République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE d'ADRAR

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

Thème

L'effet de prétraitement chimique alcalin par KOH sur la production du biogaz à partir des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar

Soutenu le : 01/06/2017

Présenté par :	**Membres de jury** :
Mr: MLOUKI Ismail	**Président** : Mr Habchi Abdelmadjid
Mr: AISSAOUI Abdelkrim	MAà Univ d'Adrar
Encadreur : Mr DAHOU Mohamed El Amine	**Examinateur :** Mr. SLIMANI Said
MAà Univ d'Adrar	MAà Univ d'Adrar

Année Universitaire : 2016 / 2017

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant tous ces années d'études.

Le présent travail a été effectué au niveau du laboratoire pédagogique de la Faculté des Sciences et de la technologie de l'Université d'ADRAR. C'est un grand plaisir d'exprimer mes gratitudes à mon encadreur, Mr DAHOU de m'avoir fait confiance de mener à terme cette recherche sous sa direction;

À tous les membres de jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner et de juger ce travail ;

À tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de cette étude,

À tous les enseignants de la faculté des sciences et de la technologie de l'université d'ADRAR.

MLOUKI Ismail

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant tous ces années d'études.

Le présent travail a été effectué au niveau du laboratoire pédagogique de la Faculté des Sciences et de la technologie de l'Université d'ADRAR. C'est un grand plaisir d'exprimer mes gratitudes à mon encadreur, Mr DAHOU de m'avoir fait confiance de mener à terme cette recherche sous sa direction;

À tous les membres de jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner et de juger ce travail ;

À tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de cette étude,

À tous les enseignants de la faculté des sciences et de la technologie de l'université d'ADRAR.

AISSAAOUI Abdelkrim

Table des matières

Listes des figures

Listes des tableaux

Listes des abréviations

Introduction général……...……(1)

Chapitre I: Les déchet et leurs traitements

I.1 Définition des déchets ....…….…… (4)

I.2.Classement des déchets …….……...(4)

I.2.1 Les déchets ménagers et assimilés …….……(4)

I.2.2 Les déchets des collectivités locales …….(4)

I.2.3 Les déchets industriels……(5)

I.2.3.1. Les déchets industriels banals (DIB) ou non dangereux ……....(5)

I.2.3..2. Les déchets industriels spéciaux (DIS) ……..(5)

I.2.4 Les déchets hospitaliers (DH), déchets d'activité de soins (DAS) ou déchets infectieux …….…...(5)

I.2.5 Les déchets inertes (DI) …….(6)

I.2.6 Les déchets fermentescibles ……...(6)

I.2.7 Les déchets ultimes ……(6)

I.2.8 Les boues ……(7)

I .3.Types de traitement des déchets ……...(7)

I.3.1 Décharges ou centre de stockage des déchets……..……(7)

I.3.1.1 Définition …….(7)

I.3.1.2 Principes et aspects théoriques …….(8)

I.3.1.3 Les principales étapes de l'évolution des décharges ……(8)

I.3.1.4 Types de décharge ……(9)

I.3.2 L'incinération ……..…..(10)

I.3.2.1 But de l'incinération et théorie de base ……..……...…(10)

I.3.2.1.1. Séchage et dégazage ……..…….…....(11)

I.3.2.2. Pyrolyse et gazéification ……..……..…….....(11)

I.3.2.3. Oxydation ……..……..……...……..... (11)

I.3.3.Le recyclage ……..……...(11)

I.3.3.1.Aspects théoriques …….…..……..…….....(11)

I.3.4..Procédés biologiques de dégradations des déchets ..…….…….....(12)

I.3.4.1 Définition ……..……..……..…..…. (12)

I.3.4.2Traitements aérobies ou compostage…...…….…….…..... (12)

I.3.4.3.Traitements anaérobies et méthanisation……....(14)

I.3.4.3.1. Définition ……..…….. ……..(14)

Chapitre II :Méthanisation

II.1.Introduction…….……..…..(17)

II.2.Définition……...……..(17)

II.3Historique…….……..……..(18)

II.4Les étapes de la méthanisation……..... .(20)

II.4.1L'hydrolyse……..…….(20)

II.4.2L'acidogenèse……..…….……(20)

II.4.3L'acétogenèse……. …… ..(21)

II.4.4La méthanogenèse……..……. .(21)

II.5 Différents paramètres influençant la méthanisation……. ..(22)

II.5.1Température……...……..…...… ..(22)

II.5.2 pH…….…….. .(23)

II.5.3 Rapport C / N et Substances nutritive…….……. .(24)

II.5.4 Brassage……...…….…….…… .(25)

II.5.5 Pression partielle en hydrogène……...…….…..…(25)

II.5.6 Humidité…….……..... (25)

II.5.7 Temps de rétention hydraulique (TRH)……....……..… (25)

II.5.8 Absence de l'oxygène……..…….…..… (26)

II.5.9 Quantité de matière organique…….……...…… (26)

II.5.10.Absence des inhibiteurs……...……..……(27)

II.6 Les différents substrats les plus utilisés dans le procédé

de la méthanisation …….…....……..…...……..(28)

II.7 Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie…..…..... (29)

II.7.1 Les avantages……...…..…….. (29)

II7.2 Les inconvénients…….……(30)

II.8 Digesteur …….....(30)

II.8.1 Définition……...…….. (30)

II.8.2 Classification des différents types de digesteurs ……...…..(31)

II.8.2.1.- Le mode de l'alimentation……..... ...(31)

II.8.2.2. Classification selon le type de substrat ……..……....(33)

II.8.2.3. Classification selon le nombre d'étapes …… (33)

II.9 Biogaz …….…… ...(33)

II.9.1 Définition et sa composition……...……...… ...(33)

II.9.2 Propriétés du biogaz……...…… (35)

II.9.3 Valorisation du biogaz……...…..……...… (36)

II.9.3.1 La valorisation thermique……..…..….(36)

II.9.3.2 La production d'électricité à partir de Biogaz ……....……(36)

II.9.3.3. La production combinée de chaleur et d'électricité. ……...…....(37)

II.9.3.4. L'utilisation comme carburant pour les véhicules ou dans un réseau

de gaz naturel….……..…..…….…….....(37)

II.10. Conclusion……..……...…….. (38)

Chapitre III :Materiéls et méthodes

III.1 Origine et caractérisation du substrat utilisé ……...(40)

III.2 Prétraitement du substrat……...……..…(40)

III.3 Le cas étudié …….……...(41)

III.4 Description du digesteur et du dispositif utilisé ……..……(42)

III.5 Conditions du travail……...…….…….…..(43)

III.6 Méthodes d'analyses …….……..(44)

III.6.1 Détermination de la matière sèche (MS)……..…….……(44)

III.6.1.1 Matériels utilisés …….……...…….…….…(44)

III.6.1.2.Méthode …….……..(44)

III.6.2 Détermination de la teneur en matière organique (MO)…..……..…(45)

III.6.2.1 Matériels utilisés ……...…….…….(45)

III.6.2.2. Méthode …...……...……..(45)

III.7 Les paramètres suivis……..….....…...……..(46)

III.7.1 Le pH ……..…….....……(47)

III.7.1.1.Matériel .....(47)

III.7.1.2. Méthode……..…….……...…….(48)

III.7.2 Le volume de biogaz …….……...……...…….…(48)

III.7.2.1.Matériel ……..……..…….……..(48)

III.7.2.2. Méthode …..……..…...…….……..(49)

III.8L'inflammabilité du biogaz ……..……..(49)

III.9 La détermination du Titre Alcalimétrique Complet (TAC) …..…….(49)

III.9.1.Matériels utilisés …….…….……..……....(50)

III.9.2.Méthode ……..……..…….....(50)

III.10La détermination des Acides Gras Volatils (AGV) …....…….(51)

III.10.1. Matériels utilisés…..……...…..…..…….....(51)

III.10.2. Méthode …...……..…….…….…….……..(51)

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1. Caractérisation du substrat utilisé ……...…….…...(53)

IV.1. 1.Taux de la matière sèche……....……...……...(53)

IV.1. 2. Taux de la matière organique du substrat ……..……(53)

IV.2 Évolution des paramètres de fonctionnement ……...….....(54)

IV.2.1 Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 0% ……...…….……..……..(54)

IV.2.1.1 Évolution du pH…….…….…….(54)

IV.2.1.2 L'évolution des AGV…….…….…..…..(55)

IV.2.1.3 L'evolution de TAC……..……..(56)

IV.2.2.4 La variation du rapport AGV/TAC…….…(57)

IV.2.2.5 La production de biogaz……..(58)

IV.2.2 Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 1%..(59)

IV.2.2.1 Évolution du pH……..……....(59)

IV.2.2.2 L'évolution des AVG……..……(60)

IV.2.2.3 L'évolution de TAC……...……..(61)

IV.2.2.4 La variation du rapport AGV/TAC……...……..(62)

IV.2.2.5 La production de biogaz ……..……..…..(63)

IV.2.3. Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 5% ……..…..(64)

IV.2.3.1 Évolution du pH…….……(64)

IV.2.3.2 L'évolution des AGV…….….(65)

IV.2.3.3 L'évolution de TAC……(66)

IV.2.3.4 La variation du rapport AGV/TAC…….……(67)

IV.2.3.5 La production de biogaz …….……(68)

IV.2.4. Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 7.5% …….…….....……..….(69)

IV.2.4.1 Évolution du pH…….…….……..….(69)

IV.2.4.2 L'évolution des AGV…….……... (70)

IV.2.4.3 L'evolution de TAC……..…….…….(71)

IV.2.4.4 La variation du rapport AGV/TAC……..…….…..……..(72)

IV.2.4.5 La production de biogaz ……..……..(73)

IV.3 L'inflammabilité du biogaz ……...……...(74)

IV.4 La production totale de biogaz ……..……...(74)

Conclusion générale……..…..…….……...……...(75)

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Schéma de principe du procédé de traitement secondaire**…….……07**

Figure I.2 : évolution de compostage en température**…….……13**

Figure II.1 : Historique de la méthanisation **……...……..….19**

Figure II.2 : Taux de production de biogaz en fonction de la température**…….23**

Figure II.3 : Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie**…….……..…...26**

Figure II.4 : Différentes formes de digesteurs**……31**

Figure II.5 : Les types de digesteur selon Le mode de l'alimentation**……32**

Figure III. 1 : le substrat utilisé……40

Figure III.2 : le substrat après prétraitement (broyage et tamisage) …….41

Figure III.3 : le substrat après prétraitement chimique par KOH**…….42**

Figure III 4 : schéma du dispositif de fermentation utilisé. **……..43**

Figure III.5 : Photo des réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C**……...……43**

Figure III.6 : Photo de l'étuve utilisée**……....44**

Figure III.7 : Photo du four à moufle**……46**

Figure III.8 : pH-mètre utilisé**……....47**

Figure III.9 : Dispositif de mesure du volume du biogaz produit**……... 48**

Figure III.10: Teste d'inflammabilité du biogaz produit**…….……..49**

Figure IV.1 : l'évolution du pH dans le digesteur 0%. **……..54**

Figure IV.2 : l'évolution des AVG dans le digesteur 0%**.....55**

Figure IV.3 : l'évolution des TAC dans le digesteur 0%**.....56**

Figure IV.4 : la variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur 0%**.....57**

Figure IV.5 : l'évolution du biogaz dans le digesteur 0%. **……..….58**

Figure IV.6 : l'évolution du pH dans le digesteur 1%. **……..59**

Figure IV.7 : l'évolution des AVG dans le digesteur 1%**.....60**

Figure IV.8: l'évolution des TAC dans le digesteur 1%.....**61**

Figure IV.9 : la variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur 1%.....**62**

Figure IV.10 : l'évolution du biogaz dans le digesteur 1%.....**63**

Figure IV.11 : l'évolution du pH dans le digesteur 5%.....**64**

Figure IV.12 : l'évolution des AVG dans le digesteur 5%.....**65**

Figure IV.13 : l'évolution des TAC dans le digesteur 5%.....**66**

Figure IV.14 : la variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur 5%.....**67**

Figure IV.15 : l'évolution du biogaz dans le digesteur 5%.....**68**

Figure IV.16 : l'évolution du pH dans le digesteur 7.5%..... **69**

Figure IV.17: l'évolution des AVG dans le digesteur 7.5%.....**70**

Figure IV.18 : l'évolution des TAC dans le digesteur 7.5%.....**71**

Figure IV.19 : la variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur 7.5%.....**72**

Figure IV.20 : l'évolution du biogaz dans le digesteur 7.5%.....**73**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Concentrations en cations provenant la stimulation ou l'inhibition de la méthanisation**…….28**

Tableau II.2 : Principaux composés autres que CH_4 présents dans le biogaz et leurs effets**……..34**

Tableau II.3 : Comparaison du biogaz selon ses origines**……..35**

Tableau IV.1: Taux de la matière sèche du substrat**……..53**

Tableau IV 2: Taux de la matière organique du substrat**……...53**

Tableau IV 3 : le suivi de l'inflammabilité du biogaz**. 74**

Tableau IV 4 : le volume total de biogaz**……...74**

Liste des abréviations

DMA Les déchets ménagers et assimilés**.**

DIB Les déchets industriels banals**.**

DIS Les déchets industriels spéciaux

% pourcentage.

J-C Jésus-Christ

(C.I.N.C)congrès international de nomenclature chimique

(AGV) acides gras volatils

(AGLC) acides gras à longues chaînes

H_2Dihydrogène

CO_2 dioxyde de carbone

N'azote

C Le carbone

CH_4 méthane

HCO_3^- bicarbonate, ou hydrogénocarbonate

$CH_3CO_2^-$ acétate

H_2O l'eau.

ΔG l'enthalpie libre

APOH Obligate Hydrogen Producing Acetogens

°C Le degré Celsius

pH Le potentiel hydrogène

TRH Temps de rétention hydraulique

Mg magnesium

L litre

Na sodium

K potassium

Ca calcium

Kg kilogramme

P phosphate

HAP hydrocarbures aromatiques polycycliques.

PCB polychlorobiphényles

H_2S sulfure d'hydrogène

SO_2 dioxyde de soufre

H_2SO_4 L'acide sulfurique

Vol volume

O_2 oxygène

m^3 mettre cube

PCI pouvoir calorifique inferieure

PCS pouvoir calorifique supérieure

kWh kilowatt-heure

GNV gaz naturel de véhicules

T tonnes

an année

NH_3 ammoniac

m la masse

ml millilitre

KOH hydroxyde de potassium

MS matière sèche .

MO matière organique **.**

(A.O.A.C, 1990). Association of Official Agricultural Chemists .

(TAC) Titre Alcalimétrique Complet

INTRODUCTION GENERALE

En Algérie la pollution de l'eau, de l'air et des sols par les déchets municipaux, industriels et agricoles est en nette d'évolution de jour en jour. Plusieurs décharges sauvages sont apparues. Ceci génère des impacts négatifs directs sur l'environnement par la création des polluants et constitue des risques majeurs pour la santé de la population, cela pousse les gouvernements et les industries à rechercher des solutions technologiques permettant un traitement efficace et moins coûteux des déchets. Parmi les différentes solutions envisagées d'un coté en matière de traitement et valorisation des déchets organiques et d'un autre coté pour une production d'une énergie propre est le procédé de la méthanisation. Ce dernier fait aujourd'hui l'objet d'un fort regain d'intérêt, suite aux chocs pétroliers des années 70, la méthanisation s'est fortement développée en Europe. Ce procédé est considérée comme la technologie la plus avantageuse pour le traitement des déchets et capable d'apporter une réponse à une très grande partie des problèmes posés par les effluents organiques, tout en réduisant une partie importante de la charge organique polluante de ces déchets. Elle permet de valoriser les différents types de déchets (déchets urbains, boues d'épuration, déchets d'élevages et agricoles et déchets industriels) et de produire de l'énergie renouvelable sous forme de biogaz. C'est pour cela elle est présentée comme une solution miraculeuse qui s'intègre dans un cercle vertueux du développement durable.

Le but de notre travail c'est de donner une valeur énergétique à la biomasse, en étudiant l'effet de prétraitement chimique alcalin par KOH sur le rendement volumique de la digestion anaérobie des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar sous condition.

Ce travail est organisé en quatre chapitres, en plus d'une introduction et une conclusion générale, dont le premier chapitre constitue les déchets et leur traitement.

Le 2^{éme} chapitre est consacré pour la présentation de procédé de la digestion anaérobie, un historique de sa mise en ouvre est présenté. De plus une explication des différentes étapes de la digestion anaérobie à savoir l'hydrolyse, l'acidogène, l'acétogène et finalement la méthanogène est réalisée, avec en plus les populations bactériennes qui sont mise en jeu. De même, les principaux paramètres qui peuvent influencer le phénomène de la digestion anaérobie ainsi que les paramètres qui peuvent le contrôler sont présentés.

Le chapitre III présente le matériel utilisé dans la partie expérimentale, ainsi que les techniques et les méthodes employées pour le suivi opérationnel des digesteurs.

Dans le chapitre IV, on présente les résultats obtenus durant le suivi expérimental des différents digesteurs ainsi que leur interprétation.

À la fin, on termine par une conclusion générale, où seront rappelés les principaux résultats obtenus avec des recommandations.

CHAPITRE I: les déchets et leurs traitements

I.1 Définition des déchets

Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation il désigne toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.

Le rôle des définitions (et du vocabulaire) est particulièrement critique dans le domaine des déchets. Elles :

- favorisent ou limitent le phénomène de rejet par la population des unités detraitement correspondantes disposées dans leur voisinage,
- fixent les limites des domaines (matières premières, matières premières secondaires recyclage, déchets) et les réglementations respectives qui s'appliquent،
- permettent de définir des taxes sur des catégories de déchets spécifiques.
- orientent vers la filière d'élimination, et par conséquent les coûts de traitement,
- définissent la réglementation à respecter pour les transferts de déchets. [Bensmail, 2014]

I.2.Classement des déchets [Bensmail, 2014]

I.2.1 Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Cette catégorie recouvre les ordures ménagères, les déchets municipaux ou urbains, les résidus urbains (déchets de nettoiement).

Leur traitement relève de la responsabilité des municipalités qui peuvent en déléguer la responsabilité à des sociétés.

Le terme assimilé désigne les déchets des entreprises industrielles, des artisans, des commerçants, des écoles, des services publics, du secteur tertiaire et des hôpitaux qui présentent des caractéristiques physico-chimiques ou de toxicité équivalentes à celles des ordures ménagères.

Ceci permet de les envoyer vers les mêmes unités de traitement que les ordures ménagères.

I.2.2 Les déchets des collectivités locales

Ils englobent les boues des stations d'épuration, les matières de vidange, les déchets d'espaces verts, les résidus du nettoiement des rues, les papiers divers des locaux administratifs…etc.

I.2.3 Les déchets industriels

Les déchets industriels proviennent de l'industrie, du commerce, de l'artisanat et du transport.

Les déchets industriels toxiques doivent être traités avec beaucoup de précautions, tandis que ceux non toxiques peuvent être traités sans précautions particulières avec les ordures ménagères.

I.2.3 .1Les déchets industriels banals (DIB) ou non dangereux

Ils sont issus d'activités commerciales, artisanales, industrielles ou de service. Ils regroupent principalement les plastiques, les papiers-cartons, les textiles, le bois non traité, les métaux, les verres et matières organiques. Ils peuvent être éliminés avec les ordures ménagères ou dans des installations spécifiques, car rien ne contraint les municipalités à accepter de traiter les déchets industriels banals produits dans la commune. Ils se définissent comme non inertes et par opposition aux déchets industriels spéciaux : ils ne présentent pas le caractère toxique des déchets industriels spéciaux. [Domien ,2006]

I.2.3 .2.Les déchets industriels spéciaux (DIS)

Ils regroupent les déchets dangereux autres que les déchets dangereux des ménages et les déchets d'activité de soins à risques infectieux.

I.2.4 Les déchets hospitaliers (DH), déchets d'activité de soins (DAS) ou déchets infectieux

Ce sont les déchets spécifiques des activités de diagnostic, de suivi et de traitements préventifs et curatifs dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire, ainsi que des activités de recherche et d'enseignement associées et aussi de production industrielle.

Les déchets d'activité de soins à risques infectieux (DASRI) sont classés comme des déchets dangereux. Ces déchets doivent être séparés des autres déchets. Ils utilisent des emballages à usage unique avant l'enlèvement. Des durées maximales d'entreposage sont imposées. le transport de ces DAS répond aux exigences imposées aux matières dangereuses (conditionnement, étiquetage, classement par risques biologiques).

I.2.5 Les déchets inertes (DI)

Ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact. Ils ne nuisent aucunement à la santé humaine.

Les déchets inertes sont principalement constitués de déchets de chantier :déblais, gravats, déchets de démolition dépourvus de bois traités, d'amiante libre, de peinture, de goudron, de pyralène…etc.

