale des eaux usées qui alimentent la station d'épuration d'IBN ZIAD[34]

Tableau III.3 : Capacité nominale de traitement et qualité moyenne requise des eaux usées avant traitement[35] :

Paramètres	Qualités
Débit d'entrés journalier moyen	69120m ³ /jour (800 L/s)
Débit de pointe	8640m ³ /h (2400 L/s)
Demande chimique en oxygène	0.13kg/h/j
Charge moyenne de DCO/jour	49920 Kg
Concentration moyenne de DCO	722mg/L
Demande biologique en oxygène (DBO ₅)	0.054kg/h/j
Charge moyenne de DBO/jour	20736 kg
Charge solide en suspension (SS)	0.09kg/h/j
Charge moyenne de SS/jour	34560 kg
Concentration moyenne de SS	500mg/L
Concentration en ammonium NH ₄ ⁺	50mg/L
Charge d'ammonium par jour NH ₄ ⁺	3456kg
Charge de boue	0.1 kg DBO/ kg LMSS/Jour
Liqueur mixte SS	3500 mg/L

II.6 La qualité de l'effluent traité

La qualité de l'effluent traité devra correspondre aux caractéristiques suivantes :

- ✓ Demande Biologique Oxygène (DBO) : \leq à 10mg/L
- ✓ Matière en Suspension (MES) : \leq à 10mg/L
- ✓ Ammonium (NH₄) : \leq à 3mg/L
- ✓ Total des coliformes : $<$ à 100 par 100mL
- ✓ Teneur en œufs d'helminthes: \leq 1 par litre

L'effluent traité est rejeté actuellement dans l'Oued Rhumel. Il pourrait être pompé pour l'irrigation[32].

III. Les Etapes du traitement de la station d'épuration Ibn Ziad

Les eaux usées de la ville de CONSTANTINE subissent, au niveau de la STEP d'IBN ZIAD, des prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage), un traitement biologique par boues activées, puis un traitement physique qui est la décantation secondaire (clarification).

Une fois traitées, les eaux usées sont évacuées par le canal de sortie pour rejoindre leur milieu récepteur qui est le Oued Rhumel.[36]

Le processus de traitement compte les étapes suivantes :

III.1 Prétraitement

III.1.1 Criblage grossier

A l'aide des cribles à barreaux mécaniques ceux –ci se comportent en trois jeux de crible à râtaux de 12 mm de large espacés de 20 mm en parallèle, chaque crible est muni d'une vanne d'entrées et de sortie, et une capacité maximale de 1200 L/s, les détritrus de déversés dans une benne pour l'évacuation définitive.[37]



Figure III.3. Canaux d'entrées de l'eau usée au criblage grossier, avec des ouvertures manuelles[37]



Figure III.4. Criblage grossier[37]

III.1.2 Deux canaux de dessableurs

Ils sont conçus de manière à permettre l'utilisation permanente des deux unités de 14.5 m de longueur et 5 m de largeur, 5 m de profondeur (niveau d'entrés) ; le sable et la graisse sont éliminés des eaux usées dans un canal aéré à écoulement en spirale et à double compartiment, les deux moitiés du canal fonctionnement ensemble et parallèle[37].



Figure III.5. Séparation du sable et de la graisse[37]

III.2 Traitement primaire

Ce traitement a comme objectif d'enlèvement des solides organiques et inorganiques sédimentables ainsi que les matériaux flottants. A la fin de ce traitement, la décantation de l'eau a permis de supprimer environ 60 % des matières en suspension, environ 30 % de la demande biologique en oxygène (DBO) et 30 % de la demande chimique en oxygène (DCO)[38].

III.3 Traitement Biologique

Il est accompli dans quatre bassins biologiques de 42 m de largeur et 63 m de longueur et 5.6 m de profondeur. Les deux premiers compartiments sont nommés «zone d'anoxie »et sont munis de mélangeurs visant à assurer la suspension du mélange « boue activée et eaux usées » (liqueur mixte). Les deux derniers compartiments sont munis d'aérateurs mécaniques superficiels qui alimentent la liqueur mixte en oxygène dissous[35].



Figure III. 6 Bassins d'aération[35]**Figure III.7** Bassins d'anoxie[35]

III.3.1 La boue activée

La boue activée composée essentiellement de micro-organismes flocculants, est mélangée avec de l'oxygène dissous et de l'eau usée. C'est ainsi que les micro-organismes de la boue activée entrent constamment en contact avec les polluants organiques des eaux résiduaires, ainsi qu'avec l'oxygène, et sont maintenus en suspension. L'aération des eaux résiduaires a lieu dans des bassins en béton qui ont une forme appropriée en fonction du système d'aération, du mode d'introduction des eaux et de la boue activée. On appelle ces bassins des bassins d'aération ou bassins à boues activées. Afin de maintenir une biomasse suffisante, la boue est recyclée par pompage dans le bassin de décantation secondaire.

Il existe de nombreux systèmes différents pour l'aération dans le procédé à boues activées.

Le choix dépend de la composition de l'eau résiduaire, ainsi que des conditions de construction et d'exploitation de l'installation au point de vue technique et économique. Les trois modes essentiels sont : pneumatique (aération sous pression), mécanique (uniquement aération de surface) et aération combinée[38].

III.3.2 Clarification et décantation

L'eau traitée (liqueur mélangée) sortie des bassins biologiques acheminée hydro-statiquement vers deux chambres puis vers, huit bassins clarificateurs circulaires raclés secondaires (Chaque bassin fait 39 m de diamètre avec une paroi latéral de 2.5 m de profondeur). La liqueur mélangée s'écoule dans l'un des huit bassins de décantation secondaires, disposés parallèlement les uns aux autres, elles tombent au fond du bassin et sont enlevées[35].



Figure III.8 Clarificateur [35]

III.3.3 Les Boues de retour

Les boues activées de retour sont refoulées par trois pompes à vis de 1.64 m de diamètre avec inclinaison de 30° chacune. Les boues remontent sur 4 m vers la charge d'où elles s'écoulent par gravité vers le partage de l'écoulement. L'une en marche et les autres secours[35].



Figure III.9 Pompes à vis de retour de boue[35]

III.4 L'étape de Désinfection

Les eaux traitées utilisées aux fins de l'irrigation seront désinfectées au chlore dans un bassin d'eau limpide de 180 m de capacité. Cette étape offre une durée de retenue de 10 minutes pour un débit maximum des eaux traitées d'irrigation de 300 L/s [35].