Leur principale caractéristique est de pouvoir s'éliminer en décharge au coût de traitement le plus faible ou d'être réutilisables dans le secteur des travaux publiques comme matériaux de remblais ou en sous-couche routière.

I.2.6 Les déchets fermentescibles

Ils sont constitués de matières organiques biodégradables (tontes de gazon, épluchures de fruits et de légumes, déchets de viande, de charcuterie, les papiers et cartons, le bois et les textiles naturels). Les matières plastiques, bien que se décomposant à long terme, en sont exclues .

On définit aussi la fraction fermentescible des ordures ménagères comme étant les composés organiques biodégradables contenus dans les ordures ménagères.

I.2.7 Les déchets ultimes

Les opérations de traitement des déchets produisent de nouveaux déchets : les déchets de déchets en quelque sorte. Ceux-ci seront traités et fourniront encore d'autres déchets…Il arrive un moment où l'opération ne devient plus rentable et l'on obtient ainsi les déchets ultimes.

On peut dire rigoureusement : c'est un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par extraction de son caractère polluant ou dangereux. [Bensmail, 2014]

I.2.8 Les boues

Les boues se situent à la frontière des domaines respectifs des déchets solides et des eaux résiduaires. On les assimile généralement à des déchets solides. Ce sont des mélanges de solide et de liquide, dont la fraction solide est constituée de fines particules.

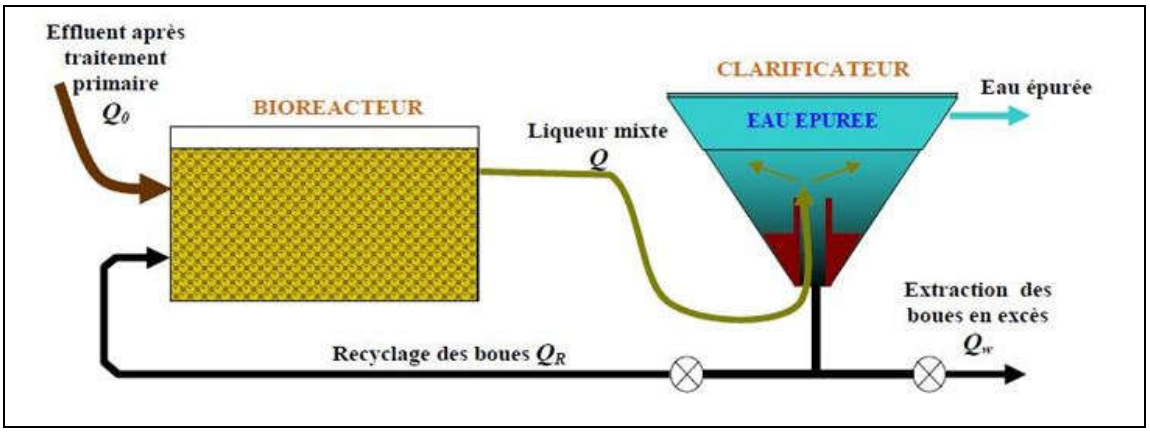

Figure I.1: Schéma de principe du procédé de traitement secondaire.

I .3.Types de traitement des déchets

I.3.1 Décharges ou centre de stockage des déchets

I.3.1.1 Définition

La décharge constitue un moyen de stockage « à terre » des déchets. La conception des décharges a progressivement évolué, des trous béants d'anciennes carrières qui se remplissaient progressivement de déchets sans précautions particulières, jusqu'à nos modernes centres d'enfouissement technique, devenus depuis quelques années centres de stockage des déchets.

Dans la hiérarchie du traitement des déchets (évitement, valorisation matière, valorisation énergétique, incinération sans production d'énergie, décharge), la décharge constitue le dernier maillon de la chaine. C'est pourquoi elle est théoriquement réservée aujourd'hui aux déchets ultimes.

Le fond de la cavité est constitué d'un matériau dont le degré d'imperméabilité est fonction du caractère plus au moins dangereux des déchets réceptionnés. Ce matériau étanche est soit une couche d'argile naturelle et compactée, voire le sol naturel si sa perméabilité hydraulique est suffisamment faible, soit une géo membrane recouverte ou non sur une oules deux faces d'un géotextile poreux (feutre, tissu) destiné à éviter les déchirures par frottements et à faciliter le drainage des lixiviats. La face supérieure est

en pente (2 à 3%) afin d'assurer un drainage des lixiviats vers des puits de collecte. Une couche de gravats sur une cinquantaine de centimètres assure l'interface entre la surface de drainage et les déchets afin de faciliter les écoulements. Ces gravats doivent été étalés par des véhicules légers afin de ne pas détériorer la géo membrane sous-jacente. [Bensmail, 2014]

Après un premier compactage, la décharge continue à se tasser en deux phases :

- Compression primaire : les matériaux se tassent sous l'effet de leur propre poids en se réorientant pour éliminer les espaces vides (première année surtout) ;
- Compression secondaire : tassements provoqués par l'écoulement des eaux (entrainement de fines particules vers le fond) et les vibrations d'une part, et par les réactions de décomposition biochimiques des déchets.

Les observations actuelles sur les sites montrent que ces tassements atteignent 10 à 25% de la hauteur initiale : ils doivent être pris en compte lors de la mise en place du réseau de drainage du biogaz.

I.3.1.2 Principes et aspects théoriques

La décharge est un très vaste réacteur biochimique où se retrouvent mélangés des millions de composés chimiques, organiques et minéraux, interagissant les uns avec les autres sous l'influence d'agents naturels (pluies, micro-organismes).

La durée de vie des décharges et des centres de stockage des déchets s'étend bien au-delà de leur date d'arrêt d'exploitation. La stabilisation des déchets, c'est-à dire leur évolution vers un état physico-chimique définitif et inaltérable, débute dés leur mise en place en décharge et se poursuit souvent pendant des décennies voire plus. Le plus grand soin doit donc être apporté afin que les pollutions susceptibles d'être générées dans le milieu environnant par la formation ou la décomposition des composés chimiques soient évitées ou compatibles avec l'équilibre du milieu naturel. Ce soin s'obtient en exploitation et en post exploitation sur trente ans.

I.3.1.3 Les principales étapes de l'évolution des décharges

- Les déchets solides commencent par se décomposer en présence d'air. Au moment où l'oxygène est épuisé, les micro-organismes facultatifs et anaérobies s'accroissent pour produire des acides volatils et du dioxyde de carbone. Le

- pH devient acide (4 à 5), ce qui a pour effet de solubiliser certains composants minéraux de la décharge. Ce pH acide est toxique à l'égard des bactéries méthanogènes, il n'y a pratiquement pas de méthane produit pendant cette période. La DCO est élevée ;
- Les bactéries méthanogènes entrent ensuite en action pour dégrader les acides volatils afin de produire du méthane. La proportion de méthane et de gaz carbonique varie suivant le type de déchet (proportion identique pour les composés cellulosiques, méthane prépondérant pour les protéines et les graisses). Le pH remonte pour devenir neutre, la DCO chute.

I.3.1.4 Types de décharge

Il existe trois classes de décharge, en fonction de la nature des déchets :

- Classe 1 : ce sont les déchets dangereux, qui sont essentiellement des déchets industriels.
- Classe 2 : ce sont les déchets ménagers et assimilés, c'est-à-dire :
  - les ordures ménagères ;
  - les déchets encombrants ;
  - les déchets d'emballages ménagers ;
  - les déchets dangereux des ménagers (produits phytosanitaires et d'entretien, piles, seringues, ….etc.) ;
  - certains déchets provenant d'industriels, d'artisans, de commerçants, écoles, services publics, …etc.
  - déchets de nettoiement (rues, marchés, manifestations publiques, …etc.)
  - déchets de l'assainissement collectif ;
  - les déchets verts ;
  - les déchets inertes comme certains gravats issus des chantiers, verre, briques, tuiles, céramiques, …etc.
- Classe 3 : les déchets inertes, qui se définissent comme des déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucun réaction chimique ou physique. Ils ne sont pas biodégradables et ne réagissent pas avec d'autres manières en provoquant des risques pour la santé et l'environnement.

I.3.2 L'incinération [Domien ,2006]

I.3.2.1 But de l'incinération et théorie de base

- L'incinération est utilisée comme un traitement pour un éventail très large de déchets. L'incinération en elle-même n'est couramment qu'une partie d'un système complexe de traitement des déchets qui, ensemble, assure une gestion d'ensemble du large éventail de déchets que la société génère.

Le secteur de l'incinération a connu un développement technologique rapide au cours des 10-15 dernières années. Beaucoup de ce changement a été motive par une législation spécifique à l'industrie et ceci a réduit, en particulier, les émissions dans l'air des installations individuelles. Le développement de processus continuel est en cours, avec le secteur développant maintenant des techniques qui limitent les coûts, tout en gardant ou en améliorant la performance environnementale.

L'objectif de l'incinération des déchets est de traiter les déchets de manière à réduire leur volume et dangerosité, tout en capturant (et donc en concentrant) ou en détruisant les substances potentiellement nocives qui sont, ou peuvent être, rejetées lors de l'incinération. Les processus d'incinération peuvent aussi fournir un moyen pour permettre le recyclage de l'énergie, de la teneur en minéraux et/ou éléments chimiques des déchets.

En fait, l'incinération des déchets est l'oxydation des matériaux combustibles contenus dans les déchets. Les déchets sont généralement des matériaux hautement hétérogènes, composé essentiellement de substances organiques, de minéraux, de métaux et d'eau. Lors de l'incinération, des gaz brûlés sont générés lesquels contiendront la majorité de l'énergie combustible disponible sous forme de chaleur.

Les substances organiques combustibles dans les déchets brûleront lorsqu'elles auront atteint la température d'inflammation nécessaire et seront rentrées en contact avec l'oxygène .

Le réel processus de combustion a lieu lors de la phase gazeuse en quelques secondes et rejette simultanément de l'énergie lorsque la valeur calorifique des déchets et l'apport en oxygène sont suffisantes ; ceci peut conduire à une réaction thermique en chaîne et une combustion autosuffisante, c'est-à-dire qu'il n'y a pas besoin d'ajouter d'autres carburants.

Les étapes principales du processus d'incinération sont :

a. Séchage et dégazage

Ici, le contenu volatil évolue (par ex. les hydrocarbures et eau) à des températures généralement situées entre 100 et 300 °C. Le processus de séchage et de dégazage n'ont pas besoin d'agents oxydants et dépendent seulement de la chaleur apportée.

b. Pyrolyse et gazéification

La pyrolyse est la décomposition supplémentaire des substances organiques en l'absence d'agent oxydant à environ 250 - 700 °C. La gazéification des résidus carbonés est la réaction des résidus avec la vapeur d'eau et le CO_2 à des températures, typiquement entre 500 – 1000 °C, mais peut se produire à des températures allant jusqu'à 1600 °C. Ainsi, la matière organique solide est transférée vers la phase gazeuse. En plus de la température, l'eau, la vapeur et l'oxygène supportent cette réaction

c. Oxydation

Les gaz combustibles créés lors des étapes précédentes sont oxydés, selon la méthode d'incinération choisie, à des températures de gaz brûlés généralement entre 800 et 1450 °C.

I.3.3.Le recyclage

Le recyclage est le procédé de traitement des déchets (déchets industriels ou ordures ménagères) qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui composaient un produit similaire arrivé en fin de vie. Son utilisation est devenue courante pour divers matériaux : le papier et le carton usagés sont réutilisés depuis le 18ème siècle pour faire du « papier recyclé », le verre est refondu, les métaux, les textiles, le caoutchouc et la majorité des plastiques sont recyclés avec une multitude de réutilisations possibles comme la création de vêtements par exemple.

Depuis 2008, les plastiques destinés aux contacts alimentaires peuvent également être réutilisés dans ce même domaine**.**

I.3.3.1.Aspects théoriques

Favoriser le recyclage des matériaux va permettre de limiter les dépôts de déchets polluants et les importations de matières premières. On note aussi les risques engendrés par un développement inconsidéré du recyclage.

C'est ce que dénonce M. Lassus (vice-président d'Europe et Environnement) qui s'inquiète :

- de la qualité des produits livrés aux consommateurs ;
- de la santé du personnel exploitant des installations non prévues initialement pour le recyclage ;
- du camouflage des produits toxiques pour de nouvelles utilisations.

I.3.4.Procédés biologiques de dégradations des déchets

I.3.4.1 Définition

Ces traitements s'appliquent à la matière organique biodégradable. Les micro-organismes vivent et prolifèrent sur les déchets organiques qu'ils assimilent en les décomposant.

L'application à des déchets non issus directement ou indirectement de la biomasse est plus rare car beaucoup plus lente.

La dégradation de la matière organique par des traitements biologiques avec valorisation de sous-produits obtenus tend à se développer au détriment de la combustion et de la mise en décharge. Elle se trouve favorisée par l'accroissement régulier du tri et la volonté politique de recycler les déchets.

Les produits obtenus, qu'ils soient solides (compost) ou gazeux (biogaz), présentent théoriquement une valeur marchande. Utilisés comme amendement, ils doivent répondre à des normes et s'insérer dans un marché. Quant au biogaz, il est soit injecté dans le réseau de gaz, soit brulé en chaudière pour fournir de la vapeur aux industriels du voisinage, soit destiné à alimenter un générateur électrique ou des véhicules.

La dégradation aérobie de la matière organique est réalisée par de nombreux micro-organismes différents ayant pour similitude le mode de respiration aérobie.

I.3.4.2Traitements aérobies ou compostage

Ces processus sont exploités dans les procédés de traitement biologique aérobie des déchets organiques. Ainsi lors du compostage, si celui-ci est réalisé dans des conditions non limitantes en eau et en oxygène, la dégradation de la matière organique suit trois phases successives, nommées phases mésophile, thermophile et de maturation, où l'on observe une très grande diversité de bactéries et de champignons. [Almansour, 2011]

Durant la première phase, les substrats les plus facilement biodégradables tels que les sucres libres, les amidons et les lipides sont métabolisés rapidement par des bactéries mésophiles et la température augmente (élévation fréquente de 30°C en 24h).

La seconde phase débute après 5 à 10 jours et correspond à la prédominance de micro-organismes thermophiles (principalement des bactéries), due aux températures élevées, jusqu'à plus de 70 °C. Durant cette étape, si la chaleur n'est pas évacuée, la limite supérieure de température acceptable par les bactéries thermophiles est dépassée et l'activité biologique est fortement diminuée.

Dans le cas contraire, cette phase est stable jusqu'à l'appauvrissement des substrats facilement disponibles (en particulier les protéines qui sont dégradées principalement lors de cette phase) entraînant une baisse de l'activité microbienne thermophile et par conséquent une baisse de la température. [Bobin. J.L, . al , 2005]

.

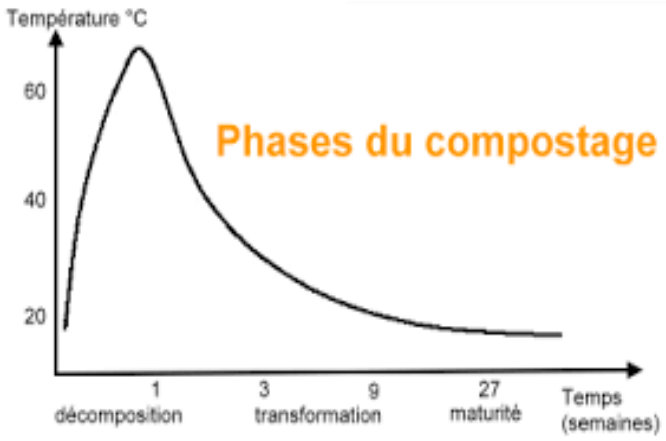

Figure I.2 : évolution de compostage en température.

Débute alors la phase de maturation où, de part les températures (< 35°C) et le faible taux de substrats simples, les principaux micro-organismes impliqués sont des actinomycètes et des champignons. Les composés récalcitrants à la dégradation lors des premières phases telles que la cellulose et la lignine, et plus généralement les complexes ligno-cellulosiques, sont dégradés lentement et ne sont minéralisés que partiellement.

En effet, durant cette étape appelée également phase de polymérisation, la matière organique réfractaire sous l'action des microorganismes se réorganise en molécules organiques complexes telles que les acides fulviques et humiques, précurseurs de l'humus, composé d'un ensemble de molécules organiques relativement stables. Les mécanismes de

dégradation de la lignine et de formation de l'humus sont encore incomplètement connus et différents modèles conceptuels ont été proposés pour décrire ces processus. Cette méconnaissance est essentiellement due à l'inexistence de méthodes d'isolement non destructrices de la lignine.

I.3.4.3.Traitements anaérobies et méthanisation

I.3.4.3.1.Définition

La digestion anaérobie est un procédé biologique permettant de valoriser des matières organiques en produisant une énergie renouvelable qui est le biogaz et un digestat utilisé comme fertilisant. [Boutouta, 2012]

En l'absence d'oxygène (digestion anaérobie), la matière organique est dégradée par l'action combinée de plusieurs types de micro-organismes. Une suite de réactions biologiques conduit à la formation de biogaz (composé majoritairement de méthane) et d'un digestat.

Le biogaz pourra être valorisé en électricité et en chaleur et le digestat sera épandu dans les champs agricoles comme engrais.

Les bactéries réalisant ces réactions se trouvent à l'état naturel dans les fumiers et les excrétas humains, il n'est donc pas nécessaire d'en ajouter, elles se développent naturellement dans un milieu sans oxygène dit anaérobie. Pour maximiser le rendement de ces réactions, la matière est placée à l'intérieur d'une grosse cuve (appelé digesteur ou méthaniseur) qui est fermée et brassée sans entrée d'air et à l'abri de la lumière. [Benyahia ,2012]

La majorité des installations de méthanisation à la ferme fonctionne à une température de l'ordre de 38°C (température dite mésophile).Une digestion thermophile (environ 60 °C) est également possible et permet une digestion plus rapide des substrats. Le pH dans le digesteur est maintenu entre 6,5 et 7,5. Un brassage régulier doit avoir lieu afin d'homogénéiser les substrats et de favoriser la production de biogaz.

La digestion anaérobie présente de nombreux avantages par rapport à la digestion aérobie :

- Le volume de boues non biodégradables produites est réduit d'un facteur cinq à dix ;
- La quantité de composants volatils est fortement réduite ;

- Le procédé induit une production de méthane gazeux (60 à 70% du biogaz) pouvant être récupéré et valorisé ;
- Le coût de production est plus faible car il est inutile d'oxygéner le système en mettant en marche des machines pour aérer ;
- Ce procédé permet de faire des traitements de charges organiques élevées (jusqu'à 80 kg de DCO par mètre cube de réacteur et par jour) ;
- Le taux d'épuration très élevé est de l'ordre de 80 à 98% ;
- Ce procédé peut traiter des effluents à teneurs limités en azote et en phosphore.

CHAPITRE II : méthanisation

II.1.Introduction

La méthanisation est un procédé biologique au cours duquel la matière organique est convertie en un gaz riche en méthane (biogaz). Parmi les technologies industrielles, les procédés de digestion par voie sèche (taux de matière sèche supérieur à 15 %) sont de plus en plus utilisés car ils présentent des avantages concurrentiels important par rapport aux procédés classiques par voie humide. Cependant, la nature très pâteuse du milieu de digestion lui confère des propriétés mal connues et non étudiées (comportement rhéologique, équilibres, transferts, cinétiques biologiques). Cette thèse comporte deux axes de recherche : i) la nature des équilibres chimiques (sorption, diffusion) intervenant dans les milieux de digestion, ii) la mise en place et l'application d'un modèle cinétique adapté à l'étude des milieux secs. Sur le premier volet, nous avons mis en évidence que le transfert diffusionnel est fortement réduit avec l'augmentation de la teneur en matière sèche des milieux en absence d'agitation. Une des conséquences est l'importance du transfert liquide-gaz pour la production de biogaz. Sur le deuxième volet, nous avons développé un modèle cinétique dédié qui nous a permis, par comparaison avec l'expérience, de mieux cerner la variabilité de la cinétique en fonction de la teneur en matière sèche des milieux. Les répercussions de ce travail se situent aussi bien à l'échelle du laboratoire, en particulier pour l'exploitation des essais d'activité méthanogène, qu'à l'échelle industrielle, avec la nécessité de contrôler le taux de matière sèche des procédés pour une efficacité optimale, et d'adapter l'agitation à ce taux pour améliorer les rendements de dégradation. Le modèle développé pourra constituer une base pour le dimensionnement et la conduite des installations. [ballon ,2012].