III.5 Traitement des boues en excès

Les boues excédentaires de la station de pompage des boues de retour s'écoulent vers deux bassins d'épaississement des boues de 17m de diamètre et 3.5 m de profondeur munis chacun d'un agitateur à pieux fixé sur le pont et d'un clapet de sectionnement manuel. Les boues épaissies découlent par gravité des épaisseurs vers l'un des 24 lits de séchage, leurs superficie totale est de 21 600 m²[35].



Figure III.10 Les lits de séchage des boues[35]

Les boues sont distribuées par une série de tuyaux et de clapets, l'eau surnageant est drainée, manuellement des lits par un système de vannes et renvoyée à la station pour être traitée.

L'eau décantée s'écoule vers un puisard de décantation. Puis refoulée vers le puisard des boues de retour, le reste de l'eau s'évapore et les boues sèchent à l'aire libre. Enfin, l'effluent traité est rejeté actuellement dans l'oued Rhumel il pourrait être pompé pour l'irrigation.

Chapitre IV
Dimensionnement d'une
installation de traitement
anaérobie

Chapitre IV Dimensionnement d'une installation de traitement anaérobie

I. Introduction

Dans nos jours, la consommation d'énergie est l'une des préoccupations majeures des stations d'épuration (STEP). Il y a longtemps, la digestion anaérobie était généralement mise en œuvre pour la stabilisation des boues d'épuration, mais l'optimisation de la récupération d'énergie a récemment pris de l'importance. Le bilan énergétique des stations d'épuration révèle qu'en fonction de la configuration des STEPs et de leurs fonctionnements, entre 39% et 76% de l'énergie électrique totale consommée dans la station d'épuration pourrait être fournie par le biogaz produit[39].

Les installations de traitement anaérobie (digesteur anaérobie) en vue de la valorisation des boues des stations d'épuration sont rares en Algérie. Pour le cas de la STEP de Ibn Ziad de Constantine, le traitement des boues se fait par des lits de séchage (chapitre III), dans ce contexte, le but de ce travail est de faire un dimensionnement d'une installation de traitement des boues de la STEP de Ibn Ziad par digestion anaérobie, comme un traitement énergétiquement rentable pour la station.

II. Dimensionnement du procédé de digestion anaérobie

La chaîne de digestion se divise en plusieurs postes :

- L'épaississement des boues avant digestion ;
- Le (ou les) digesteurs ;
- Le stockage du biogaz ;
- La déshydratation des boues après digestion.

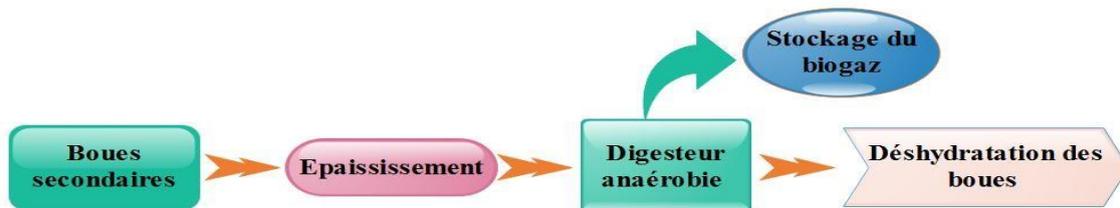


Figure IV.1. La digestion anaérobie dans la chaîne de traitement des eaux usées

II.1 Caractéristiques des boues de la STEP d'Ibn Ziad Constantine

Au cours de cette étude, le choix de faire un stage à la station Ibn Ziad pour avoir les données et les archives exactes de la production de boues était impossible, en raison de la pandémie mondiale de COVID19 ; en conséquence toutes les valeurs utilisées pour le dimensionnement sont regroupées des références (thèses et articles) téléchargées sur internet.

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques et la quantification des boues traitées par la station d'Ibn Ziad.

Tableau IV.1 : Production des boues (Avril 2018) [37]

Paramètres	Valeurs
Volumes des boues (m ³ /an)	136 38.59
Débit des boues (m ³ /j)	373.66
TS (g/L)	36.44
TVS (g/L)	16.56
TVS/TS (%)	45.44

II.2 Chaîne de traitement des boues par digestion anaérobie

Suivant les données regroupées dans le tableau précédant, et vu que la station comporte déjà un système d'épaississement et la partie déshydratation des boues par lit de séchage, nos calculs seront basés sur le dimensionnement du digesteur ainsi que la quantification du biogaz et l'énergie électrique qui peuvent être produite par ce biogaz.

La chaîne de traitement de boues de la STEP va être comme suit :

Epaisseurment ➡ Digesteur Anaérobie ➡ Déshydratation des boues

II.2.1 Dimensionnement de l'épaississeur

L'épaississement est la première étape, souvent incontournable, de la réduction de volume des boues extraites de la filière traitement des eaux. Il permet en effet d'optimiser les étapes suivantes de conditionnement, de stabilisation et de déshydratation en réduisant les tailles des ouvrages et les coûts d'exploitation. L'épaississement vise à augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue. Cet épaississement peut se faire simplement par voie gravitaire par des moyens mécaniques (égouttage ou flottation)[40].

Le tableau IV.2 présente les taux de chargement de solides typiques en fonction du type de boue à épaisir [41].

Tableau IV.2 : Taux de chargement des solides pour la conception d'épaisseurs gravitaires[41]

Source des boues	Type de boues	Taux de chargement des solides (Kg TS / m ² · j)
Primaire	-	90-150
Boues actives	Conventionnel	20-30
	Aération prolongée	25-40
Filtre anti-ruissellement	-	35-50
Boues mixtes	Boues primaires + boues activées	25-80
	Filtre primaire + ruissellement	<60

Pour l'étape de l'épauissement, les calculs de dimensionnement sont les suivants :

a) La surface requise pour l'installation d'un épaisseur

$$Surface = \frac{\text{Charge des solide (Kg TS/j)}}{\text{Taux de chargement des solides (Kg TS/m}^2 \cdot j)} \quad (1)$$

On suppose que la quantité d'eau après décantation dans l'épauissement est négligeable, donc :

D'après les caractéristiques du tableau IV.2, le taux de chargement des solides dans le cas de STEP d'ibn Ziad sera de 30 kg TS /m² ·j, donc :

*La Charge des solides :

$$1 \text{ litre} \longrightarrow 36.44 \text{ g TS}$$

$$1000 \text{ Litre (1m}^3) \text{ TS}=36440\text{g} \longrightarrow 36.44\text{Kg/L}$$

373.66 m³/j débit des boues, la charge des solides est égale à =13616.17 Kg TS/L

Dans ce cas-là:

*La surface requise : **Surface = 453.87m²***

b) Vérification de la charge hydraulique (hydraulicloading rate HLR)

La charge hydraulique est importante pour contrôler les temps de rétention excessifs, ce qui pourrait entraîner la libération d'odeurs nuisibles. Les taux de chargement allant de 20 à 30 m³ / m² · j sont généralement recommandés. Ces valeurs ne sont pas toujours atteintes avec le débit d'influent des boues, et le recyclage de l'effluent final vers l'épaississeur est généralement pratiqué pour augmenter le débit influent, diminuant ainsi le temps de rétention hydraulique. Cet incrément de débit ne nuit pas aux performances de l'épaississeur[41].

$$HLR = \frac{\text{Débit (m}^3 \text{ / j)}}{\text{Surface (m}^2\text{)}} \quad (2)$$

$$HLR = \frac{373.66}{453.87}$$

$$\mathbf{HRL = 0.82m^3/m^2.j}$$

Cette valeur est inférieure à la plage de 20–30 m³ / m² · j, recommandée pour éviter les conditions septiques dans l'épaississeur. En supposant un HLR de 20 m³ / m² · j, le débit suivant est nécessaire:

$$\text{Débit} = \text{HLR} \times \text{Surface} \quad (3)$$

$$\text{Débit} = 20 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{j} \times 453.87 \text{ m}^2 = \mathbf{9077.4m^3 / j}$$

Comme le débit de boue affluent disponible est de 373.66 m³ / j, **8703.74 m³ / j** supplémentaires (= 9077.4–373.66) de débit recyclé d'effluent final sont nécessaires pour augmenter le HLR.

c) Dimensionnement

On a 2 bassins = 2

Surface d'un bassin = surface total/2

Surface d'un bassin = 453.87m²/2

Surface d'un bassin = 226.935m²

$$D = \sqrt{\frac{4 * \text{Surface}}{\pi}} \quad (4)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 226.935}{\pi}}$$

$$\mathbf{D = 16.99m}$$

Profondeur des eaux latérales: H = 3,5 m (supposé)

Volume total des épaisseurs: $V = S \times H$

$$V = 453.87 \times 3.5$$

$$V_{\text{épaisseurs}} = 1588.54 \text{ m}^3$$

d) Vérification du temps de rétention hydraulique

Le temps de rétention hydraulique (HRT) est:

- ✓ Sans recirculation de l'effluent final:

$$\text{HRT} = V / Q \quad (5)$$

$$\text{HRT} = (1588.45 \text{ m}^3) / (373.66 \text{ m}^3 / \text{j})$$

$$\text{HRT} = 4.25 \text{ j} = 102.03 \text{ heures}$$

- ✓ Avec recirculation des effluents finaux:

$$\text{HRT} = (1588.45 \text{ m}^3) / (9077.4 \text{ m}^3 / \text{j})$$

$$\text{HRT} = 0.175 \text{ j} = 4.2 \text{ heures}$$

II.2.2 Dimensionnement du digesteur anaérobie

Pour le traitement des boues par digestion anaérobie, un réacteur agité en continu (continuous stirred-tank reactor CSTR) en phase mésophile (35°C) était choisi dans cette étude.

*Vu le manque de quelques paramètres nécessaires pour le dimensionnement du digesteur, on a utilisé des valeurs recommandées de la littérature.

Tableau IV.3 : Paramètres de conception typiques pour les digesteurs de boues anaérobies[41]

Paramètres	Valeurs typiques
Temps de rétention (θ_c) (j)	18–25
Charge organique volumétrique (Kg VS / $\text{m}^3 \cdot \text{j}$)	0.8–1.6
Charge volumétrique totale des solides (Kg SS / $\text{m}^3 \cdot \text{j}$)	1.0–2.0
Fraction de solides volatils dans les boues brutes (%)	70–80
Efficacité de la réduction des solides totaux (% TS)	30–35
Efficacité de la réduction des solides volatils (% VS)	40–65
Production de gaz ($\text{m}^3 / \text{Kg VS dégradé}$)	0.8–1.1
Pouvoir calorifique du gaz (MJ / m^3)	23.3
Production de boues digérées (g TS / habitant · jour)	38–50
Consommation de gaz (L / habitant · jour)	20–30
Pouvoir calorifique des boues brutes (MJ / Kg TS)	15–25

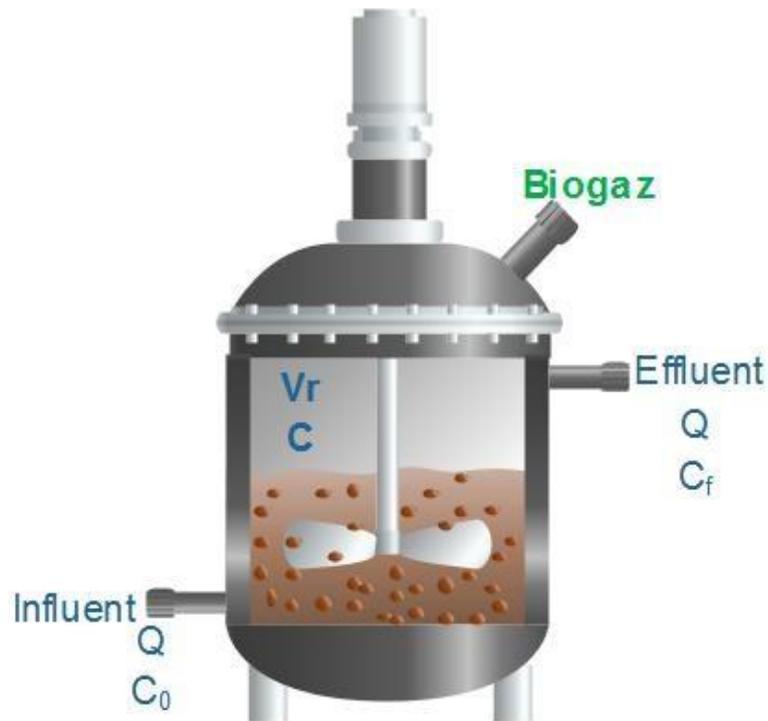


Figure IV.2. Schémas d'un bioréacteur CSTR

a) Volume du digesteur

Les paramètres de conception:

- Taux de charge des solides volatils (supposé, tableau IV.3): $1.6 \text{ kg VS} / \text{m}^3 \cdot \text{j}$
- Volume réservé au biogaz dans le digesteur: 15% du volume nécessaire à la digestion

$$\text{Débit des solides volatils} = \text{Charge des solides (Kg TS/j)} \times (\text{VS/TS}) \quad (6)$$

$$\text{Débit des solides volatils} = 13616.17 \times 0.45$$

$$\text{Débit des solides volatils} = 6127.27 \text{ Kg VS} / \text{j}$$

Volume des digesteurs :

La charge organique volumique d'après le tableau IV.3 = 0.8-1.6 (on prend $1 \text{ (Kg VS/m}^3 \cdot \text{j)}$).

$$V = \frac{\text{Débit d'influent en VS (kgVS / j)}}{\text{Charge organique volumique (Kg VS/m}^3 \cdot \text{j)}} \quad (7)$$

$$V = \frac{6127.27}{1}$$

$$V = 6127.27 \text{ m}^3$$

Volume réservé pour l'accumulation de biogaz:

$$V' = V \times 0,15 \quad (8)$$

$$V' = 6127.27 \times 0.15 \text{ m}^3$$

$$V' = \mathbf{919.09 \text{ m}^3}$$

Volume total du digesteur: $V + V' = 6127.27 + 919.09$

$$V_{\text{digesteur}} = \mathbf{7046.36 \text{ m}^3}$$

b) Temps de rétention hydraulique

Temps de rétention hydraulique est calculé par l'équation :

$$t = \theta_c = \frac{V}{Q} \quad (9)$$

$$t = \theta_c = 7046.36 \text{ m}^3 / 373.66 \text{ m}^3 / \text{j}$$

$$t = \theta_c = \mathbf{18.85 \text{ jours}}$$

*Une évaluation économique des coûts de construction des digesteurs de boues peut suggérer des taux de chargement de solides volatils plus élevés, ce qui réduirait le temps de rétention à moins de 25 jours.

c) Débit de boues d'effluent du digesteur

$$\text{Influent TS} = 13616.17 \text{ Kg TS} / \text{j}$$

$$\text{Influent VS} = (\text{VS} / \text{TS}) \times \text{Influent TS} \quad (10)$$

$$\mathbf{\text{Influent VS} = 6127.27 \text{ Kg VS} / \text{j}}$$

$$\text{Influent FS} = (1 - \text{VS} / \text{TS}) \times \text{Influent TS} \quad (11)$$

$$\mathbf{\text{Influent FS} = 7488.89 \text{ Kg FS} / \text{j}}$$

FS (solides fixes) ne change pas, mais le VS est partiellement éliminé pendant la digestion. Selon le tableau IV.3, l'efficacité d'élimination du VS est comprise entre 40% et 55%. En supposant une efficacité d'élimination de 65% (0,65) VS, la distribution des solides de l'effluent provenant des digesteurs de boues primaires peut être estimée comme suit:

$$\text{Effluent FS} = \text{Influent FS} = 7488.89 \text{ Kg FS} / \text{j}$$

$$\text{Effluent VS} = (1 - \text{Efficacité d'élimination des VS}) \times \text{VS Influent} \quad (12)$$

$$\mathbf{\text{Effluent VS} = 2144.54 \text{ Kg VS} / \text{j}}$$

$$\text{Effluent TS} = \text{Effluent FS} + \text{Effluent VS} \quad (13)$$

$$\text{Effluent TS} = 9633.43 \text{ KgTS} / \text{j}$$

*Les valeurs de débit de boue pour l'effluent et l'influent du digesteur sont égales, donc :

$$\text{Débit de boue d'effluent} = \text{Débit de boue d'influent} = 373.66 \text{ m}^3 / \text{j}$$

La concentration de TS dans l'effluent des digesteurs de boues est:

$$\begin{aligned} TS_{cons} &= \frac{\text{Effluent TS (KgTS/j)}}{\text{Débit de Boues (m}^3 / \text{j)}} \\ TS_{cons} &= \frac{9633.43 \text{ KgTS/j} \times 1000 \text{ g/kg}}{373.66 \text{ m}^3 / \text{j}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$TS_{cons} = TS_{cons} = 25781.27 \text{ g/m}^3 = 25.78 \text{ g/L}$$

d) Bilan thermique du digesteur

Pouvoir calorifique des boues brutes: 25 MJ / Kg TS (supposé, tableau IV.3)

Pouvoir calorifique des boues digérées: 15 MJ / Kg TS (supposé, tableau IV.3)

Production de biogaz: 0,8 m³/kg VS dégradé (supposé, tableau IV.3)

Puissance calorifique du biogaz: 23,3 MJ/m³ (supposé, tableau IV.3)

➤ **Volume de biogaz**

$$\text{Volume de biogaz} = \text{Effluent VS (kg VS/j)} \times \text{Production de biogaz (m}^3 / \text{kg VS dégradé)} \quad (15)$$

$$\text{Le volume de Biogaz} = 2144.54 \text{ kg VS} / \text{j} \times 0,8 \text{ m}^3 / \text{Kg VS}$$

$$\text{Le volume de Biogaz} = 1715.63 \text{ m}^3 / \text{j}$$

Donc pour stocker le biogaz produit, on aura besoin d'un réservoir ou un système de stockage de gaz (exemple figure IV.3) d'un volume 5 plus [30] la production journalière de biogaz soit :

$$V_{\text{stockage de biogaz}} = 8578.15 \text{ m}^3$$



Figure IV.3. Digestion avec stockage intégré du biogaz[42]

La consommation de gaz par habitant est dans l'intervalle de 20-30 (L / habitant · jour). Le volume de biogaz produit par cette installation peut servir au nombre d'habitants suivant :

$$30 \text{ L de biogaz} \longrightarrow 1 \text{ habitant /j}$$

$$V \text{ de biogaz}=1715.63\text{m}^3/\text{j} \longrightarrow N= 57 \ 187.66 \text{ habitant/j}$$

La composition typique du biogaz produit dans les digesteurs anaérobies est présentée dans le tableau IV.4