II.2. Définition

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus biologique naturel qui permet de transformer en milieu privé dioxygène, un substrat complexe pouvant être composé de molécules organiques lourdes, souvent insolubles, en méthane (biogaz). L'illustration la plus spectaculaire de ce phénomène réside dans la formation des nappes pétrolifères à partir de dépôts de végétaux avec comme étape ultime la formation de gisements de gaz naturel.[Effibi, 2009; L.E. Marache,2001]

II.3. Historique

Des études historiques indiquent que l'utilisation du biogaz était par les Assyriens dix siècles avant J.C. La redécouverte de la méthanisation remonte au dix -huitième siècle, précisément en 1776, lorsqu'Alessandro Volta, un physicien italien, remarque la présence d'un gaz émis par les vases en putréfaction d'un marais (le lac Maggiore au nord de l'Italie).

Il a étudié ensuite ce gaz, et il l'a appelé « gaz des marais ». En 1787 Antoine Lavoisier a appelé ce gaz « gaz hydrogène carboné » et ce n'est qu'en 1865 que le terme méthane fut proposé et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique (C.I.N.C)

Dès le début du dix-neuvième siècle en 1808, Sir Humphry Davy, physicien et chimiste britannique, a étudié la fermentation anaérobie du fumier et la première installation de méthanisation a été construite en 1859 dans une colonie britannique à Bombay en Inde. Plusieurs agronomes et biologistes ont essayé de travailler sur ce sujet bien que les moyens de recherche étaient timides pendant le dix-neuvième siècle. C'est pourquoi nous nous contentons de citer ces derniers travaux.

Après la première guerre mondiale, la méthanisation a émergé en tant que source énergétique en raison de la rareté et de la cherté des sources locales. En particulier, la méthanisation des boues de stations d'épuration urbaines a été conduite par les travaux de l'Allemand Karl Imhoff qui s'est intéressé à la valorisation du biogaz. En parallèle, Ducellier et Isman ; enseignants à l'école nationale d'agriculture d'Alger, ont travaillé sur la méthanisation du fumier et des effluents de l'élevage. La méthanisation dans le milieu agricole a ainsi connu une révolution après la seconde guerre mondiale, durant les années cinquante et soixante cette technologie a reculé rapidement et a été presque oubliée avec l'arrivée des sources énergétiques fossiles moins coûteuses et facilement disponibles.

Cependant, concernant le traitement dans les stations d'épuration, la méthanisation a gardé son rôle comme une technique efficace pour le traitement et la stabilisation des boues urbaines, surtout en Allemagne. Le choc pétrolier de 1973

et l'inquiétude d'une possible pénurie d'énergie fossile ont montré la nécessité de chercher d'autres sources énergétiques renouvelables ou alternatives au pétrole. De fait, l'intérêt des énergéticiens s'est à nouveau porté sur la méthanisation comme une des solutions à ces problèmes.

La méthanisation est retombée dans l'oubli au milieu des années quatre-vingt suite à la baisse du prix du pétrole, les installations de la méthanisation ont perdu leur rentabilité et les projets envisagés se sont arrêtés. À partir des dernières années du vingtième siècle, la méthanisation resurgit comme étant une technique efficace pour le traitement des polluants. En particulier, avec la prise de conscience internationale du besoin croissant de protéger l'environnement et de développer des solutions aux problématiques « énergie-eau-déchets » dans un contexte de changement global.

Les fluctuations du prix du pétrole et les soucis continus dans les zones de production ont contribué aussi à réveiller les intérêts vers la digestion anaérobie. Surtout, avec les avancements technologiques dans ce domaine comme la multiplication des applications de valorisation puisque le biogaz est convertible en pratiquement toutes les formes utiles d'énergie.

Nous présentons dans la (figure II.1), quelques éléments de l'histoire de la méthanisation depuis sa redécouverte et sa formalisation par Alessandro Volta en 1776 jusqu'à nos jours.**[** Almansour,2011;Boulenger., & Gallouin, . 2009;Görisch, & Helm. 2008,Boutouta,2012].

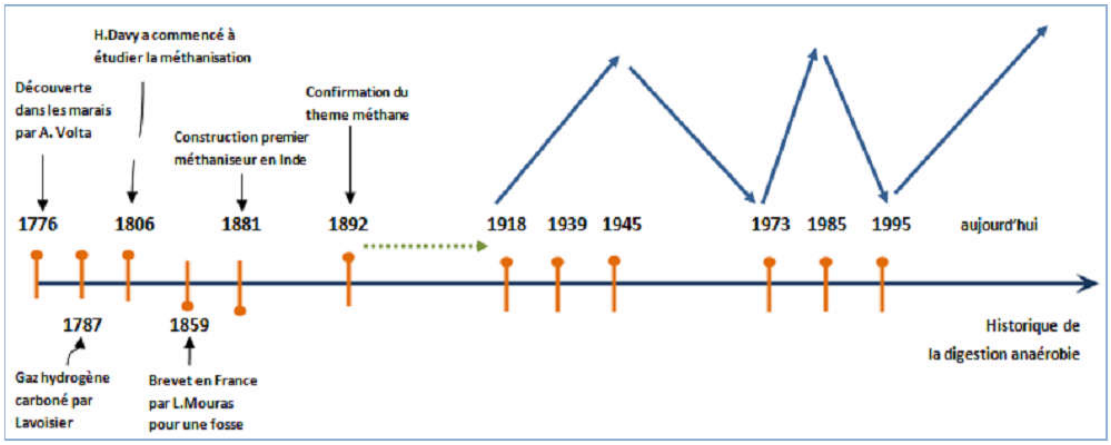

Figure II.1 : Histoirique de la méthanisation **(Boutouta, 2013).**

II.4. Les étapes de la méthanisation

On peut distinguer quatre phases dans la dégradation anaérobie : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse .

II.4.1. L'hydrolyse

C'est l'étape ou les macromolécules organiques (polysaccharides, protéines, composes lipidiques) sont hydrolysées en éléments plus simples, tels que sucres simples, acides aminés, acides gras à courtes chaînes, glycérol.Les produits solubles issus des dépolymérisations s'ajoutent à la fraction déjà soluble de la matière organique. La taille des particules et leur mise en solution permet leur assimilation par les micro-organismes. Selon le substrat utilisé, les produits d'hydrolyse sont différents. L'hydrolyse des lipids (lipolyse) libère du glycérol, des acides gras volatils (AGV) et des acides gras à longues chaînes (AGLC). Le glycérol est rapidement assimilé par les microorganismes. L'hydrolyse des protéines, libère des polypeptides et des acides aminés. La cellulose et les hémicelluloses sont hydrolysées en leurs monosaccharides constitutifs (glucose, fructose, arabinose, …). La lignine est non ou très faiblement consommée en digestion anaérobie. Or, dans les composés d'origine végétale, la lignine incruste plus ou moins la cellulose et les hémicelluloses ce qui peut limiter d'autant leur hydrolyse. Les vitesses de dépolymérisation des macromolécules sont particulièrement faibles pour les protéines, les lipides et la cellulose. [Görisch, & Helm, 2008;Moletta, 2008; Ouedrago 1994; Goel, &all ,1998]

II.4.2. L'acidogenèse

L'acidogenèse correspond à la conversion intracellulaire des produits solubles d'hydrolyse en composés tels que l'eau, le dihydrogène, le dioxyde de carbone et les acides gras volatils, alcools, ammoniac. Les AGV sont des molécules simples avec un squelette de 1 à 6 atomes de carbone. Les sept principales espèces d'AGV sont les acides formique, acétique, propionique, butyrique et isobutyrique, valérique et isovalérique. Le biogaz produit au cours de cette phase, tout comme lors de l'hydrolyse, est principalement composé de CO_2 (80%) et de H_2 (20%), La production des différentes espèces d'AGV est conditionnée par le substrat et par la pression en H_2. L'acidogenèse des monosaccharides est présentée au travers de celle du glucose.

Les micro-organismes impliqués dans l'acidogenèse sont généralement des mêmes genres que ceux de la phase d'hydrolyse.[Görisch, & Helm, 2008;Moletta, 2008; Ouedrago 1994; Goel, &all ,1998]

II.4.3. L'acétogenèse

L'acétogenèse est l'ensemble des réactions qui conduit à la production d'acétate. Cette étape est réalisée par deux groupes microbiens consommant respectivement le CO_2 et les AGV. Les bactéries homoacétogènes ou acétogènes strictes produisent de l'acétate par la réduction du dioxyde de carbone .[Moletta, 2008]

II.4.4. La méthanogenèse

Au cours de cette dernière étape de minéralisation de la matière organique, les molécules à un ou deux atomes de carbone sont converties en méthane. Deux voies métaboliques permettent la production de méthane, à partir de l'acétate et du couple CO_2/H_2. Les microorganismes responsables sont anaérobies stricts et appartiennent au domaine des Archées.

Les méthanogènes acétotrophes convertissent l'acétate en dioxyde de carbone et en méthane. La décarboxylation de l'acétate fait intervenir deux réactions couplées, dont le bilan d'enthalpie libre rend thermodynamiquement possible la production de méthane. L'équation suivante présente ce bilan.

$$\mathbf{CH_3CO_2^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- \ldots. (1) \quad \Delta G = -31kJ.}$$

Les méthanogènes hydrogénotrophes réduisent le dioxyde de carbone, les carbonates et les bicarbonates avec le dihydrogène pour former du méthane et de l'eau.

$$\mathbf{4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2) \qquad \Delta G = -136\ kJ.}$$

La voie hydrogénotrophe est importante pour le processus général de la digestion anaérobie, puisqu'elle est responsable de la disponibilité en H_2 et du maintien d'une pression partielle en H_2 faible, requise pour la syntrophie avec les APOH et la production d'acétate. Si la concentration en H_2 augmente trop, l'activité

fermentaire bactérienne s'oriente vers la formation d'acides gras volatils autres que l'acétate. Or, la voie acétotrophe produit du CH_4 par clivage de l'acétate, donc une diminution de la production du biogaz peut survenir. .[Görisch, & Helm, 2008;Moletta, 2008; Ouedrago 1994; Goel, &all ,1998]

II.5. Différents paramètres influençant la méthanisation

La digestion anaérobie correspond donc à un enchaînement de réactions chimiques dépendantes les unes des autres. Cette succession de réactions n'est possible que grâce à la population bactérienne, qui se développe dans le milieu. Ces bactéries réalisent ces réactions chimiques et maintiennent les conditions de vie nécessaires à leur survie. Mais le milieu, ou se déroule la digestion anaérobie, est un écosystème très fragile et très spécifique. Les différents paramètres influençant la digestion anaérobie sont détaillés dans les paragraphes qui se suivent.[Batstone**,** 2002]

II.5.1 Température

La digestion anaérobie peut se réaliser sous trois gammes de température :

- de **15** à **25°C** : fermentation psychrophile ;
- de **25** à **45°C** : fermentation mésophile ;
- de **55** à **65°C** : la fermentation est dite thermophile.

Les digesteurs mésophiles qui sont les plus utilisés (à 38 °C) dans les zones tempérées. La figure suivante (figure II.2) présente le taux de production de biogaz en fonction de la température et du temps de séjour.

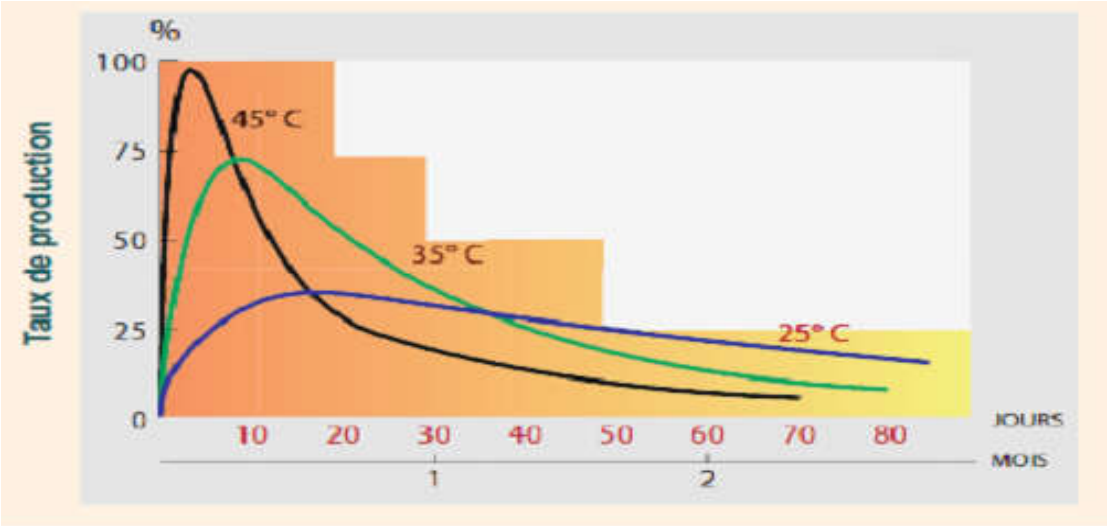

Figure II.2 : Taux de production de biogaz en fonction de la température.

La stabilité de la température est essentielle pour un bon déroulement de la fermentation méthanique ; or les marges de fluctuations tolérables sont plus étroites en zone thermophile qu'en zone mésophile (± 2.8°C à 38°C ; ± 0.8°C à 49°C et seulement ± 0.3°C à 52°C). Ceci implique qu'en zone thermophile, la température de fermentation doit être rigoureusement contrôlée et homogène dans tout le réacteur. Cet équilibre thermique, facilement réalisable au stade pilote, mais beaucoup plus difficile à obtenir dans les grandes unités. Dans l'écart des températures mésophiles, pour une hausse de 1°C la production de gaz augmente de 5%. Toutefois de fréquentes chutes de température peuvent déséquilibrer les populations microbiennes. Les variations de température peuvent être contraignantes pour la digestion mésophile (35 °C) ou thermophile (55°C). [Tong, X & all,1990; Bollon,2012]

II.5.2 pH

La digestion anaérobie se déroule normalement pour des pH compris entre 6 et 8 la plupart se développent de façon optimale conditions de pH neutre car les milieux acides ou basiques altèrent l'équilibre chimique des réactions enzymatiques ou détruisent les enzymes, en dessous de 6, l'activité des bactéries méthanogènes diminue rapidement et peut être complètement stoppée à partir de 5,5. Alors que les bactéries acidogénèses continuent à produire des acides gras volatiles (AGV) jusqu'à des pH voisins de 4,5, une acidification du milieu provoque une

accumulation des acides gras volatils, qui en trop grande quantité, bloque la production du méthane, et sa peut traduire un dysfonctionnement de la syntrophie entre les microorganismes de la méthanisation. D'autre part les bactéries impliquées dans la production et la consommation de l'hydrogène, pouvant entraîner une accumulation de propionate. Les surcharges organiques peuvent également engendrer une accumulation des AGV car l'apport de substrat dépasse les capacités de dégradation de l'écosystème microbien.

Pour une digestion anaérobie des boues d'épuration le pH est autorégulé dans le digesteur avec des valeurs optimales comprises entre 6,8 et 7,4 car l'alcalinité produite par les méthanogènes sous forme de CO_2, d'ammonium et de bicarbonate, permet de maintenir le pH dans la gamme de neutralité. Par ailleurs l'ajout de bicarbonate de soude peut être nécessaire pour le maintenir. [Bollon,2012; L.E. Marache,2001]

II.5.3 Rapport C / N et Substances nutritive

Le carbone et l'azote sont des éléments essentiels à la nutrition des microorganismes, ainsi que le phosphore et le soufre. Le carbone est primordial pour les bactéries en tant que source d'énergie et l'azote autant qu'élément de structure cellulaire. Les rapports C/N supérieurs à 23/1 ont été identifiés comme inadaptés pour une digestion optimale ; et des rapports inférieurs à 10/1 se sont révélés inhibiteurs selon des études portant sur la digestion anaérobie thermophile des déchets de volailles et d'autres substrats cellulosiques [00]. Pour un fonctionnement optimum d'un réacteur à chargement continu, les bactéries ont besoin d'un rapport C/N convenable pour leur métabolisme le rapport C/N idéal est de 30.

En effet les bactéries ont besoin de trente fois plus de carbone que d'azote. Si ce rapport n'est pas maintenu on observe un défaut de croissance des bactéries ou bien une accumulation des nutriments est donc un changement des caractéristiques biochimiques du milieu. Un rapport C/N adéquat est donc important pour avoir un bon fonctionnement de la digestion anaérobie. [Ouedrago ,1994; Almansour, 2011;Boutouta, 2012; Marache, 2001]

II.5.4. Brassage

Le brassage du digesteur n'est pas essentiel pour que la digestion anaérobie se déroule. Cependant, il permet l'obtention d'un milieu homogène, c'est un moyen de favoriser les transferts thermiques, ioniques et métaboliques. Il permet aussi une augmentation des contacts entre les substrats à digérer et la flore fixée et évite les courts circuits dans le réacteur, un court circuit correspond à la sortie prématurée d'une partie du substrat de la cuve car celle-ci ne suit pas le parcours habituel, l'effluent ne subit pas donc la méthanisation totale. Le brassage se fait à l'aide d'un agitateur mécanique, ou d'un système hydraulique par la recirculation de la boue ou réinjection du gaz produit. [Almansour, 2011;Boutouta,2012]

II.5.5. Pression partielle en hydrogène

L'hydrolyse est une étape clé dans le processus de la digestion anaérobie, c'est un substrat indispensable et énergétique pour les bactéries méthanogènes. Il est produit lors de l'acétogénèse à partir des produits de l'acidogénèse (AGV), cette faible pression partielle est assurée par les bactéries homoacétogènes et hydrogénophiles qui consomment H_2 au fur et à mesure de sa production. [Ouedrago ,1994]

II.5.6. Humidité

Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable surtout à la multiplication des microorganismes, d'après Marache, une humidité minimale de 60 à 70% est nécessaire à la méthanisation.

De sa part Laskriet a pu montrer que le taux de dilution est un facteur favorisant ; une augmentation du taux de dilution mène à une augmentation importante du volume du biogaz produit. [Marache,2001]

II.5.7. Temps de rétention hydraulique (TRH)

C'est le temps de séjour moyen du substrat dans le réacteur. C'est-à-dire le rapport du volume utile du fermenteur sur le débit volumique du substrat. Ce paramètre opératoire à un impact direct sur les différentes étapes réactionnelles de la digestion anaérobie. En effet, un temps de séjour inférieur à 5 jours est insuffisant pour avoir une digestion stable en raison du lessivage des microorganismes méthanogènes. [Almansour,2011 ;Boutouta,2012; Marache,2001]

II.5.8. Absence de l'oxygène [Marache, 2001]

L'oxygène est évidemment un inhibant (réaction anaérobie), cependant une petite quantité d'oxygène n'inhibe pas totalement et immédiatement la production de biogaz. En effet, certains groupes de bactéries, appelées anaérobies facultatives, peuvent tolérer et absorber une petite quantité d'oxygène évitant ainsi d'inhiber les autres groupes de bactéries ne tolérant pas du tout l'oxygène (bactéries anaérobies strictes). L'absence de l'oxygène est une condition pour le développement des bactéries méthanogènes, qui sont anaérobie strictes (figure II.3).

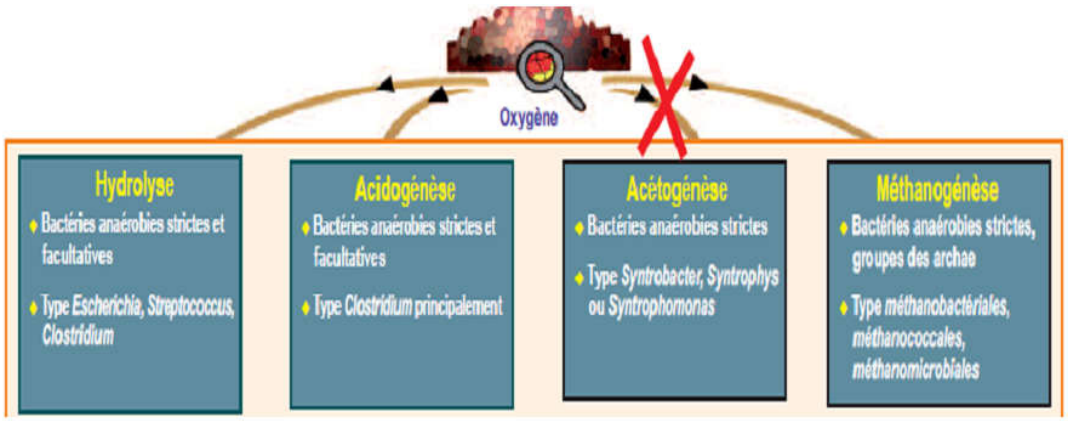

Figure II.3 : Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie.

II.5.9. Quantité de matière organique

La quantité de matière organique, telle que les déchets de papier, alimentaires et de jardin, disponibles pour des micro-organismes qui produisent le méthane, est le facteur le plus significatif pour la génération du méthane dans un déchet. La capacité de production du méthane dans un déchet est directement proportionnelle à la quantité des matières organiques. [Boutouta, 2012]

II.5.10. Absence des inhibiteurs [Derbal, 2015]

La fermentation anaérobie est réputée pour sa sensibilité aux matières toxiques et particulièrement la phase méthanogène, qui est encore plus sensible. Ces éléments inhibiteurs sont présents dans le substrat lui-même, ou produits lors de la digestion, parmi eux on peut citer :

- **Oxydants**

Les oxydants sont des inhibiteurs à cause de leurs grands rôles dans la régulation du potentiel redox. Comme les bactéries méthanogènes exigent de bas potentiels redox, on limite au minimum l'apport de substances oxydantes tels que les nitrates, les nitrites et évidement l'oxygène.

- **Ammoniaque**

D'après Hansen et al., et Chen et al., l'ammoniaque est considéré comme un inhibiteur ayant un effet toxique sur les microorganismes de la digestion anaérobie et notamment des méthanogènes acétoclastes. L'ammoniaque est souvent rencontré dans les supports ayant un fort taux de protéines, il se forme rapidement dans le digesteur, par biodégradation des constituants protéiques et au-delà de 2 à 3 g/l, il devient toxique et inhibiteur pour les micro-organismes méthanogènes.

D'après Anderson et al., l'ammoniaque libre a été reconnu plus toxique que l'ion ammonium . En générale, les taux d'ammoniac libre devraient être maintenus en dessous de 80 ppm pour éviter l'inhibition. Il a été montré par l'ensemble des études faites par Carty; Ficher et al., Hart, Shmid et Lipper qu'une très forte concentration de l'ordre de 1500 à 3000 ppm en ion ammonium est tolérable.

- **Acides volatils**

Les acides gras volatils (AGV) en forte concentration supérieure à 3000 mg/l peuvent être dus à la toxicité propre des acides mais aussi à la diminution du pH que leur concentration entraîne. D'après Arhing et al., les fortes concentrations en AGV sont plus le résultat d'un déséquilibre de la digestion anaérobie (causé par une surcharge organique, un changement de température, la présence de toxique) que la cause d'une inhibition [44]. Les AGV sont l'intermédiaire principale dans la digestion anaérobie, et ils s'accumulent sous l'action du déséquilibre du processus. À des valeurs faibles de pH, les AGV deviennent plus toxiques.

- **Métaux lourds**

Certains d'entre eux sont toxiques pour les organismes anaérobies, même à de faibles concentrations. Les métaux lourds bloquent le métabolisme et tuent les organismes en inactivant le groupe d'enzymes à savoir les sulfhydriles par formation de mercaptides. Par contre il est possible d'éliminer les produits toxiques du support nutritif ou de les diluer jusqu'à passer en dessous du seuil de toxicité.

- **Cations**

Les cations eux aussi présenteraient une toxicité à une certaine concentration vis-à-vis de la méthanisation en se liant aux acides gras volatils. Le tableau II.1 suivant montre l'effet des ions :

Tableau II.1 : Concentrations en cations provenant la stimulation ou l'inhibition de la méthanisation.

Ions	Stimulation (mg/L)	Inhibition modérée (mg/L)	Inhibition totale (mg/L)
Na+	100/200	3500/5500	8000
K+	200/400	2500/4500	12000
Ca++	100/200	1000/1500	3000
Mg++	75/150	1000/1500	3000

II.6. Les différents substrats les plus utilisés dans le procédé de la méthanisation

[Guen, 2003]

a/ Déchets d'élevages ;

b/ Eaux usées ;

c/ Déchets des industries ;

d/ Déchets solides urbains.

II.7. Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie

II.7.1 Les avantages[Derbal,2015; Boulenger & Gallouin, 2009]

1. Le biogaz est une énergie renouvelable qui peut sensiblement diminuer les besoins en énergies fossiles ;

2. L'utilisation du biogaz contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre ;

3. Le biogaz est convertible sous toutes les formes d'énergie utiles (chaleur, électricité, carburant) ;

4. Le biogaz est une énergie locale qui peut participer à la production décentralisée d'énergie et notamment à la production d'électricité ;

5. Diminution de la charge en carbone des déchets végétaux. Une fois digérés, les déchets sont moins nocifs pour l'environnement, le risque d'une pollution biologique ou organique est en outre largement a moindre et la fermentation diminue le pourcentage de matière sèche, permettant de diminuer le volume à transporter et à épandre ;

6. Un coût de traitement faible, car il n'y a pas besoin de systèmes d'aération, ce qui permet de considérer sérieusement ces systèmes pour le traitement des eaux usées dans les pays en voie de développement ;

7. Une production de boue très faible, ce qui limite la taille des installations de traitement des boues: entre 20 et 150 kg de biomasse produit par tonne de matière organique dégradée, contre 400 à 600 kg pour les traitements aérobies ;

8. Une production de biogaz, potentiellement utilisable comme énergie alternative ;

9. **U**ne très bonne capacité à traiter des effluents fortement chargés

10. une faible consommation des macronutriments (600:7:1 – C:N:P), malgré la nécessité de quelques oligoéléments comme le nickel, le magnésium, le calcium, le sodium, le baryum, le cobalt et le molybdène ;

11. une très bonne capacité à traiter des contaminants spéciaux comme les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), les PCB (polychlorobiphényles) et les composés organiques azotés.

II.7.2 Les inconvénients [Görisch., & Helm 2008;Rozzi, 2008; Derbal,2015]

1. Une vitesse de croissance des microorganismes très faible, ce qui nécessite de fixer des temps de séjour de boues élevés et surtout qui rend le procédé très vulnérable dans le cas de perte des microorganismes pendant les chocs hydrauliques ;
2. Un potentiel de production d'odeurs, car sous conditions anaérobies le sulfate peut être utilisé comme accepteur d'électrons et se réduire en H_2S; de plus la production de mercaptans augmente fortement ;

3. Une forte dépendance du pH et sensibilité aux variations environnementales ;
4. Des niveaux d'épuration de la matière organique plus faible en comparaison aux procédés aérobies ;

5. Une mise en équilibre relativement longue du procédé ;

6. Une écologie microbienne complexe, impliquant différents types de microorganismes ce qui conduit à n'avoir pas les conditions optimales simultanément pour tous les organismes.

II.8. Digesteur

II.8.1 Définition

Le digesteur, cœur où se réalise la méthanisation, appelé aussi fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Il existe plusieurs formes de digesteur : ovoïde, cylindrique, ou bien continental (figure II.4), généralement construit en béton avec une protection interne en résine époxy mais pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif. [Cirne, D.G, 2007].

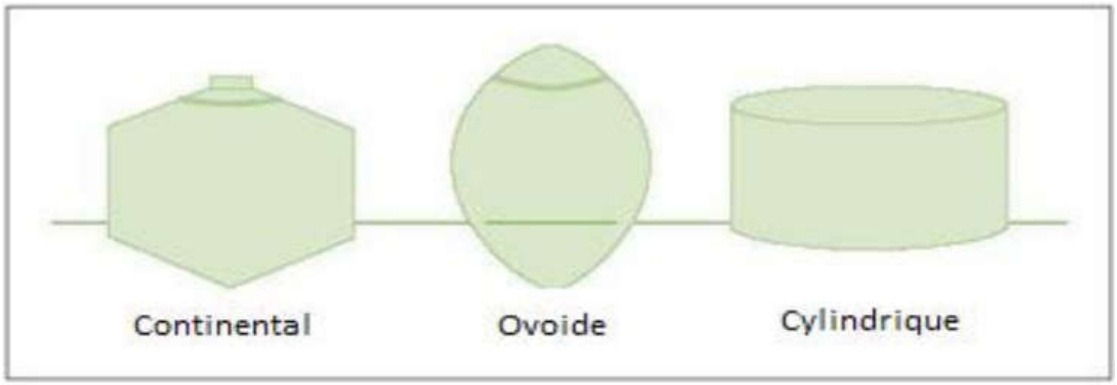

Figure II.4 : Différentes formes de digesteurs.

Le digesteur est constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle les microorganismes se côtoyant pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques. Il peut être équipé d'un système de chauffage, d'un système d'agitation, d'un système de prélèvement et d'un système de mesure de teneur en gaz, de dispositifs permettant le contrôle de différents paramètres : la température, le pH, la pression …etc. [Bollon,2012]

II.8.2. Classification des différents types de digesteurs

[Guendouz,2008;Boutouta,2012]

Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application projetée, on peut classer les digesteurs selon : [Guendouz, 2008;Boutouta, 2012]

a- Le mode de l'alimentation : batch, semi-continus ou continu ;

b- Le type de substrat : solide, semi solide ou liquide ;

c- Le nombre d'étapes : mono ou bi étapes.

II.8.2.1. Le mode de l'alimentation

- Le digesteur batch ou discontinu

Il a l'avantage d'une construction simple, le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, à la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ces systèmes rustiques et d'une grande simplicité technique. Ils sont avantageux pour

traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles, ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière : au début de cycle, la production de biogaz est lente puis elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute enfin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur. [Guendouz,2008;[Boutouta,2012; Marache,2001]

- **Le digesteur continu**

Le substrat introduit de manière continue est digéré et déplacé soit mécaniquement soit sous la pression de nouveaux intrants vers la sortie sous forme de digestat. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille.[Marache,2001]

- **le digesteur semi-continu**

Le digesteur est progressivement rempli par des charges successives convenablement réparties dans le temps. La vidange est réalisée lorsque le volume utile du digesteur est atteint et que la production de biogaz n'est plus suffisante[Guendouz,2008],[[Boutouta,2012]

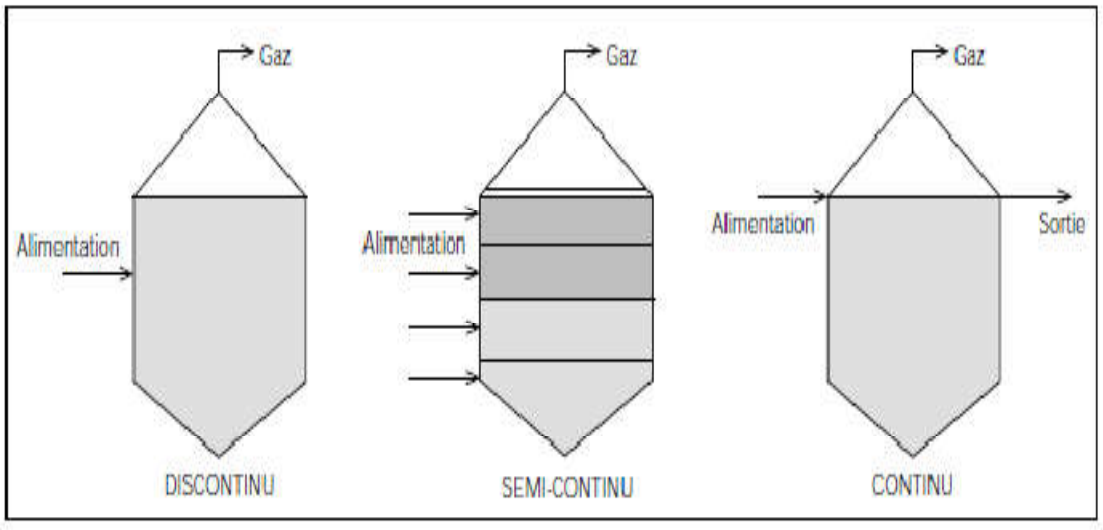

Figure II.5 : Les types de digesteur selon Le mode de l'alimentation.

II.8.2.2 Classification selon le type de substrat

- Solide : La teneur en matière sèche est supérieure de 15 % ;
- Semi solide ou pâteux : La teneur en matière sèche entre 5 et 15 % ;
- Liquide : La teneur de la matière sèche est inferieure de 5%.[Guendouz,2008;[Boutouta,2012]

II.8.2.3 Classification selon le nombre d'étapes

Selon les phases méthanogènes et l'acidogènes se déroulent dans le même réacteur ou dans 2 cuves séparées.

- Le procédé en mono-étape

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

- Le procédé en bi-étape

Ce type de digesteur sépare la phase d'hydrolyse et l'acidogène dans une première étape, et la méthanogènes dans une seconde étape. La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée. L'avantage des procédés bi-étape réside dans le fait que la décomposition de la matière solide est de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases, réduit le risque d'intoxication des cellules métahnogeneses liée à la présence des acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogènes n'est pas complètement terminée. [Guendouz, 2008;Boutouta, 2012]

II.9. Biogaz

II.9.1 Définition et sa composition

Le biogaz est un mélange de gaz carbonique et de méthane provenant de la dégradation des matières organiques, végétales ou animales. On peut également trouver d'autres composés sous forme de traces (Tableau II.3) (Tableau II.4). [La farge , 1995] .

Tableau II.2 : Principaux composés autres que CH_4 présents dans le biogaz et leurs effets.

Composés	Concentrations	Effets
CO_2	25 à 50 % en vol	- Diminution de la capacité calorifique - Augmentation de l'indice de méthane - Source de corrosion si le gaz contient de l'eau - Dégradation des piles à combustible alcalines
H_2S	0 à 1 % en vol	- Corrosif pour l'équipement - Source de SO_2 et H_2SO_4 lors de la combustion - Poison de catalyseurs
N_2	0 à 5 % en vol	- Diminution de pouvoir calorifique - Augmentation de l'effet cliquetis des moteurs
H_2O	1 à 5 % en vol	- Source indirecte de corrosion - Source de condensation dans les parties - froides pouvant endommager l'instrumentation

Tableau II.3 : Comparaison du biogaz selon ses origines.

Composant	Ordures ménagéres	Boues de station d'épuration	Déchet agricoles	Déchet de l'industrie agro-alimentaire
CH_4 %vol	50-60	60-75	60-75	68
CO_2 %vol	38-34	33-19	33-19	26
N_2 %vol	5-0	1-0	1-0	-
O_2 %vol	1-0	<0.5	<0.5	-
H_2O %vol	6 à40°C	6 à40°C	6 à40°C	6 à 40°C
H_2S %vol mg/m^3	100-900	1000-4000	3000-10000	400
NH_3 %vol mg/m^3	-	-	50-100	-
Siloxanes mg/m^3	20-250	Traces	-	-
Organochlorés ou Organofluorés mg/m^3	100-800	-	-	-

II.9.3. Propriétés du biogaz

Dans les mêmes conditions de température et de pression et à volume égal, le biogaz est plus léger que l'air, sa densité par rapport à l'air est égale à environ 0,7. Le pouvoir calorifique du biogaz dépend de sa richesse en méthane.

Si le biogaz contient 70% de CH_4 : Le PCI sera de 6,96 kWh/m^3 et le PCS de 7,72 kWh/m^3.

L'odeur d'œuf pourri caractéristique émise par le biogaz est due à la présence, en quantité infime, de sulfure d'hydrogène (H_2S).[Almansour, 2011; Marache,2001].

II.9.4. Valorisation du biogaz

La valorisation du biogaz, en plus de sa valeur énergétique, a un double effet positif sur l'environnement, en amont en tant que traitement des déchets et des effluents organiques, en aval pour réduire le risque climatique global.

Le biogaz peut être valorisé suivant plusieurs modes possibles et cela selon les types de gisements, la qualité et la richesse en méthane et en fonction des débouchés de proximité et des politiques mises en œuvre. [Boumediene, 2012]

II.9.4.1. La valorisation thermique

Elle consiste à utiliser le biogaz comme source d'énergie thermique en remplacement, par exemple, du propane, du gaz naturel ou du mazout. C'est le mode de valorisation le plus courant, le plus efficace et le mieux maîtrisé. Ce mode de valorisation permet de récupérer le maximum d'énergie contenue dans le biogaz. Pour une utilisation thermique à la ferme, la purification du biogaz se limite généralement à sa désulfuration, par exemple par son passage sur du charbon activé, qui limitera les risqué de corrosion des canalisations**[**Bensmail,2014]

II.9.4.2 La production d'électricité à partir de Biogaz

La production d'électricité peut être envisagée lorsque le volume de biogaz produit est important. En effet, une telle valorisation nécessite l'achat d'une unité de cogénération fonctionnant au biogaz. Cette unité peut être composée d'une chaudière au biogaz couplée à une turbine à vapeur ou à un moteur à gaz. L'électricité produite peut être utilisée directement à la ferme pour assurer la ventilation des bâtiments, l'éclairage et le fonctionnement des différents équipements (pompes, soigneurs, etc.). Lorsque les réseaux de distribution d'électricité le permettent, il est possible d'alimenter le réseau avec les surplus d'énergie produits à la ferme. La transformation de l'énergie thermique en énergie électrique se fait toutefois au détriment du rendement énergétique global du biogaz La production d'électricité varie selon le type de biomasse utilisée en fonction de sa capacité à générer du biogaz. [Bensmail,2014]

II.9.4.3. La production combinée de chaleur et d'électricité (la cogénération)

Le biogaz peut alimenter un moteur thermique relié à un alternateur qui produit l'électricité et de la chaleur qui est récupérée dans les gaz d'échappement et au niveau du moteur. **[**Bensmail, 2014]

II.9.4.4. L'utilisation comme carburant pour les véhicules ou dans un réseau de gaz naturel

Une fois purifié, le biogaz peut être utilisé comme équivalent au gaz naturel, soit comme carburant pour les véhicules fonctionnant au gaz naturel (GNV), soit en étant injecté dans un réseau de distribution de gaz naturel. Ce type d'utilisation implique un degré de pureté beaucoup plus élevé que pour les applications précédentes. En plus de la désulfurisation, le dioxyde de carbone ainsi que la vapeur d'eau doivent être retirés du biogaz. Par ailleurs, la proportion de méthane doit être équivalente à celle du gaz naturel commercialisé (96 % et plus) afin d'assurer une valeur calorifique intéressante. Les concentrations admissibles des différents composants du biogaz sont fixées par les fabricants des moteurs ou par les gestionnaires des réseaux de distribution, selon le mode de valorisation envisagé Une unité traitant 20 000 t/an de déchets peut produire une quantité de carburant qui permet à 2000 voitures de parcourir 10 000 km/an. Un kilogramme de déchets correspond donc à la consommation de carburant pour un parcours d'un kilomètre en voiture. La récupération du biogaz produit par les décharges est d'autant plus intéressante que le méthane est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le dioxyde de carbone (CO_2) produit par sa combustion. [Bensmail, 2014].

II.10. Conclusion

La méthanisation apparait donc comme un moyen technologique très efficace pour le traitement des déchets organiques dans le respect de l'environnement. Mais attentions la méthanisation ne règle pas tout les problèmes, en effet, elle est inefficace contre les nitrates, les produit toxiques et les métaux lourd.[Bochu.2003]

Chapitre III matériels et méthodes

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble des dispositifs expérimentaux et des méthodes d'analyses utilisées dans ce travail.

III.1 Origine et caractérisation du substrat utilisé

Le substrat utilisé dans cette étude pour l'alimentation des digesteurs est constitué principalement de la boue sèche, provenant de la station de lagunage de la ville d'Adrar.

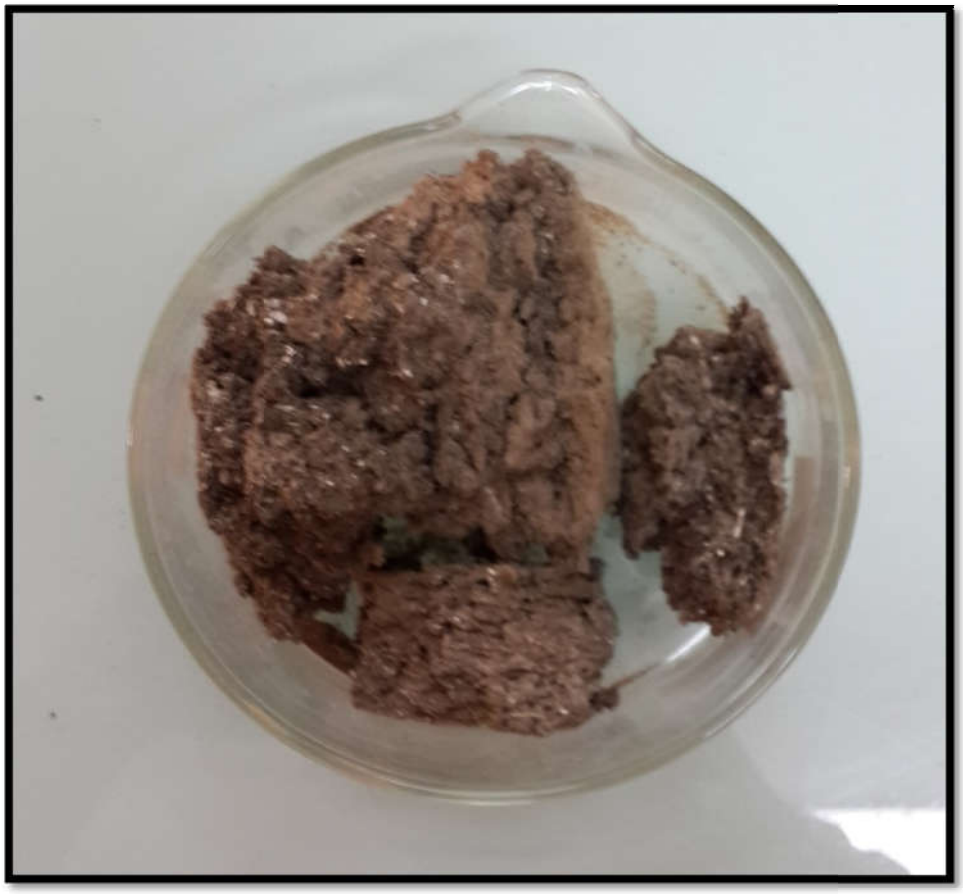

Figure III. 1 : le substrat utilisé.