Tableau IV.4 Composition typique du biogaz généré dans les digesteurs anaérobies[43]

Gaz	% (volume / volume)
Méthane	62–70
Dioxyde de carbone	30–38
Sulfure d'hydrogène	50–3 000 ppm
Azote	0,05–1,0
Oxygène	0,022
Hydrogène	<0,01
Vapeur d'eau	<0,01

Avec un pourcentage de méthane de 65 %, le taux de génération de méthane à partir du biogaz dans des conditions mésophiles sera de:

$$V_{CH_4} = \text{Volume de biogaz m}^3 / \text{jour} \times \text{Pourcentage de méthane} \% \quad (16)$$

$$V_{CH_4} = 1715.63 \times 0.65$$

$$V_{CH_4} = 1115.16 \text{ m}^3 / \text{jour de CH}_4$$

➤ **Pouvoir calorifique des boues brutes entrant dans le digesteur**

$$= \text{Influent TS (Kg TS/j)} \times \text{Pouvoir calorifique des boues brutes (MJ/Kg TS)} \quad (17)$$

$$= 13616.17 \text{ kg TS} / \text{j} \times 25 \text{ MJ} / \text{Kg TS}$$

$$\text{Pouvoir calorifique des boues brutes entrant dans le digesteur} = 340404.25 \text{ MJ} / \text{j}$$

➤ **Pouvoir calorifique du biogaz**

$$= \text{Volume de biogaz (m}^3 / \text{j)} \times \text{pouvoir calorifique du biogaz (MJ/j)} \quad (18)$$

$$= 1715.63 \text{ m}^3 / \text{j} \times 23,30 \text{ MJ} / \text{m}^3$$

$$\text{Pouvoir calorifique du biogaz} = 39974.18 \text{ MJ} / \text{j}$$

➤ **Energie électrique du méthane**

D'après la littérature [23], La combustion de 1 m³ méthane (CH₄) à 25 °C libère une énergie de 35,315 MJ équivalente à 9,8 KWh à 100% d'efficacité, dans le cas de cette étude :

$$1 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4 \longrightarrow 9.8 \text{ KWh}$$

$$1115.16 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4 / \text{j} \longrightarrow \text{Puissance électrique} = 10\,928.59 \text{ KWh} / \text{j}$$

III. Température et bilan thermique

La température à l'intérieur des digesteurs anaérobies doit être maintenue près de 35 °C pour leur bon fonctionnement.

Le chauffage est nécessaire dans les climats froids pour compenser les pertes de chaleur à travers la surface externe des digesteurs et pour élever la température des boues brutes alimentées quotidiennement. Le biogaz peut être utilisé comme source de chaleur pour le chauffage du digesteur. Le biogaz est utilisé pour alimenter le four et chauffer la chaudière, le chauffage des boues étant indirectement réalisé par des échangeurs de chaleur. Dans la plupart des cas, le système est auto suffisante et aucune autre source de chauffage externe

complémentaire n'est requise, sauf en hiver dans les régions très froides. Une source de chauffage externe (par ex. Mazout) n'est nécessaire que pour le démarrage de l'unité[41].

La chaleur nécessaire pour maintenir les digesteurs anaérobies près de 35°C « digestion mésophile » est la chaleur nécessaire pour chauffer la boue brute entrante plus la chaleur nécessaire pour compenser les pertes de chaleur à travers les parois, la couverture et le fond du digesteur. Donc:

$$Q = M_f \times C_p \times \Delta T_1 + H$$

Où:

Q = demande énergétique quotidienne du digesteur de boue (KJ / j)

M_f = Débit de boues brutes introduites dans le digesteur (Kg / j)

C_p = chaleur spécifique de l'eau (KJ / Kg · °C)

ΔT_1 = différence entre la température des boues brutes et la température du digesteur (°C)

H = perte de chaleur à travers les parois du digesteur (KJ / d)

La perte de chaleur quotidienne à travers toute la surface du digesteur peut être déterminée

Par:

$$H=U \times S \times \Delta T_2 \times 86.4$$

Où:

U = coefficient de transfert de chaleur (J / s · m² ·

°C) S = surface du digesteur (m²)

ΔT_2 = différence entre la température intérieure du digesteur et la température extérieure (°C).

❖ **Débit de boue brute alimentée au digesteur (M_f)** : thermodynamiquement, une boue brute jusqu'à 6% de teneur en solides peut être considérée comme de l'eau, avec une densité de 1 kg / L et une chaleur spécifique (C_p) de 4,20 KJ / Kg · °C.

❖ **Différence de température ΔT** : varie selon les conditions climatiques du site.

- ❖ La température intérieure du digesteur doit rester entre $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ pour assurer les conditions de digestion mésophile.
- ❖ **Coefficient de transfert thermique U** : dépend du matériau utilisé pour construire la cuve du digesteur. La littérature donne des valeurs U de $2-3 \text{ J} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ pour les digesteurs bien isolés, alors que les digesteurs mal isolés peuvent avoir des valeurs U de $3-5 \text{ J} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.
- ❖ **Superficie du digesteur - S** : comprend les parois latérales, la couverture et la partie inférieure du réservoir du digesteur[41].

IV. L'épuration du biogaz

Comme il était présenté dans le tableau IV.4, le biogaz ne se compose pas seulement de méthane, mais d'un mélange de gaz qu'il faut les éliminer. L'épuration du biogaz consiste à éliminer du biogaz brut les substances indésirables et les traces de polluants (ammoniaque, éléments soufrés, minéraux...) et augmenter sa teneur en méthane (par retrait du CO_2 et autres composés gazeux) pour produire un gaz comparable au gaz naturel[44].

Chaque composant à plusieurs méthodes où procédés pour l'éliminer :

- ❖ **Eau – vapeur d'eau:**

- Condensation
- Adsorption
- Perméation

- ❖ **Oxygène :**

- Perméation
- Dé-oxydation catalytique

- ❖ **Composés soufrés:**

- Traitement en amont dans le digesteur (oxydation biologique, désulfuration physico-chimique...)
- Traitement en aval après digesteur : Charbon actif, lavages biologique, lavages à la soude, perméation...