III.2 Prétraitement du substrat

Afin d'optimiser la cinétique de production du biogaz et afin de réduire le temps de séjour, le substrat a été soumis à un prétraitement mécanique (broyage et tamisage). [Boutouta,2012]**.**

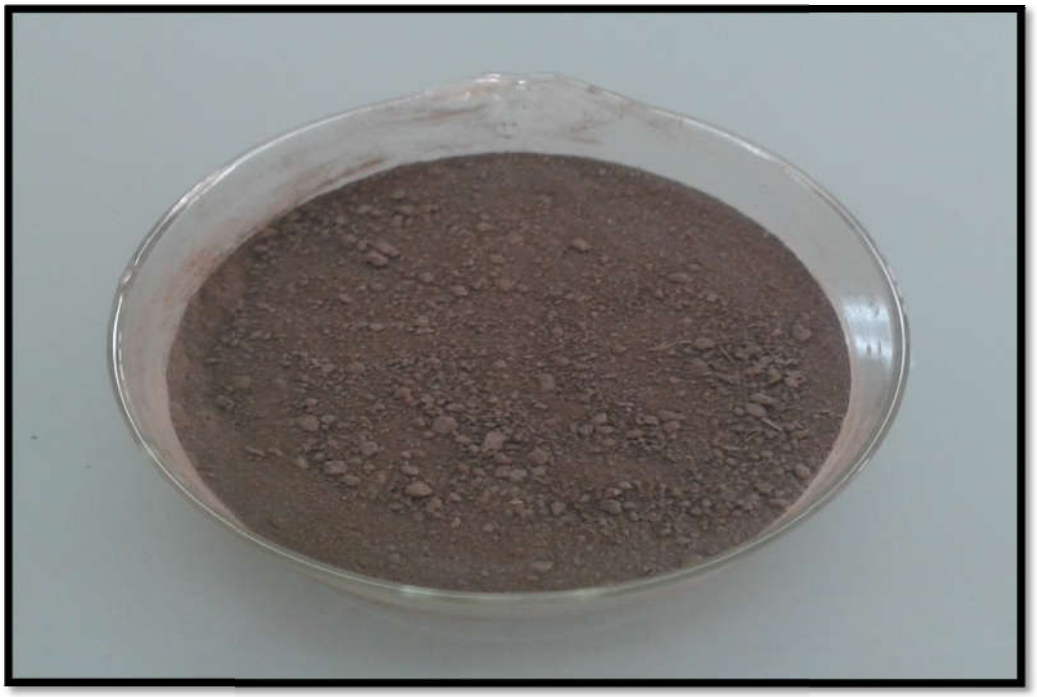

Figure III.2 : le substrat après prétraitement (broyage et tamisage) .

III.3 Le cas étudié

Il existe plusieurs types de prétraitements **(Mottet ; Ghizzi damasceno da silva)** :

- **Physiques :** Thermique **(Bougrier *et al.*, 2007 ; Climent *et al.*, 2007 ; Jeong *et al.*, 2007)**, Mécanique **(Barjenbruch et Kopplow, 2003)**, Ultrasons **(Nickel et Neis, 2007 ; Benabdallah El-Hadj *et al.*, 2007)** ;
- **Biologiques :** Enzymatique **(Davidasson *et al.*, 2007)**, microorganismes ;
- **Chimiques :** Ozonation **(Weemaes *et al.*, 2000 ; Battimelli *et al.*, 2003)**, acides, basiques, oxydatifs, solvants.

Le prétraitement alcalin est l'un des principaux procédés de prétraitement actuels car il a montré plusieurs effets positifs, y compris la solubilisation de la lignine et la neutralisation de divers produits acides dégradés du complexe lignocellulosique **(Jiyinget al., 2010)**.

Dans cette étude pratique, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'un des prétraitements alcalin : le prétraitement par KOH.

Trente grammes de substrat (base sèche) ont été mélangés uniformément avec 30 ml de solution de KOH (0, 0.25, 1.25 et 1.85 M). Les charges de KOH correspondantes sur les solides du substrat étaient respectivement de 0 %, 1.0 %, 5,0

% et 7,5 % (p / p). Le trempage de substrat a été maintenu à température ambiante pendant 24 h.

Figure III.3 : le substrat après prétraitement chimique par KOH.

III.4 Description du digesteur et du dispositif utilisé

Les essais ont été réalisés dans un réacteur de type discontinu. Ce réacteur est de modèle de laboratoire, en verre, très simple, permettant d'assurer l'anaérobie de milieu de culture. Le réacteur est muni de deux trous, le premier pour le prélèvement des échantillons liquides à l'aide d'une seringue, et l'autre pour assurer l'échappement du gaz pour la mesure du volume de biogaz produit.

Le volume total du réacteur est de 2.5 L. Nous avons laissé un volume de 500 ml au dessus du niveau du liquide pour protéger la sortie de gaz, et maintenir l'anaérobiose.

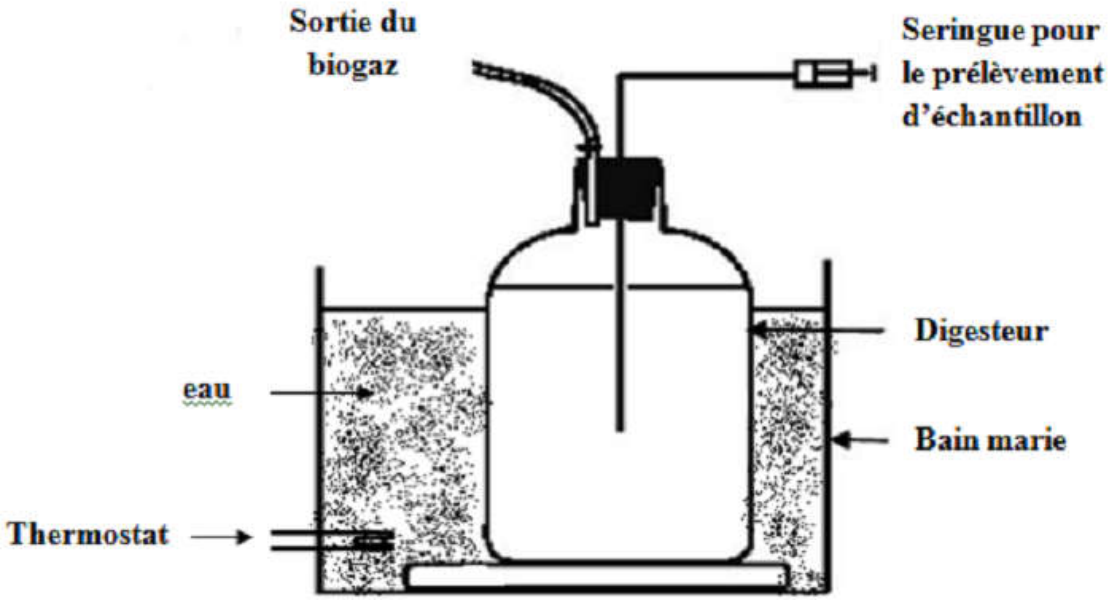

Figure III.4 : schéma du dispositif de fermentation utilisé.

III.5 Conditions du travail

Les digesteurs utilisés sont alimentés avec de la boue afin d'obtenir une concentration de l'ordre de 30 g MS/L.

Les réacteurs sont maintenus en condition mésophile (35 °C ± 2 °C) dans un bain marie chauffé et régulé par un thermostat et agité manuellement en le secouant une à deux fois par jour. [Boutouta,2012],[Ben Smail ,2014] .

Figure III.5 : Photo des réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C.

III.6 Méthodes d'analyses

III.6.1 Détermination de la matière sèche (MS**)** [Ben Smail ,2014]

III.6.1.1.Matériels utilisés

- étuve réglée à 105°C ;
- capsule ;
- dessiccateur ;
- balance.

III.6.1.2.Méthode

La matière sèche est déterminée par dessiccation dans une étuve maintenue à 105°C jusqu'à ce que le poids de l'échantillon à analyser devient constant (A.O.A.C, 1990). La différence du poids correspond à la perte d'humidité et le résidu représente la teneur en matière sèche de l'échantillon. Pour déterminer la matière sèche, une prise d'échantillon de masse quelconque, soit (M1), est versée dans une capsule de masse connue soit (M) préalablement nettoyée et séchée, ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La capsule est pesée après refroidissement dans un dessiccateur.

Figure III.6 : Photo de l'étuve utilisée.

La matière sèche s'obtient selon la relation suivante :

$$\% \mathbf{MS} = \frac{\mathbf{M_1} - [(\mathbf{M} + \mathbf{M_1}) - (\mathbf{M} + \mathbf{M_2})]}{\mathbf{M_1}} \times \mathbf{100}$$

Avec :

M : masse de la capsule ;

M1: masse de l'échantillon avant dessiccation ;

M2 : masse de l'échantillon après dessiccation.

III.6.2 Détermination de la teneur en matière organique (MO)

[Ben Smail ,2014]

III.6.2.1.Matériels utilisés

- Four à moufle ;
- capsule ;
- Balance de précision ;
- Dessiccateur.

III.6.2.2.Méthode

Lorsque l'échantillon, préalablement séché, est soumis à une incinération à 550°C, la matière organique se consume et la matière résiduelle constitue la matière minérale (A.O.A.C, 1990).

Pour déterminer la teneur en matière organique (MO), une masse quelconque de l'échantillon après dessiccation, soit (M1), est introduite dans une capsule préalablement nettoyée et séchée ayant une masse (M), l'ensemble est placé dans un four à moufle pour une calcination à 550 °C pendant 12-18 heures. Après refroidissement la capsule contenant la matière minérale est pesée encore une fois. La masse de la matière organique est obtenue par différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale.

Figure III.7 : Photo du four à moufle utilisé.

Le calcul des MO, s'obtient selon la relation:

$$\mathbf{MO\ (\%) = \frac{(M+M1)-(M+M2)}{M1} \times 100}$$

Avec :

M : masse de la capsule ;

M1: masse de l'échantillon après dessiccation ;

M2: masse de l'échantillon après calcination.

III.7 Les paramètre suivis

Le contrôle des digesteurs anaérobies est nécessaire pour assurer la réussite de l'opération. A cause de la complicité du processus de la digestion anaérobie due à la sensibilité des groupes micro-organismes à plusieurs facteurs, il est important de pouvoir détecter le déséquilibre de processus au début et donc l'action peut être prise à temps pour empêcher l'échec du processus. Pour cela pendant la durée de la digestion, nous avons les paramètres suivants :

- le pH ;
- les et AGV ;
- TAC
- AGV/TAC ;
- le volume du biogaz ;
- L'inflammabilité ;
- MO_i et MO_f.

III.7.1 Le pH

Le pH est un facteur facile à mesurer, le changement du pH peut être un indicateur, et la cause du déséquilibre du processus, puisque les micro-organismes peuvent fonctionner seulement dans une plage spécifique de pH.

III.7.1.1.Matériel

- pH-mètre
- Bécher.

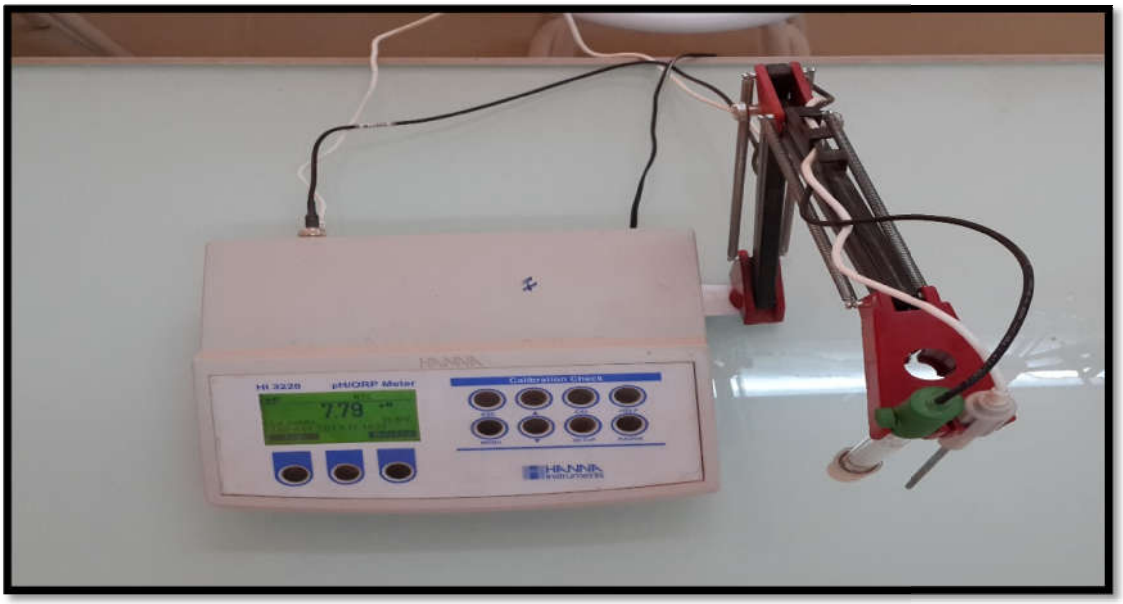

Figure III.8 : pH-mètre utilisé.

III.7.1.2.Méthode

Toutes les valeurs de pH dans cette étude sont obtenues à l'aide d'un pH-mètre « HANNA HI 3220 » muni d'une électrode en verre. Après l'étalonnage, on émerge l'électrode dans notre échantillon et on lit directement la valeur de pH affiché sur l'écran.

III.7.2 Le volume de biogaz

La production du gaz est le but principal de la digestion anaérobie. Durant le déroulement du processus de digestion anaérobie le volume du biogaz produit est mesuré de façon régulière.

III.7.2.1. Matériels

- Éprouvette graduée ;
- Bécher.

Figure III.9 : Dispositif de mesure du volume du biogaz produit

III.7.2.2. Méthode

Le volume de biogaz est mesuré à l'aide d'un système hydraulique (déplacement du liquide), ou le gaz produit en sortie du digesteur, passe dans une éprouvette graduée plongée dans un liquide, ce qui va déplacer le niveau du liquide contenu dans l'éprouvette et indique ainsi le volume du gaz produit. [Boutouta, 2012]

III.8L'inflammabilité du biogaz

Le test d'inflammabilité de biogaz, donne une idée sur le rendement énergétique de l'échantillon utilisé. Chaque fois, après la mesure de volume de biogaz, on passe à un test d'inflammabilité de ce dernier. Le biogaz est retiré à l'aide d'une seringue et subi à une flamme discontinue d'un briquet.

Figure III.10 : Teste d'inflammabilité du biogaz produit.

III.9 La détermination du Titre Alcalimétrique Complet (TAC)

Le titre alcalimétrique complet permet de connaitre les doses de carbonates, d'hydroxydes et d'hydrogénocarbonates alcalins ou alcalino-terreux, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils.

Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides.

III.9.1.Matériels utilisés

- pH-mètre ;
- Centrifugeuse ;
- Agitateur et un barreau magnétique ;
- Burette ;
- Bécher.

III.9.2.Méthode

Pour déterminer le TAC, l'échantillon prélevé du digesteur est centrifugé pendant 15 minutes. Après centrifugation, on prend 25 ml de notre échantillon et on le met dans un bécher. On mesure le pH initial, et à l'aide d'une burette, on ajoute de l'acide sulfurique (H_2SO_4) 0,1 N jusqu'à atteindre une valeur de pH = 4, selon les réactions suivantes[Boutouta, 2012] :

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2\,H_2O$$

$$2\,CaCO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow Ca(HCO_3)_2 + CaSO_4$$

$$Ca(HCO_3)_2 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2\,CO_2 + 2\,H_2O$$

On marque le volume obtenu, soit V. Le TAC s'exprime comme suit :

$$\mathbf{TAC} = \frac{\mathbf{V \times 0,1 \times 1000}}{\mathbf{25}}\ \mathbf{(meq/l)}$$

On exprime souvent le TAC en mg/l de $CaCO_3$, pour cela on utilise la relation suivante :

$$\boldsymbol{TAC = V \times 4 \times 50\ \ (mg/l\ )}$$

III.10 La détermination des Acides Gras Volatils (AGV) [Boutouta,2012],

Le contrôle des acides gras volatils, stade intermédiaire obligatoire de la digestion anaérobie, est indispensable. Leur accumulation traduit un ralentissement de l'activité des bactéries méthanogènes et peut provoquer le blocage du processus fermentaire, raison pour laquelle le suivi de la concentration des AGV lors de la digestion devient très important.

III.10.1.Matériels utilisés

- pH-mètre ;
- Centrifugeuse ;
- Agitateur et barreau magnétique ;
- Plaque chauffante ;
- Burette ;
- Bécher.

III.10.2.Méthode

Pour déterminer la concentration totale en acides gras volatils, on continue d'ajouter de l'acide sulfurique à l'échantillon jusqu'à atteindre une valeur de pH = 3,5, après on fait bouillir le liquide pendant 3 minutes, de manière à dégazer le dioxyde de carbone. La solution est ensuite refroidie à la température ambiante.

Après le refroidissement et à l'aide d'une burette, on ajoute de la soude (NaOH) 0,1 N jusqu'à atteindre une valeur de pH = 4 et on marque le volume obtenu, soit V_2. On continu d'ajouter le soude jusqu'à atteindre une valeur de pH = 7, on marque le volume, soit V_3.

$$AGV = \frac{(V_3 - V_2) \times 0,1 \times 1000}{25} \ (meq/l)$$

Ou ;

$$\mathbf{AGV = (V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06 \ (eng/l)}$$

CHAPITRE IV: résultats et discussions

Dans la première partie de ce chapitre, le comportement des paramètres qui permettent d'évaluer le déroulement, la stabilité et la conduite du procédé seront présentés. Le pH, le volume du biogaz**,** les acides gras volatils (AGV), l'alcalinité (TAC) ont été analysés une fois par semaine pendant un temps de séjour de 72 jours.

IV.1. Caractérisation du substrat utilisé

Les résultats de taux de matière sèche ainsi que le taux de la matière organique sont présentés dans les deux tableaux suivants

IV.1.1 Taux de la matière sèche

Tableau IV.1: Taux de la matière sèche du substrat.

Paramètre	1er échantillon	2éme échantillon	3éme échantillon	valeur moyenne
matière Sèche %	96.94	96.96	97.01	96.97

IV .1.2Taux de la matière organique du substrat

Tableau IV 2: Taux de la matière organique du substrat.

Paramètre	1er échantillon	2éme échantillon	3éme échantillon	valeur moyenne
matière organique %	45.06	45.27	45.55	45.29

À la lumière de ces résultats, il apparait clairement que ces boues sont des mélanges complexes constituées principalement de matière organique (plus de 50 %) ce qui les rend plus appropriés pour la méthanisation.

IV.2 Évolution des paramètres de fonctionnement

IV.2.1 Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 0%

IV.2.1.1 Évolution du pH

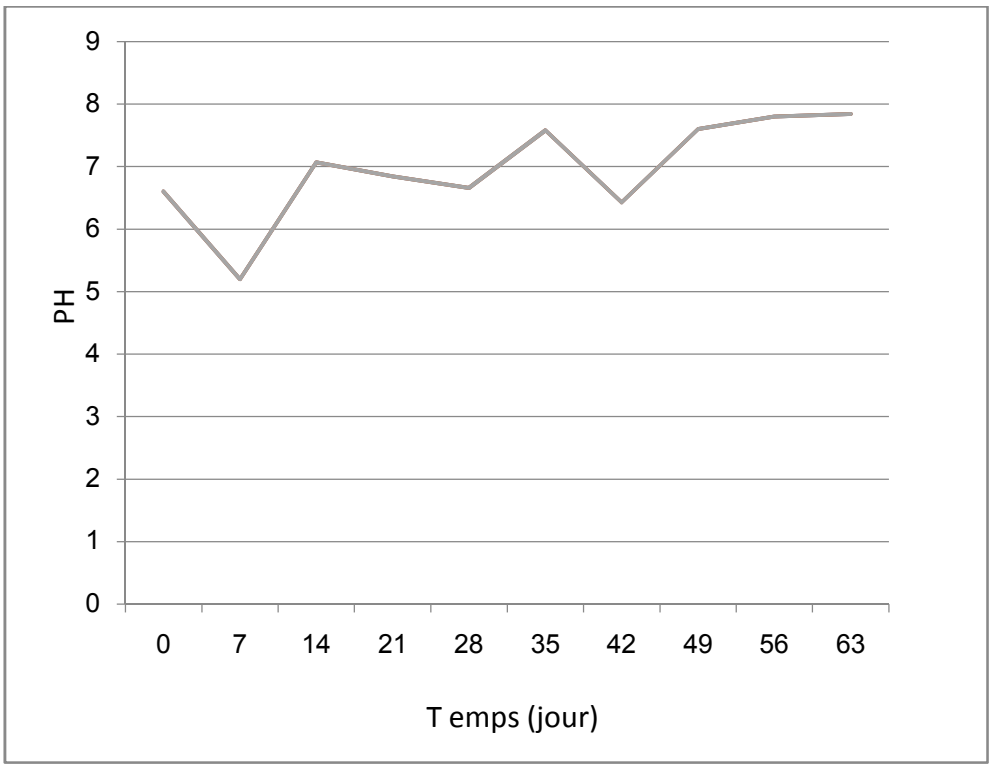

Figure IV.1 : l'évolution du pH dans le digesteur 0%.