Ces opérations d'épuration, si elles doivent être couplées, ne se font pas dans n'importe quel ordre. L'hydrogène sulfuré étant un poison pour les catalyseurs, la désulfuration devra

précéder la décarbonatation et la déshydratation. Il faudra alors désulfurer sur charbon actif, car le traitement à l'hydroxyde de fer s'effectue après décarbonatation. La compression est également une opération critique du conditionnement du biogaz avant son utilisation, notamment pour l'injection dans le réseau et la transformation en carburant. Il s'opère en une ou deux étapes qui s'intercalent elles-mêmes entre les étapes d'épuration. Le bon choix des matériaux constitutifs des compresseurs, ainsi que des canalisations, vannes,...,est évidemment primordial au regard des risques de corrosion[45].

V. Fonctionnement et contrôle des digesteurs de boues anaérobies

En ce qui concerne le fonctionnement des digesteurs de boues anaérobies, un bon fonctionnement peut être assuré lorsque les facteurs suivants sont pris en compte:

- ❖ Fréquence d'alimentation appropriée;
- ❖ Temps de rétention supérieur au taux de croissance des organismes méthanogènes;
- ❖ Bonnes conditions de fonctionnement du système de mélange, assurant l'homogénéité à l'intérieur du réservoir du digesteur[24].

VI. Résumé des résultats

Le tableau et la figure suivante résume à la fin les résultats du dimensionnement de l'installation de la digestion anaérobie proposé pour la station d'épuration d'Ibn Ziad situé à Constantine.

Pour la déshydratation des boues, la station comporte déjà 24 lits de séchage qui peuvent être utilisés pour la déshydrations finale des boues dégradées, comme on peut valoriser ces boues dans l'épandage et l'agriculture.

Tableau IV. 5 : paramètres de conception des digesteurs de boues anaérobies

Paramètres	Valeurs
Epaississement	
Surface de l'épaississeur (m ²)	453.87
La charge hydraulique (m ³ /m ² . j)	0.82
Surface d'un bassin (m ²)	226.935
Diamètre (m)	16.99
Volume total des épaisseurs (m ³)	1588.54
Temps de rétention hydraulique (sans recirculation) (heurs)	102.03
Temps de rétention hydraulique (avec recirculation) (heurs)	4.2
Digester Anaérobie	
Volume de digesteur (m ³)	6127.27
Volume réservé pour l'accumulation de biogaz (m ³)	919.09
Volume total du digesteur (m ³)	7046.36
Le temps de rétention hydraulique (Jours)	18.85
Influent VS (Kg VS/j)	6127.27
Effluent VS (Kg VS/j)	2144.54
Effluent TS (Kg TS/j)	9633.43
La concentration de TS du l'effluent finale (g/L)	25.75
Volume du biogaz (m ³ /j)	1715.63
Volume de stockage du biogaz (m ³)	8578.15
Volume du méthane (m ³ /j)	1115.16
Pouvoir calorifique du biogaz (MJ/j)	39974.18
Puissance électrique (KWh/j)	10928.59

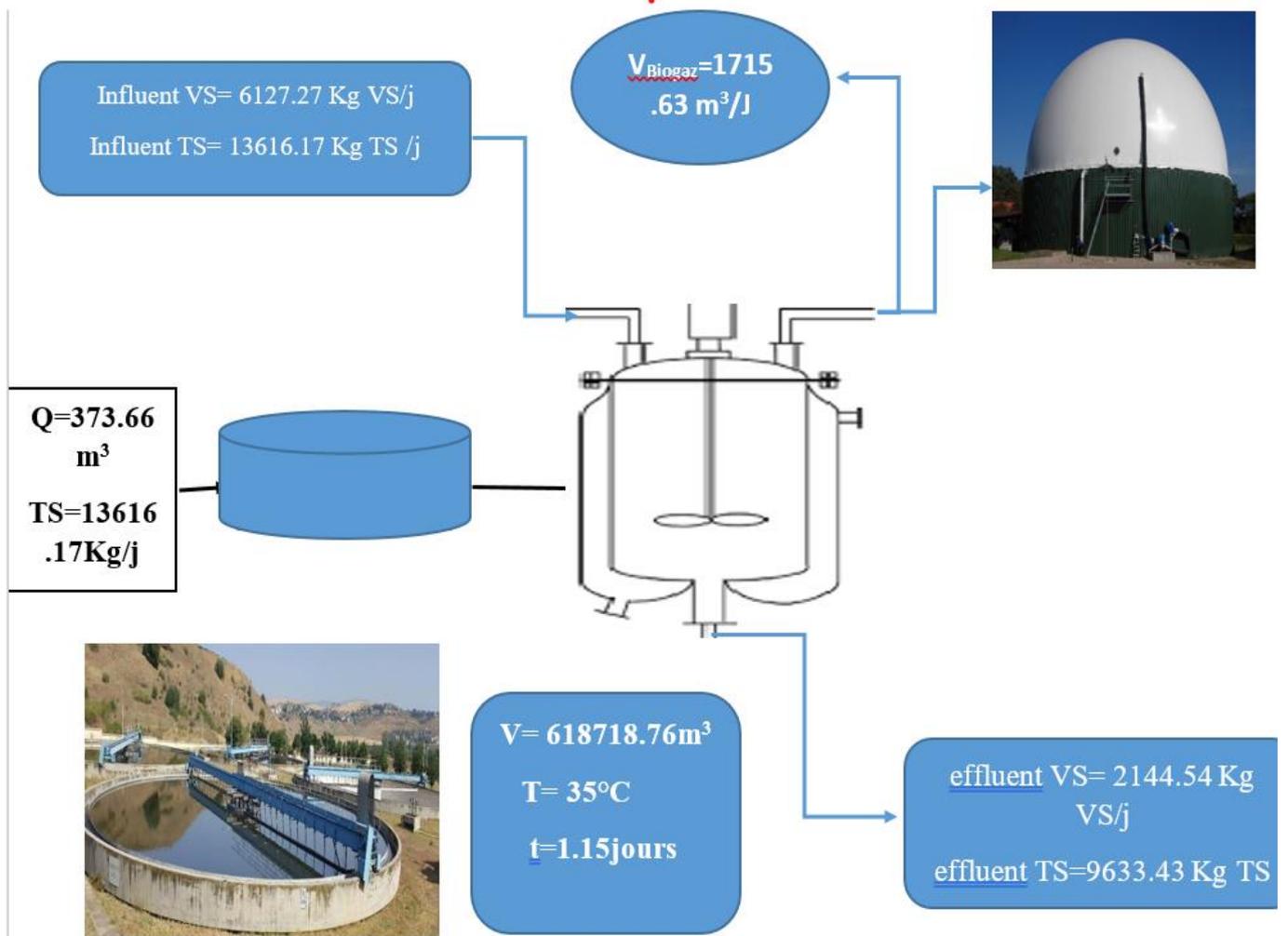


Figure IV.4 Schémas du traitement des boues de STEP par digestion anaérobie

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La digestion anaérobie est largement considérée comme un traitement écologique et figure dans la liste des technologies vertes pour divers déchets organiques, y compris les boues d'épuration. Bien que la mise en œuvre de la digestion anaérobie comme méthode alternative de traitement des boues d'épuration puisse être observée dans de nombreux pays développés, en Algérie cette technologie reste rare à être appliquée dans les stations d'épuration.