La courbe d'évolution du pH, soit pour le digesteur 0%, peut être divisée en trois grandes parties ;

- **La première partie**

Dans cette première partie, on remarque une chute de pH dés le 1er jour, du 6.6 jusqu'à une valeur minimale proche de 5.2 a 7eme jours, donc c'est l'acidification de milieu. Cette chute peut s'expliquer par la décomposition de la matière organique et la production des acides gras volatils (AGV) et leurs accumulations dans le milieu.

- **La deuxième partie**

Dans la deuxième partie, on peut remarquer que les valeurs de pH ont commencé à augmenter petit à petit jusqu'au 14ème jour, Cette augmentation du pH est due

principalement à la consommation des AGV par les bactéries, puis leur transformation en acétates.

- **La troisième partie**

Dans cette partie, à partir du 15^{éme} jour on peut remarquer qu'il y'a une stabilisation des valeurs de pH (entre 7 et 7.86). On peut expliquer cette stabilisation par la stabilité du processus d'une manière générale, c'est-à-dire, qu'il y'a simultanément une production des AGV d'une part, et leurs consommations d'autre part. et transformer a une production de biogaz.

IV.2.1.2 L'évolution des AGV

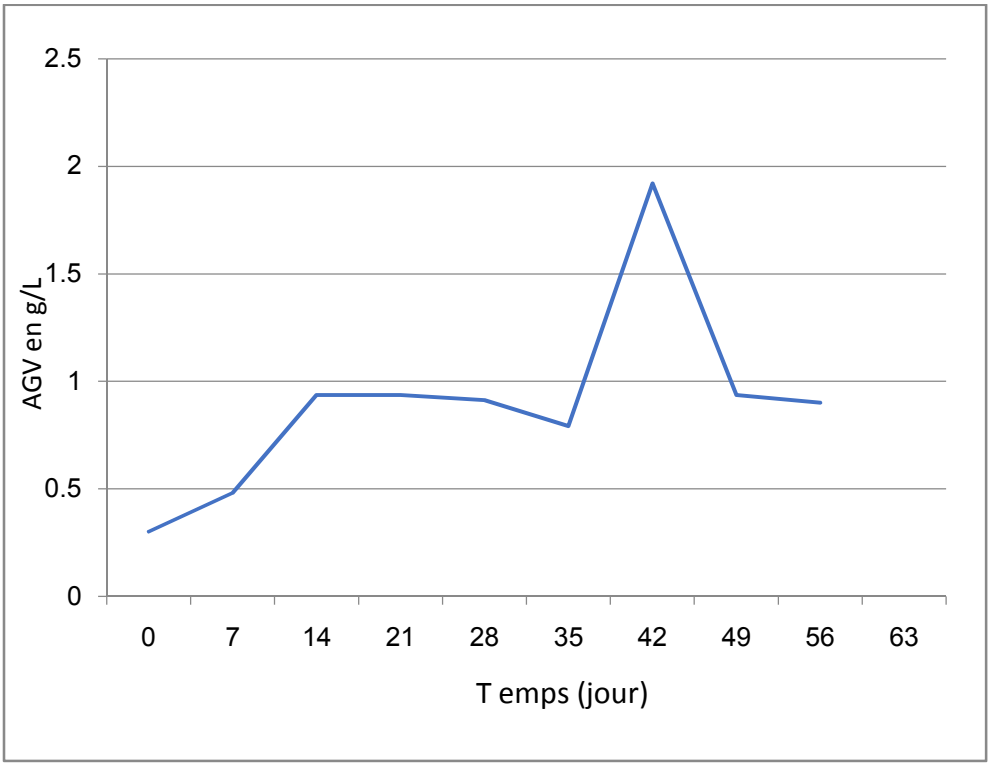

Figure IV.2 : l'évolution des AVG dans le digesteur 0%**.**

Les résultats présentés dans la figure IV.2 montrent qu'il y'a une variation permanente de la concentration des acides gras volatils. D'une manière générale on peut diviser cette courbe en deux parties :

- **La première partie**

Dés le début de la réaction nous avons remarqué une augmentation exponentielle des AGV à une valeur maximale de 1.92 g/L au 42ème jour. Cette augmentation rapide est le résultat de la décomposition de la matière organique. Cette rapidité de décomposition est due à la nature des déchets qui sont facilement biodégradable par l'action des bactéries hydrolytiques et acidogènes qui décomposent la matière organique et libèrent très rapidement des acides gras volatils dans le milieu.Cette phase de production des AGV correspond à la phase « hydrolyse acidogénèse ».

- **La deuxième partie**

La concentration des AGV diminue à partir du 42 ème jour, cela est dû à la consommation des AGV par les bactéries d'une part, et la transformation de ces acides en acétate « phase acédogénèse » puis en biogaz (phase méthanogénèse) d'autre part.

IV.2.1.3 L'evolution de TAC

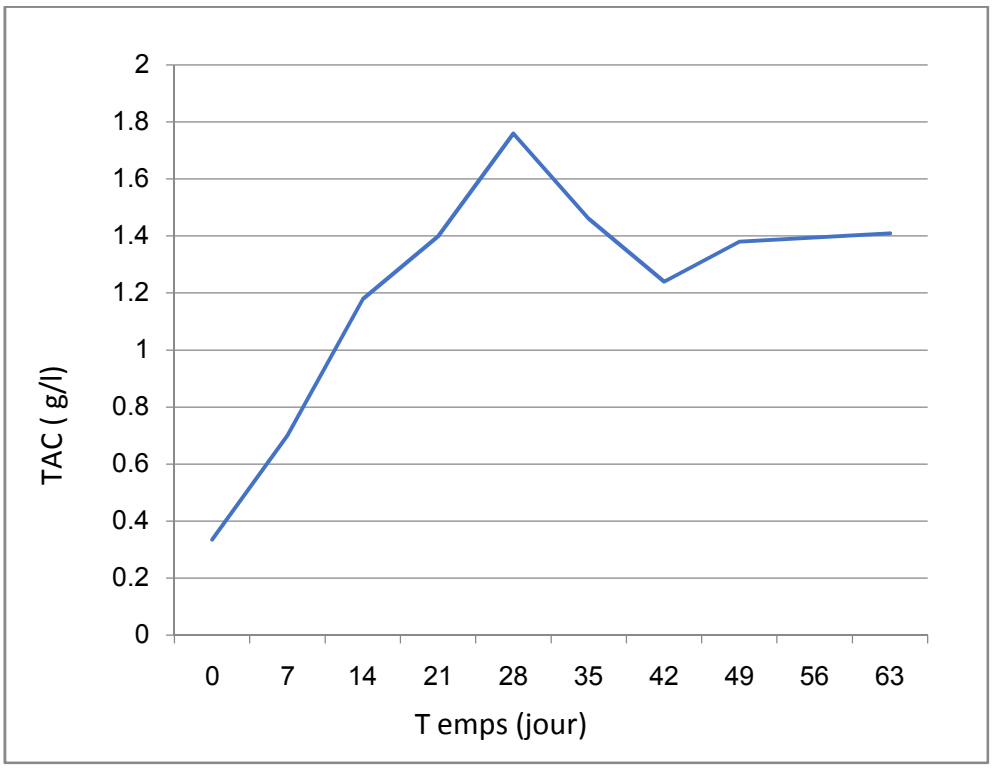

Figure IV.3 : l'évolution des TAC dans le digesteur 0%.

Le titre alcalimétrique représente l'alcalinité du milieu. Cette dernière est la capacité du milieu à réagir pour neutraliser les acides en solution.

Dans notre cas, on observe une augmentation de TAC jusqu'à 1.76 g/l au 28^{éme} journée. Cela signifie que le procédé est apte à s'opposer aux fortes fluctuations du pH. Inversement, si l'alcalinité est insuffisante, cela signifie que le pouvoir tampon ne saurait faire face à une augmentation brutale de la concentration en AGV.

IV.2.1.4 La variation du rapport AGV/TAC

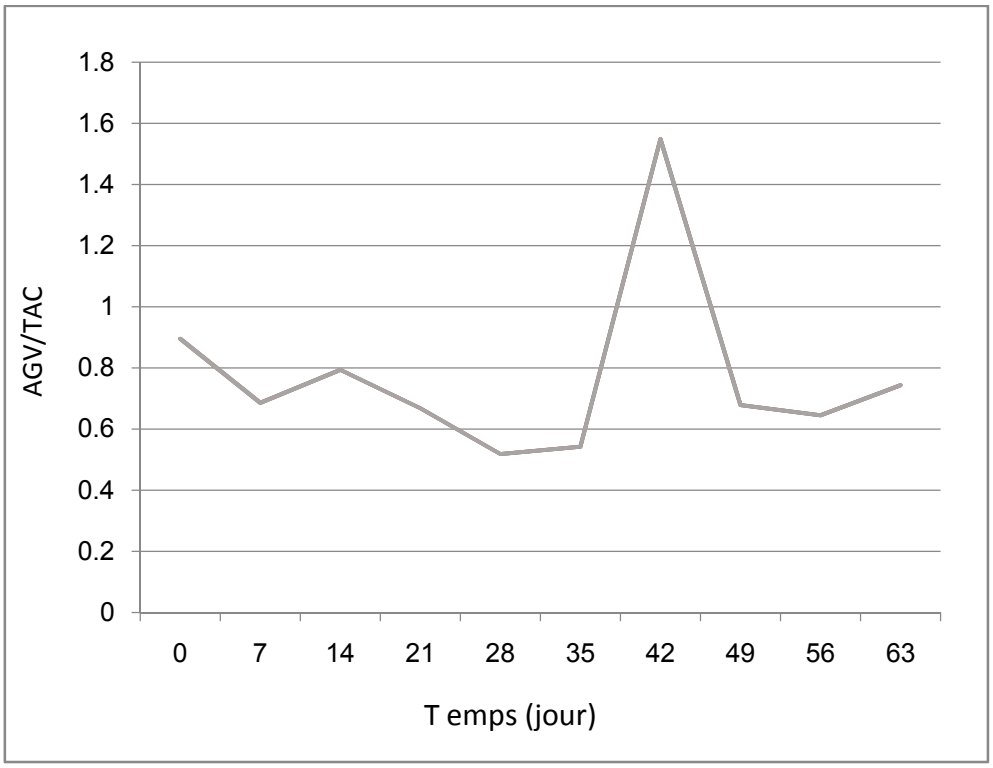

Figure IV.4 : la variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur 0%.

La variation du rapport AGV/TAC au début de la digestion montre également des mauvaises valeurs de ce rapport (0,89) du à la production rapide des AGV dans le milieu avec faible valeur de TAC et ça peut influencer négativement sur le processus, et par suit on a remarque une valeur élevée de ce rapport elle dépasse 1.5 mais malgré ça la production du biogaz est continuée. Ces valeurs de ce rapport ont commencé à s'améliorer petit à petit au cours de la digestion.

IV.2.1.5 La production de biogaz

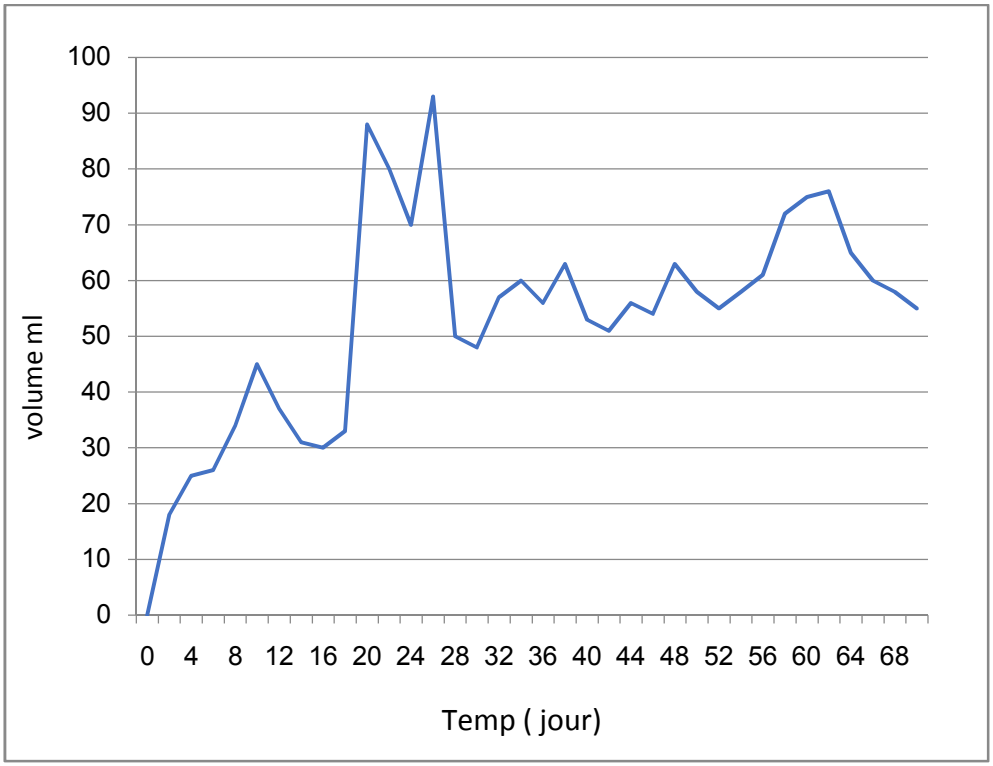

Figure IV.5 : l'évolution du biogaz dans le digesteur 0%.

La production du biogaz est bien mise en évidence dans la figure 5. Les fluctuations au début de la digestion est une chose tout à fait courante, elle est expliquée par la production des acides gras volatiles et le dioxyde de carbone libérés. Chose qui a été remarquée dans notre cas durant les quarante premiers jours de la digestion. Au-delà, l'augmentation du volume de biogaz produit est accentuée jusqu'à atteindre une valeur maximale de 93ml

IV.2.2 Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 1%

IV.2.2.1 Évolution du pH

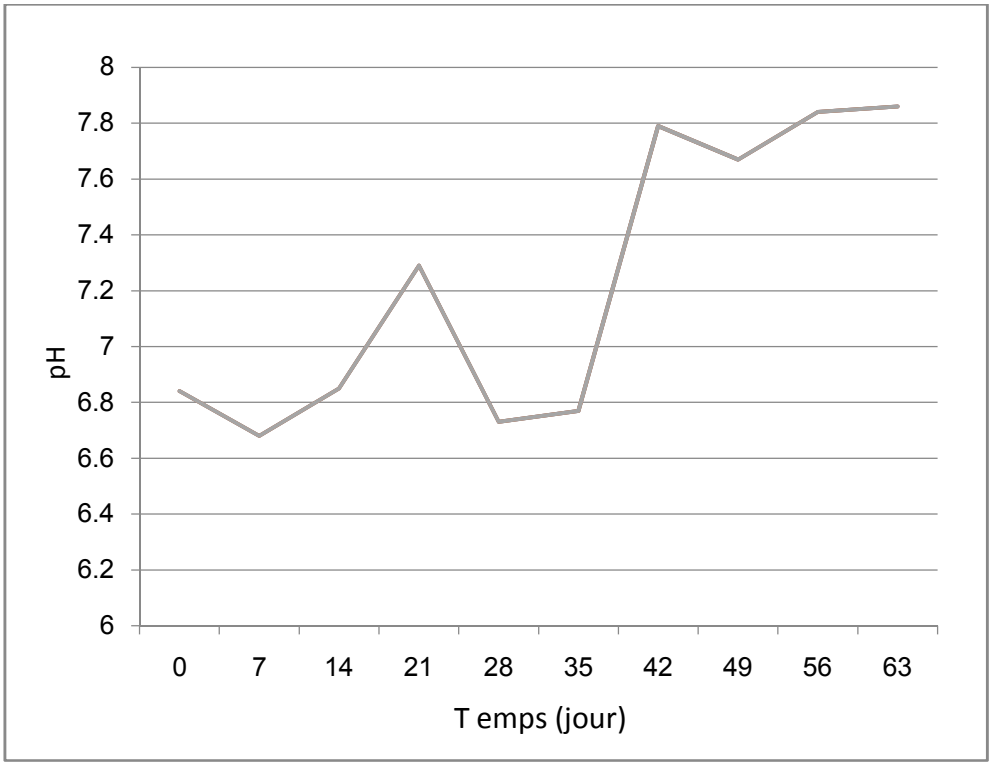

Figure IV.6 l'évolution du biogaz dans le digesteur 1%.

La courbe d'évolution du pH pour le digesteur 1 %, peut être divisée en trois parties ;

- **La première partie**

Une petite chute des valeurs de pH a été remarqué au début de procédé (de 6,84 jusqu'à 6,68)

- **La deuxième partie**

Dans la deuxième partie, on peut remarquer que les valeurs de pH ont commencé à augmenter légèrement. Ceci est observé à partir du 8^{éme} jour et se poursuit jusqu'au 2^{éme} jour (de 6,68 jusqu'à 7,29).

- **La troisième partie**

Dans cette partie, on peut remarquer qu'il y'a une variation des valeurs de pH. À partir du 21^{éme} jour pour le digesteur 1% jusqu'à la fin de processus (entre 6.73 et 7,67).

IV.2.2.2 L'évolution des AVG

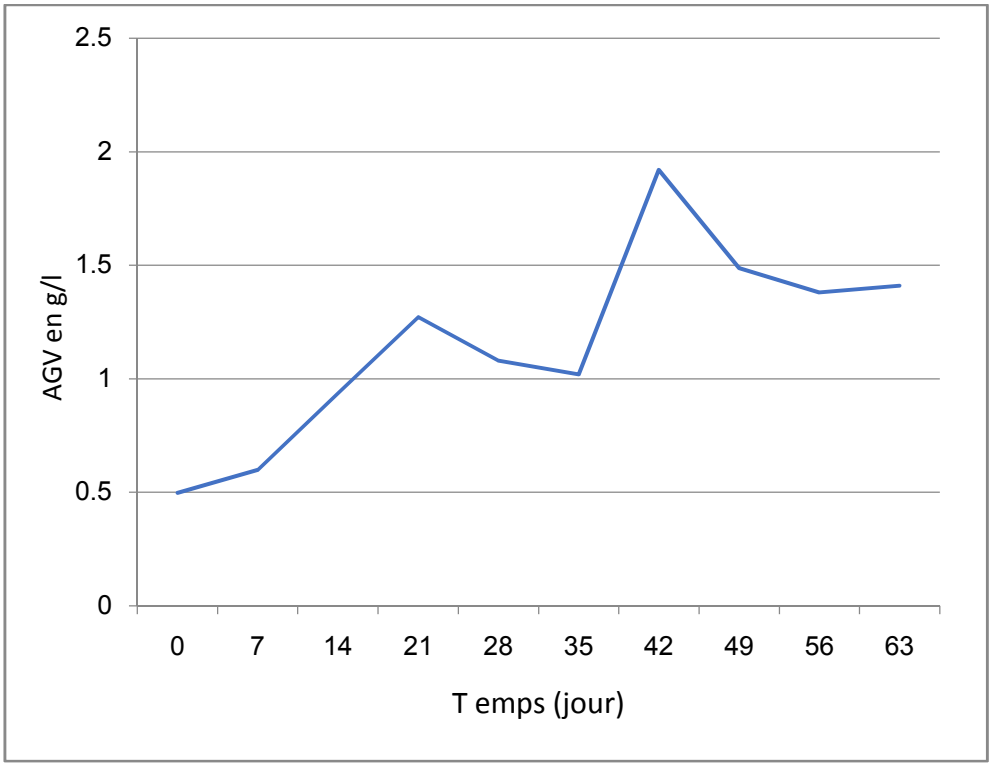

Figure IV.7 : l'évolution des AVG dans le digesteur 1%.