Dans cette étude, nous avons choisi comme zone d'étude la STEP Ibn Ziad qui se situe à Constantine, cette ville, qui connaît une importante croissance démographique, est accompagnée par une augmentation des quantités de boues rejetées. Parmi les solutions, il est recommandé de prévoir, au niveau de la STEP d'Ibn Ziad l'installation d'un digesteur anaérobie nécessaire pour la production d'un biogaz pour une utilisation selon le type et le choix de la valorisation.

La chaîne de traitement proposée dans cette étude est : l'épaississement des boues dans deux bassins d'un volume total de 1588.54 m^3 suivie d'un réacteur anaérobie agité en continu d'un volume de 6127.27 m^3 , et un stockage de biogaz d'un volume de 8578.15 m^3 .

Cette installation va pouvoir réduire la concentration des solides totaux à la fin de 30 % (de 36.44 g/L à 25.44 g/L), et une réduction des VS de 65 %, avec une production journalière de biogaz de 1715.63 m^3 , cette quantité peut servir à 57187.66 habitant par jour ; le pourcentage de méthane était supposé 65 % du volume total du biogaz, soit un pouvoir calorifique de 39974.18 MJ/j , et une puissance électrique de 10928.59 kWh/j ; ces valeurs sont très encourageantes pour valoriser les boues de la STEP d'Ibn Ziad par un traitement anaérobie, et un prétraitement des boues avant le traitement biologique peut augmenter les performances de ce réacteur (Ex : améliorer la production de biogaz, l'élimination de la matière organique, ..etc.) Comme exemple un prétraitement thermique, chimique, etc.

Une étude expérimentale sur un réacteur CSTR au laboratoire sera recommandée pour pouvoir étudier plusieurs paramètres qui peuvent renforcer la conception et l'exploitation des bioréacteurs anaérobies.

**Références
Bibliographiques**

Références Bibliographiques

- [1] S. D. Strauss, “Wastewater Management.,” *Power*, vol. 130, no. 6, 1986.
- [2] A. Rhoujjati, Y. Bissi, and Y. Bissi, “Valorisation des boues de la station d’épuration de la ville de Marrakech” *Urac* pp 42., 2011–2012, 2012.
- [3] M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, and D. Brdjanovic, *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. 2008.
- [4] H. Djeddi, “Utilisation des eaux d’une station d’épuration pour l’irrigation des essences forestières urbaines.,” p. 144, 2007.
- [5] 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,” Université MONTPELLIER II Formation, 2005.
- [6] J. B. Angeli, “Etude de faisabilité de la micro-méthanisation par co-digestion à l’échelle des quartiers,” *Génie des procédés*. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2019.
- [7] S. P. FABIEL, “Etude de la biodégradabilité de boues secondaires soumises à un traitement thermique à 65°C et du couplage digestion anaérobie et digestion thermophile aérobie pour la réduction de boues,” L’institut national des sciences appliquées de TOULOUSE, 2006.
- [8] K. R. Effebe, “Lagunage anaérobie: modélisation combinant la decantation primaire et la dégradation anaérobie,” Université de Liège Campus d’ARLON, 2009.
- [9] M. ROUIZ, “Dégradation anaérobie de déchets solides : caractérisation , facteurs d’influence et modélisations,” L’institut national des sciences appliquées de LYON, 2008.
- [10] N. Seghairi, L. Mimeche, A. Bouzid, and Y. Ayachi, “Traitement des eaux usées par coagulation-floculation en utilisant le sulfate d’aluminium comme coagulant treatment of wastewater by coagulation-flocculation using aluminum sulfate as coagulant,” *J. Wat. Env. Sci. Vol.*, vol. 1, no. 2, pp. 230–234, 2017.
- [11] R. GOURDON, “Aide à la définition des déchets dits biodégradables ,fermentescibles, méthanisables, compostables,” 2002.
- [12] A. MOTTET, “Recherche d’indicateurs de biodégradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile : Application aux boues secondaires d’épuration non traitées et prétraitées thermiquement,” Université MONTPELLIER II, 2009.
- [13] H. Fisgativa, “Etude de l’impact d’un prétraitement aérobie sur la digestion anaérobie

- de déchets,” Université DE RENNES 1, 2016.
- [14] Kerroum DERBAL, “Digestion anaerobie des dechets solides melanges avec les boues de station d’épuration -,” University Mentouri Constantine, 2009.
- [15] Anaëlle Pony, “Parcours Hydrologie-Hydrogéologie Estimation de performances épuratoires : Caractérisation de boues de station d ’ épuration,” Université Pierre et Marie Curie, 2009.
- [16] João Alberto Lima Amarante, “Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux – Technologies disponibles et enjeux pour le Québec,” Université de SHERBROOKE Sherbrooke, 2010.
- [17] “Caractérisation des boues/classification - Degremont®.” [Online]. Available: <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/quelles-eaux-a-traiter-pourquoi/les-boues/caracterisation-des-boues-classification>. [Accessed: 22-Jul-2020].
- [18] A.-L. REVERDY, J.-C. BAUDEZ, and E. DIEUDE-FAUVEL, “La digestion anaérobie des boues de stations d’épuration urbaines,” irstea, 2011.
- [19] BIOEXELL, “Biogas from AD - BIOEXELL Training Manual,” 2008.
- [20] M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, and D. Brdjanovic, *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design*. IWA Publishing, 2015.
- [21] M. G. J. Claude, “Co-méthanisation des déchets fermiers et alimentaires : expérimentation et modélisation,” Sciences agricoles. Université de la Réunion, 2012.
- [22] Jean El Achkar, “Méthanisation de marc de raisin . Caractérisation et optimisation du procédé et des prétraitements .,” Génie des procédés. Université de Bretagne Sud, 2018.
- [23] Emmanuel ADLER, “La méthanisation: Comment se transforme la matière organique en énergie ?,” nce de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie, 2011.
- [24] P. Njampou, “Dimensionnement D’Une D’Une Installation De Biomethanisation,” Institut international d’ingénierie de l’eau et de l’environnement, 2011.
- [25] R. PHILIP, “La problématique risques et méthodologies opérationnelles des unités de méthanisation, tant agricoles, risques diffus, qu’industrielles,” L’école nationale supérieure des officiers de Sapeurs-Pompiers, 2017.
- [26] J. Hess, “Valorisation qualité biogaz par fermenteur méthanogène et stratégie de régulation,” Université de NICE - SOPHIA ANTIPOLIS – UFR SCIENCES École, 2007.
- [27] G. Capson Tojo, “Valorisation des biodéchets alimentaires commerciaux par des