On peut diviser cette courbe en deux parties :

- **La première partie**

Une augmentation rapide de la concentration des acides gras volatils dans le milieu, à partir du 1er jusqu'à le 14^{éme} jour.

- **La deuxième partie**

Augmentation et diminution continue de la concentration des acides gras volatils a été remarqué, ceci est observé à partir du 15^{éme} jusqu'au 63^{éme} jour.

IV.2.2.3 L'évolution de TAC

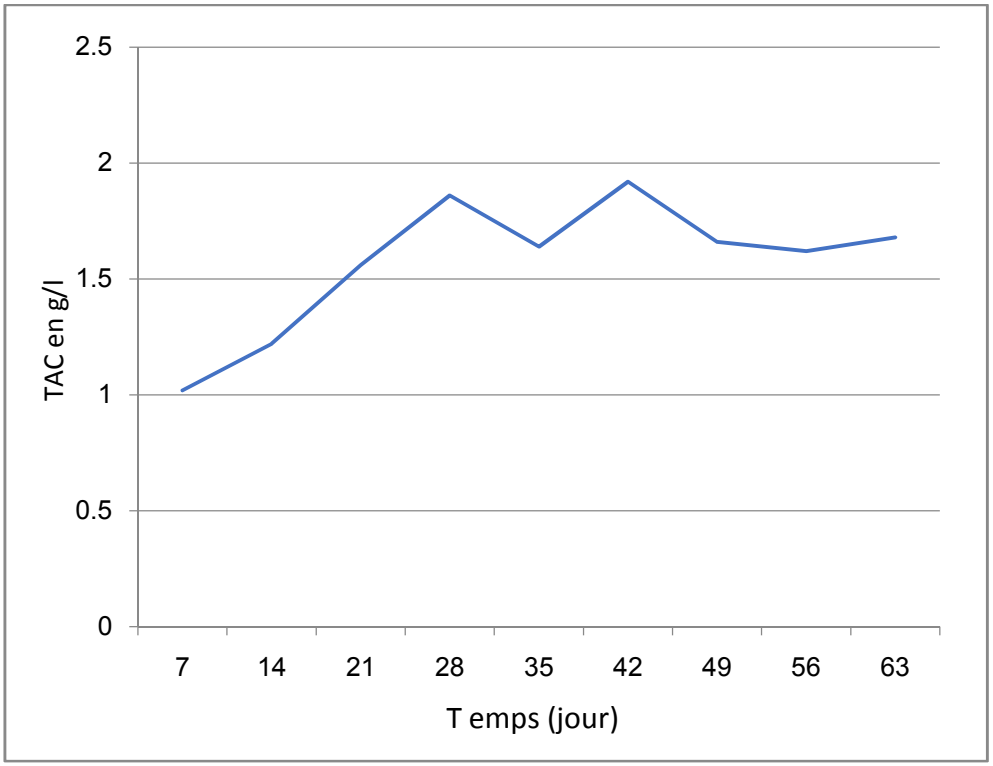

Figure IV.8 : l'évolution des TAC dans le digesteur 1%.

Au début de la digestion anaérobie, on a noté des valeurs faibles du titre alcalimétrique (> 1,2 g/l). Après, on a observé une augmentation assez importante des valeurs du titre alcalimétrique complet jusqu'à une valeur maximale de 1.92 g/l.

IV.2.2.4 La variation du rapport AGV/TAC

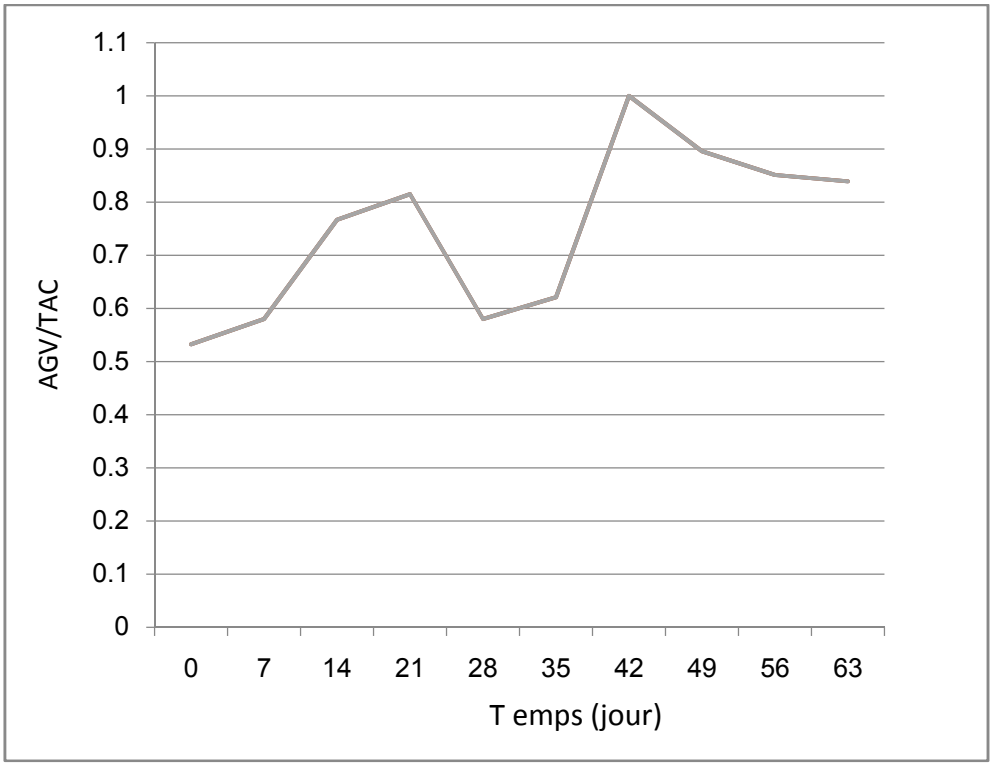

Figure IV.9 : la variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur 1%.

Au début de la digestion, on a marqué des valeurs acceptables de ce rapport varié entre 0.4 et 0.8. Après, on a enregistré des mauvaise valeurs atteint jusqu'à 1, ce qui permet de bloquer le processus.

IV.2.2.5 La production de biogaz

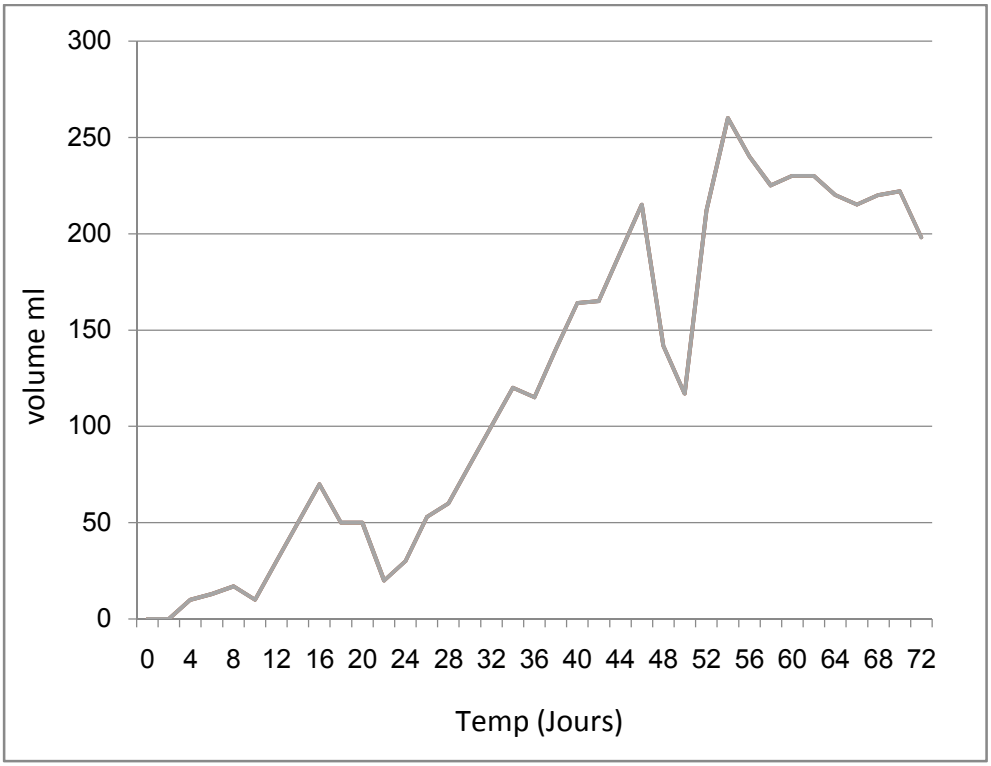

Figure IV.10: l'évolution du biogaz dans le digesteur 1%.

La figure IV.10 peut se diviser en trois phases :

- **La première phase**

Une production très faible du biogaz a été remarquée au début de la digestion anaérobie, elle intervient à partir du 1er jusqu'au 14^{éme} jour, estimée à 50 ml. Cette faible production, même en présence d'une importante concentration en acides gras volatils dans le milieu, peut nous renseigner que la phase méthanogénèse n'a pas encore commencer.

On peut même diviser cette phase en deux ;

- À partir du 1er jusqu'au 3^{éme} jour, la production de biogaz est nulle.
- À partir du 4^{éme} jusqu'au 14^{éme} jour, il y'a une faible production de biogaz.

- **La deuxième phase**

À partir du 14^{éme} jusqu'au 54^{éme} jour, il y'a un début de production importante de biogaz en proportions variables, donc c'est la transformation des acides gras volatils en méthane et en gaz carbonique. Ça peut nous donner aussi une idée sur les étapes de la méthanisation qui sont arrivées à l'étape responsable de la production de biogaz d'une part, et d'autre part, on peut dire que tous les autres étapes sont déjà accomplies avant cette période, c'est à dire avant le 14 éme jour.

- **La troisième phase**

À partir de 54^{éme} jusqu'à la fin de la méthanisation, on peut noter une très faible production du biogaz identique à celle observée dans la première phase. On peut expliquer ce phénomène par l'épuisement des acides gras volatils dans le milieu et donc l'épuisement du substrat d'une manière générale et le déséquilibre du milieu de culture

IV.2.3 Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 5%

IV.2.3.1 Évolution du pH

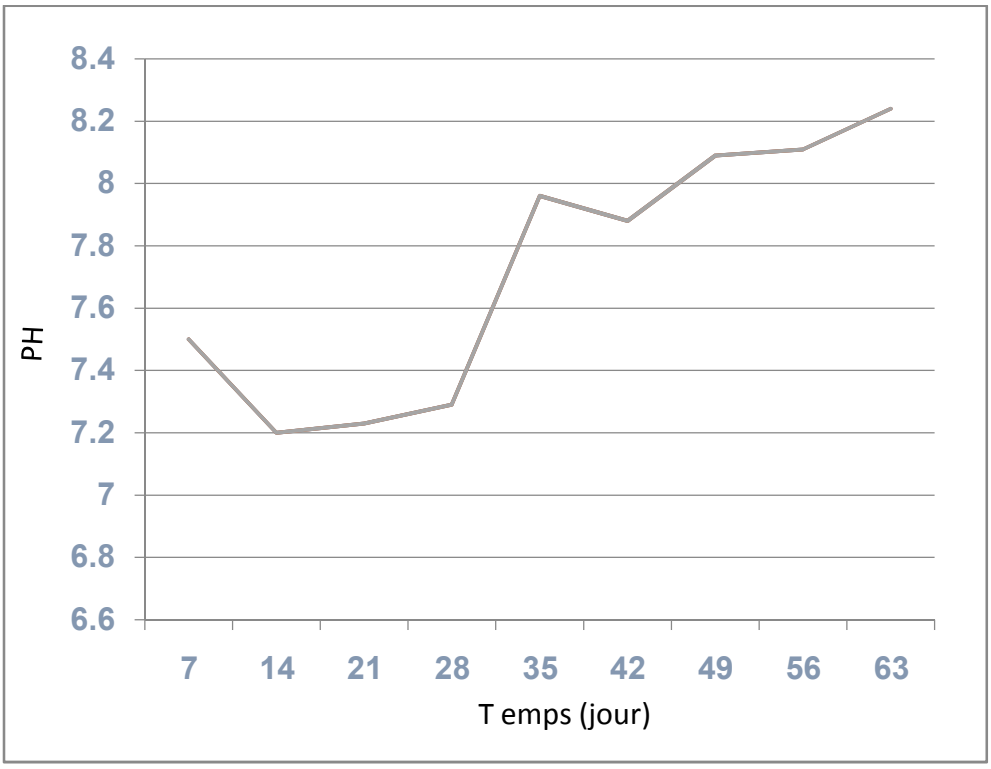

Figure IV.11: l'évolution du pH dans le digesteur 5%

On peut diviser la courbe que nous avons 3 phases différentes

- **1er phase**

On note une chute rapide de la valeur du pH t au cours de la première semaine de procédure.

- **2éme phase**

Dans la deuxième partie, on peut remarquer que les valeurs de pH ont commencé à augmenter petit à petit, ceci est observé à partir du 14éme jour et se poursuit jusqu'au 35éme jour (de 7,2 jusqu'à 7,96).

- **3éme phase**

Dans cette partie, on peut remarquer qu'il y'a une stabilisation des valeurs de pH. À partir du 56éme jour jusqu'à la fin de processus (entre 8.11 et 8.13).

IV.2.3.2 L'évolution des AGV

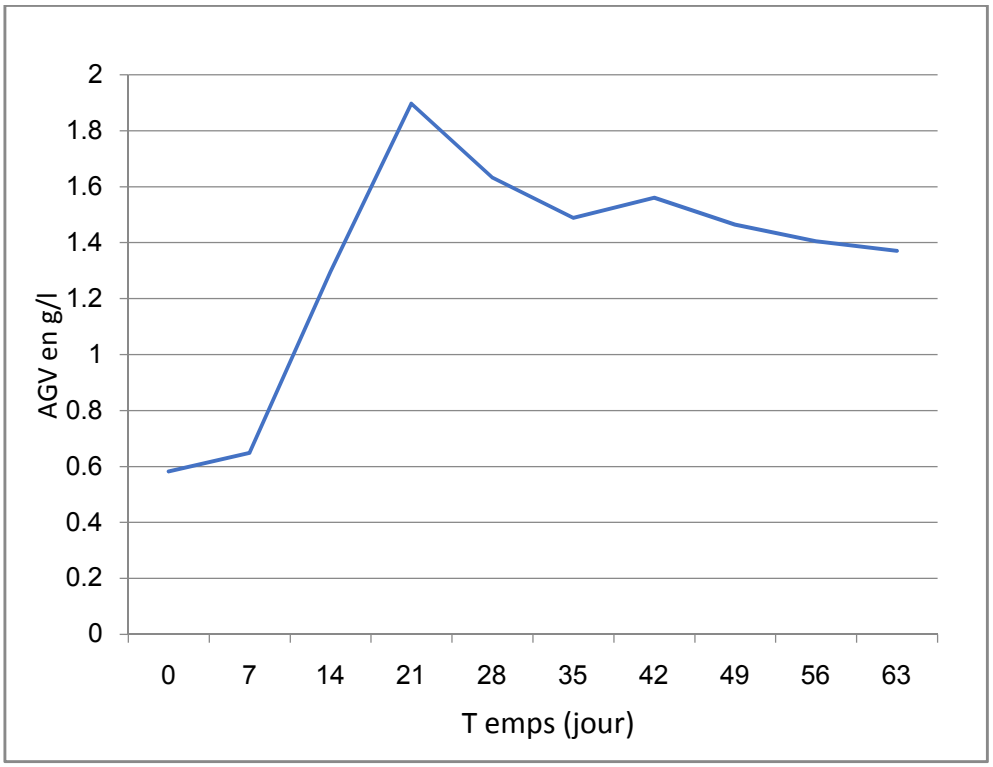

Figure IV.12 : l'évolution des AVG dans le digesteur 5%.

On peut diviser cette courbe en deux parties :

- **La première partie**

Une augmentation rapide de la concentration des acides gras volatils dans le milieu, à partir du 1er jusqu'à le 21^{éme} jour, ce qui se répercute directement sur les valeurs de pH qui ont évolué vers des valeurs acides.

- **La deuxième partie**

Ce qui distingue cette deuxième partie, c'est l'augmentation puis la diminution continue de la concentration des acides gras volatils dans le milieu, ceci est observé à partir du 23^{éme} jusqu'au 56^{éme} jour pour le digesteur de 5%.

IV.2.3.3 L'évolution de TAC

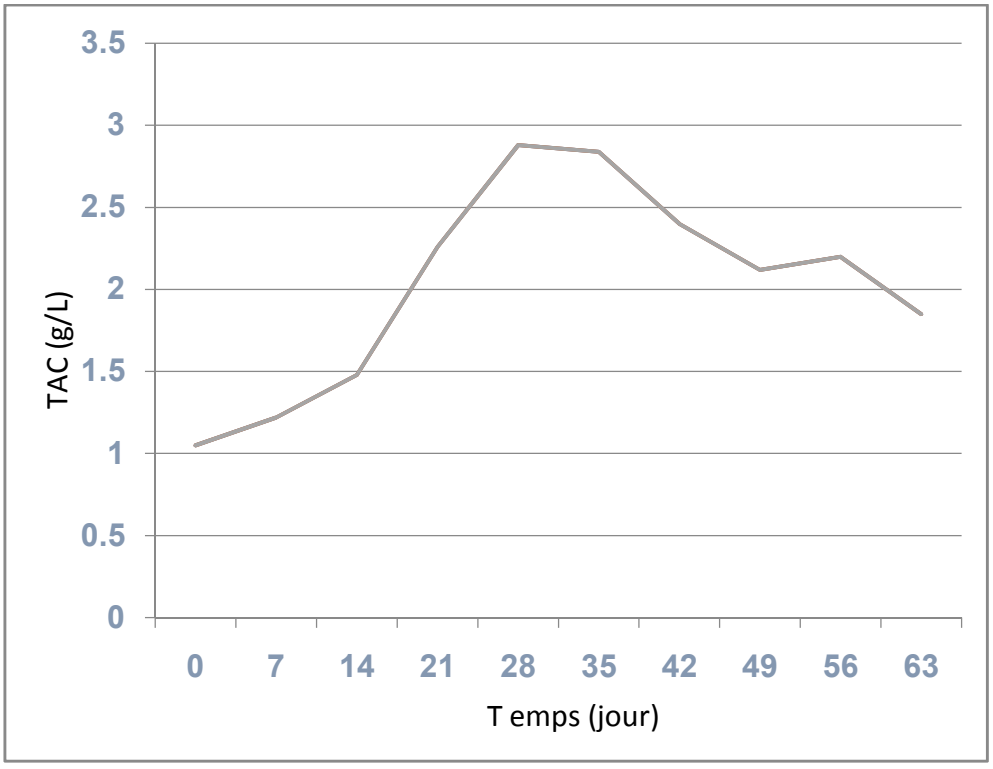

Figure IV.13 : l'évolution des TAC dans le digesteur 5%

Au début de la digestion anaérobie, on a noté des valeurs faibles du titre alcalimétrique (> 1,5 g/l), qui commence à augmenter jusqu'à une valeur maximale de 2.89 g/l.

IV.2.3.4 La variation du rapport AGV/TAC

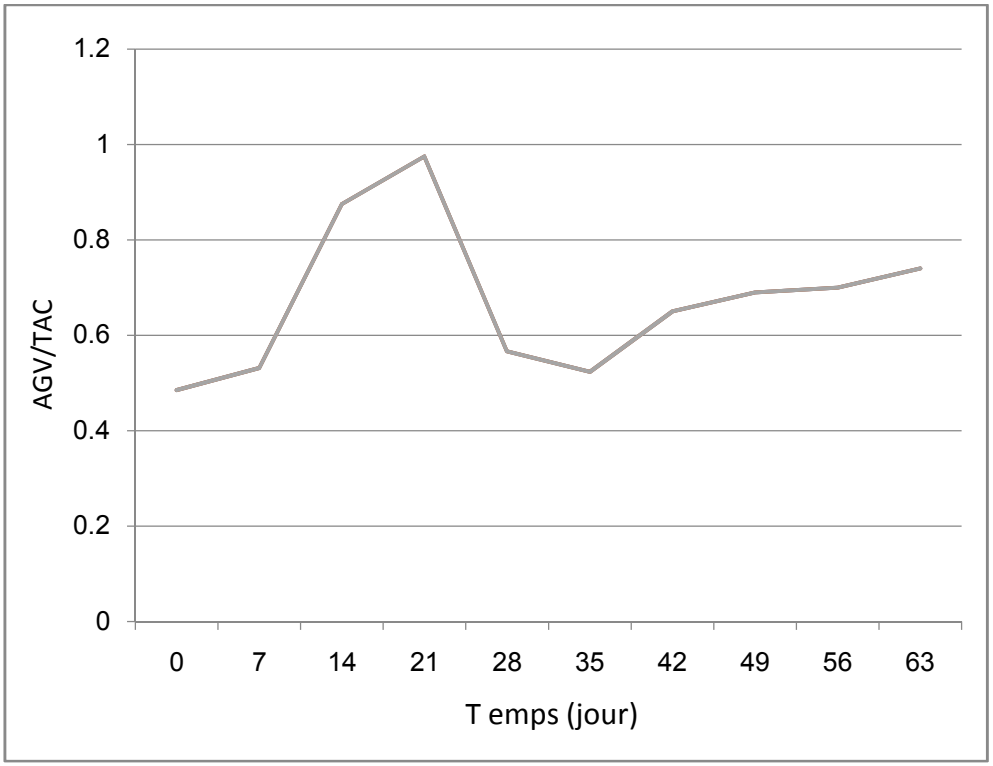

Figure IV.14 : la variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur 5%.