- procédés anaérobies,” Université de Montpellier, 2017.
- [28] J. Hess, “Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation,” Université de NICE -SOPHIA ANTIPOLIS – UFR SCIENCES École, 2007.
- [29] P. Buffiere, R. Bayard, and P. Germain, “Freins et développements de la filière biogaz: les besoins en recherche et développement,” n°07-0418/, 2009.
- [30] J. Laloe, “Méthanisation des Boues de Station d’Epuración Potentiel Réunionnais,” Agence Régionale de l’Energie Réunion, 2003.
- [31] “Biométhanisation - www.fermedewarelles.be.” [Online]. Available: <http://www.fermedewarelles.be/299431885>. [Accessed: 17-Jul-2020].
- [32] S. Mahamadi, “Sortie dans la Station d’épurations des eaux usées Ibn Ziad.”
- [33] “Oued Rhumel - Google Maps.” [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/place/Oued+Rhumel/> [Accessed: 05-Aug-2020].
- [34] A. H. Tuteur, “L ’ assainissement à Constantine: du réseau de collecte jusqu ’ à la station d ’ épuration,” 2018.
- [35] H. Z. Badaoui Ahmed El Mouhab, “Approche comparative de la qualité des eaux usées de deux collecteurs dans la zone de Hamma Bouziane à Constantine, pour les deux périodes 2016 et 2019.,” Université des Frères Mentouri Constantine Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, 2019.
- [36] A. Boulahrouf, H. Bousseboua, and A. Hamidechi, “Mémoire par le microbiote des effluents d ’ entrée et de sortie,” 2011.
- [37] D. Madjeda and B. Haoua, “Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux brutes et traitées des stations d ’ épuration Ibn Ziad (Constantine) et Ferdjioua (Mila),” Université des Frères Mentouri Constantine Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, 2018.
- [38] A. Hanene, “L ’ assainissement à Constantine: du réseau de collecte jusqu ’ à la station d ’ épuration,” institut de technologie Bouira, 2018.
- [39] G. Silvestre, B. Fernández, and A. Bonmatí, “Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 101, pp. 255–262, 2015.
- [40] “Epaississement.”[Online]. Available: <https://www.emo-france.com/produits/epaississement/>. [Accessed: 24-Aug-2020].
- [41] M. von S. and F. F. Cleveron Vitorio Andreoli, *Sludge Treatment and Disposal.*, IWA

- Publis., vol. 1, no. 2 /3. London: IWA Publishing, 2007.
- [42] G. B. Watts and H. Bordeaux, “Le Coeur de la digestion anaérobie,” *Books Abroad*, 1934. [Online]. Available: <https://geotexia.wordpress.com/le-coeur-de-la-digestion/>. [Accessed: 25-Aug-2020].
- [43] S. K. Khanal, “Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications,” *Anaerob. Biotechnol. Bioenergy Prod. Princ. Appl.*, pp. 1–301, 2009.
- [44] ADEME, “Principes et procédés d’épuration du biométhane pour l’ injection dans les réseaux de gaz naturel,” *Rapp. Phase Faisabilité du Proj. d’injection*, pp. 1–12, 2011.
- [45] S. Rennela, S. Evanno, and A. Paillart, “Mise au point d ’un réacteur pilote de méthanisation de 5,” Programme DRA-DRC-93 « Risques liés aux procédés de méthanisation de la biomasse et des déchets », opération B, 2010.

Résumé

La valorisation énergétique par digestion anaérobie des boues issues des procédés épuratoire génère un biogaz, il contient du méthane qui a un pouvoir calorifique important et considéré comme un combustible très intéressant pouvant se substituer au gaz naturel du fait qu'il est valorisable dans plusieurs applications énergétiques comme la production de chaleur, de l'électricité, et carburant automobile. La digestion anaérobie est aujourd'hui l'un des moyens les plus performants pour dépolluer les eaux usées. Sa capacité à transformer les polluants en biogaz offre de plus un intérêt écologique et énergétique non-négligeable puisqu'elle s'inscrit actuellement dans les sources d'énergies renouvelables.

Les installations de traitement anaérobie en vue de la valorisation des boues des stations d'épuration sont rares en Algérie, l'objectif de ce travail est de dimensionner un digesteur anaérobie comme une seconde solution de traitement des boues de la station d'épuration d'Ibn Ziad vu que le traitement actuel est par séchage à lits de boues, et démontré l'efficacité et l'énergie qui sera produite par le procédé anaérobie.

***Mots Clés :** Digestion anaérobie, boue, STEP, biogaz, énergie.*

Abstract

Energy recovery by anaerobic digestion of sludge from purification processes generates biogas, it contains methane which has a high calorific value and is considered a very interesting fuel that can replace natural gas because it can be recovered in several energy applications, such as the production of heat, electricity, and automotive fuel. Anaerobic digestion is one of the most efficient ways to clean up wastewater today. This ability to transform pollutants into biogas is also of significant ecological and energy interest since it is currently part of renewable energy sources.

Anaerobic treatment facilities for the recovery of sludge from wastewater treatment plants are rare in Algeria, the objective of this work is to size an anaerobic digester as a second treatment solution for sludge from the wastewater treatment plant Ibn Ziad saw that the current treatment is by sizing in sludge beds, and demonstrated the efficiency and energy that will be produced by the anaerobic process.

***Keywords:** Anaerobic digestion, sludge, WWTP, biogas, energy.*