La variation du rapport AGV/TAC montre des valeurs moyenne de ce rapport pendant toute la période de la digestion comprise entre 0.485 et 0.975.

IV.2.3.5 La production de biogaz

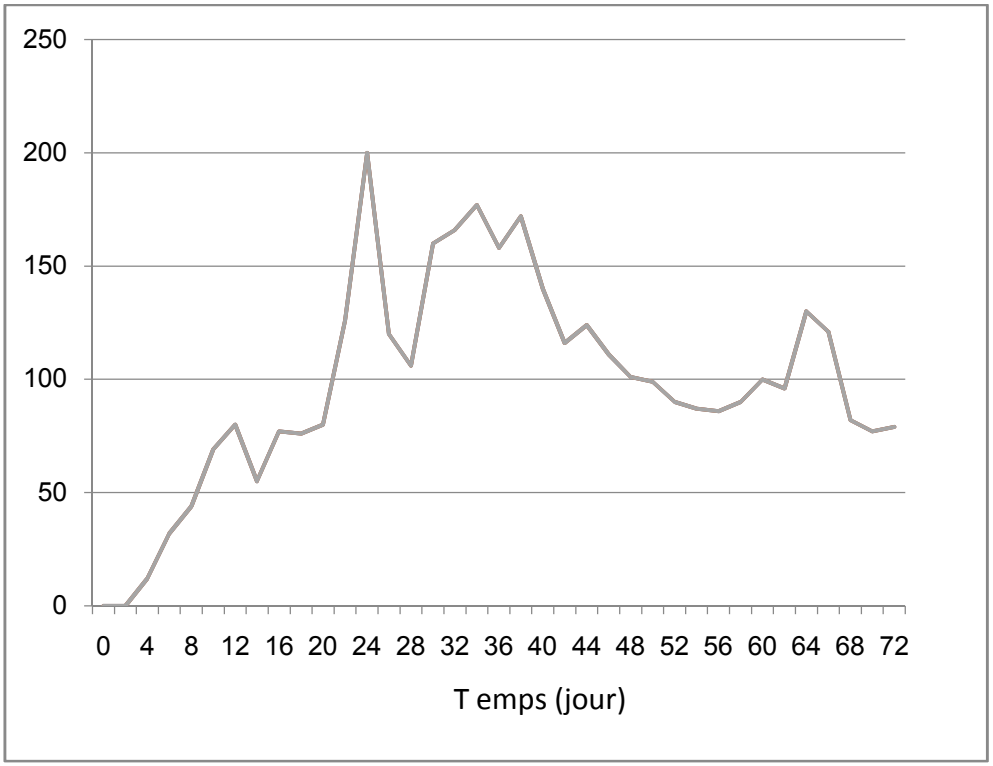

Figure IV.15 : l'évolution du biogaz dans le digesteur 5% MS.

À partir de cette figure précédente, on peut diviser la production du biogaz en trois phases :

- **La première phase**

Une production faible du biogaz a été remarquée au début de la digestion anaérobie, elle intervient à partir du 1er jusqu'au 12^{éme} jour, estimée à 80 ml.

- **La deuxième phase**

À partir du 16^{éme} jusqu'au 20^{éme} jour, il y'a un début de production importante de biogaz en proportions variables.

- **La troisième phase**

À partir de 50^{éme} jusqu'à la 72^{éme} jour, on peut noter une faible production du biogaz identique à celle observée dans la première phase.

IV.2.4. Évolution des paramètres de fonctionnement pour le digesteur 7.5%

IV.2.4.1 Évolution du pH

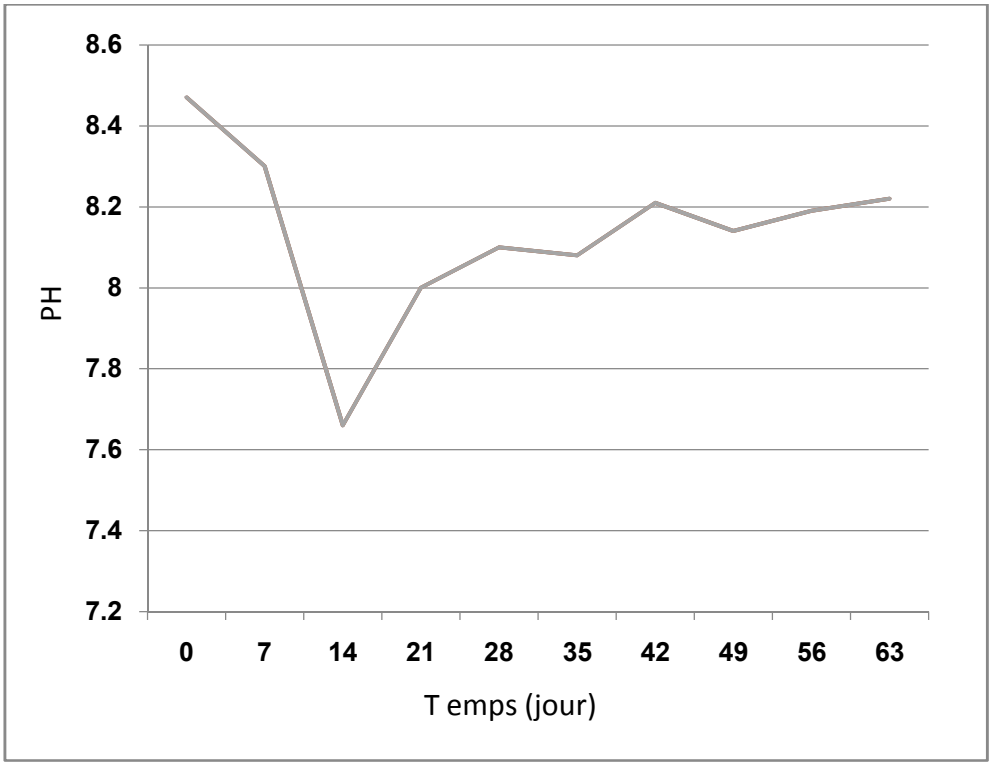

Figure IV.16 : l'évolution du pH dans le digesteur 7.5%

Ce courbe du pH pour le digesteur 7.5%, peut se diviser en trois parties ;

- **La première partie**

Une chute des valeurs de pH ont été remarqué au début de procédé de 8.47 jusqu'à 7.66.

- **La deuxième partie**

Une augmentation de ces valeurs a été remarqué à partir du 14^{éme} jour et se poursuit jusqu'au 21^{éme} jour (de 7,66 jusqu'à 8.0).

- **La troisième partie**

Dans cette partie, on peut remarquer qu'il y'à une stabilisation des valeurs de pH, à partir du 21^{éme} jour pour le digesteur 7.5% jusqu'à la fin de processus (entre 8.1 et 8.22).

IV.2.4.2 L'évolution des AGV

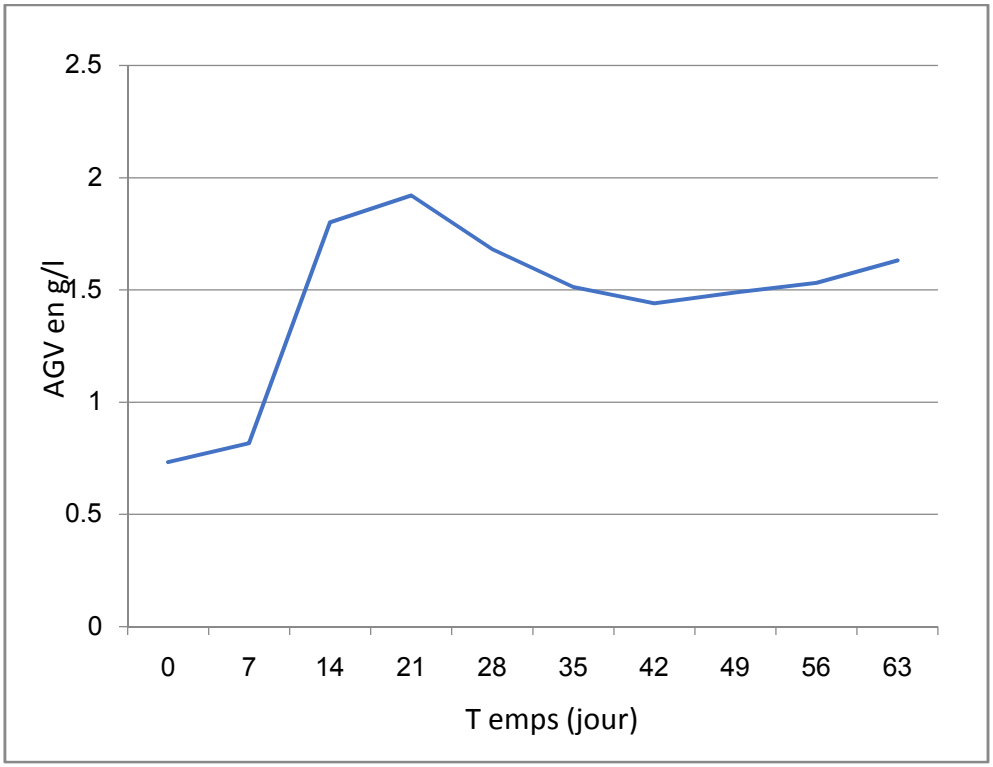

Figure IV.17 : l'évolution des AVG dans le digesteur 7.5%.

Les résultats présentés dans la figure peuvent se diviser en deux parties :

- **La première partie**

Une augmentation rapide de la concentration des acides gras volatils dans le milieu, à partir du 1er jusqu'à le 21^{éme} jour.

- **La deuxième partie**

Augmentation et diminution continue de la concentration des acides gras volatils a été remarqué, ceci est observé à partir du 21^{éme} jusqu'au 63^{éme} jour pour le digesteur de 7.5% MS.

IV.2.4.3 L'évolution de TAC

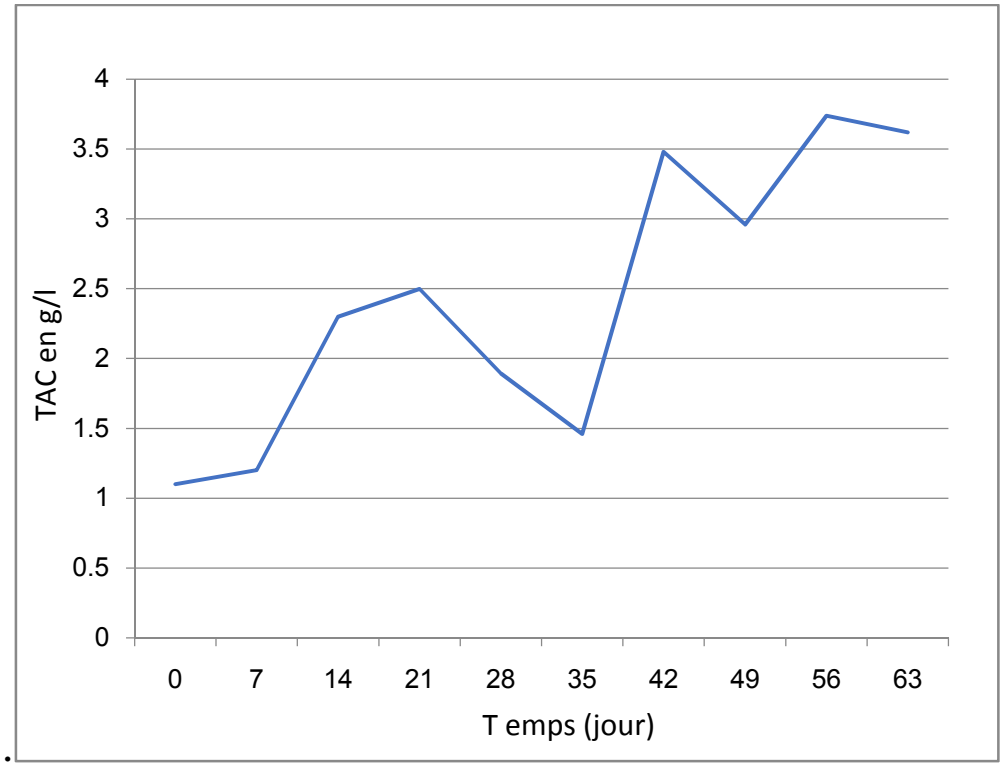

Figure IV.18 : l'évolution du TAC dans le digesteur 7.5%.

Au début de la digestion anaérobie, on a noté des valeurs faibles du titre alcalimétrique (>2.5 g/l). Après, on a observé une augmentation assez importante des valeurs du titre alcalimétrique complet avec une valeur maximale de 3.8 g/l.

IV.2.4.4 La variation du rapport AGV/TAC

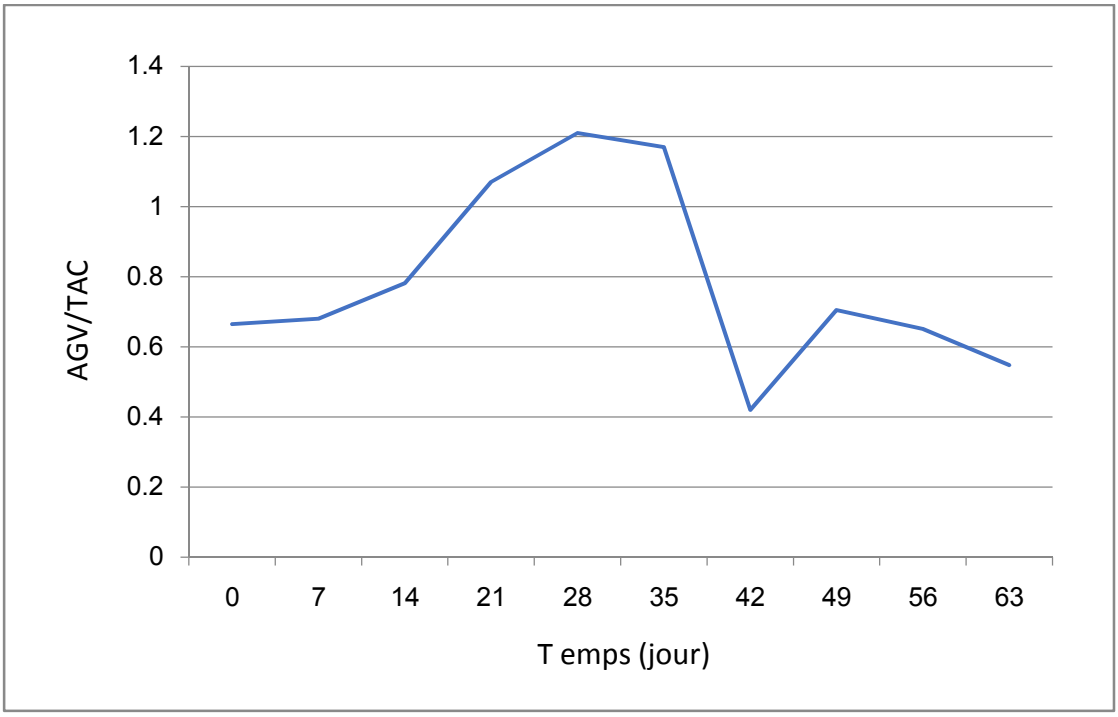

Figure IV.19: l'évolution de AGV/TAC dans le digesteur 7.5%

La variation du rapport AGV/TAC montre des bonnes valeurs de ce rapport dans la plupart du temps au cours de la digestion sauf quelques valeurs ou on elle atteint les 1.1.

IV.2.4.5 La production de biogaz

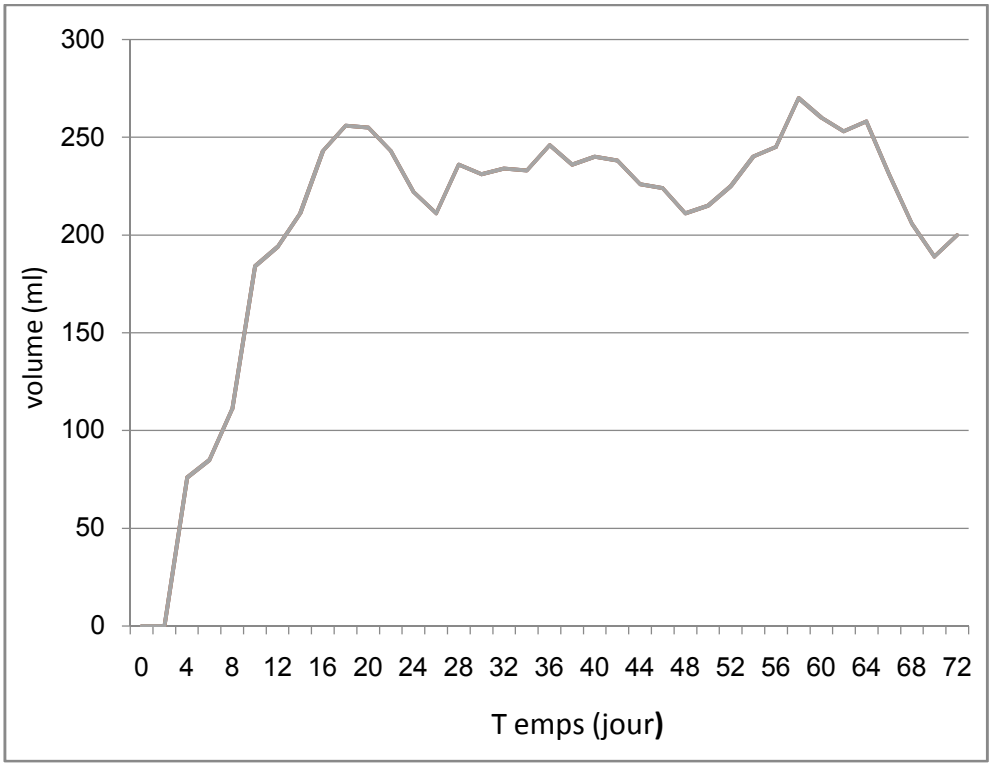

Figure IV.20 : l'évolution du biogaz dans le digesteur 7.5 % MS

À partir d figures précédentes, on peut diviser la production du biogaz en trois phases :

- **La première phase :**

Une production est nulle du biogaz a été remarquée au début de la digestion anaérobie, elle intervient à partir du 1er jusqu'au 4^{éme} jour.

- **La deuxième phase**

À partir du 6^{éme} jusqu'au 58^{éme} jour, il y'a un début de production importante de biogaz en proportions variables

- **La troisième phase**

À partir de 58^{éme} jusqu'à la 72^{éme} jour, on peut noter une faible production du biogaz identique à celle observée dans la première phase.

IV.3 L'inflammabilité du biogaz

La production du biogaz est l'objectif principal de la méthanisation, mais la qualité de ce biogaz joue aussi un rôle très important pour la valorisation ultérieure de ce biogaz. Dans notre étude, la détermination de la qualité du biogaz produit est faite de manière très simple ou le gaz est enflammé.

Tableau IV 3 : le suivi de l'inflammabilité du biogaz.

Le digesteur	L'état d'inflammabilité
0% MS	Inflammable à partir de 13^{éme} jusqu'à 72^{éme} jour
1% MS	Inflammable à partir de 15^{éme} jusqu'à 72^{éme} jour
5% MS	Inflammable à partir de 15^{éme} jusqu'à 72^{éme} jour
7.5% MS	Inflammable à partir de 19^{éme} jusqu'à 72^{éme} jour

IV.4 La production totale de biogaz

Tableau IV 4 : le volume total de biogaz

Le digesteur	**Le volume total (ml)**
0 %	3213
1%	4483
5%	3639
7.5%	7638

Conclusion générale

Dans le contexte de protection de l'environnement, le traitement des déchets joue un rôle très important pour la protéger. La digestion anaérobie reste parmi les processus utilisé pour le traitement de ces déchets afin de les stabiliser d'une part, et de produire une énergie renouvelable sous forme du biogaz d'une autre part.

L'augmentation de la production du biogaz à partir de la digestion anaérobie, peut se faire par plusieurs méthodes tout en jouant sur l'un des paramètres. Dans ce travail expérimental, on a étudié l'effet de l'une de ces méthodes considérée parmi les plus efficaces selon plusieurs études, il s'agit de prétraitement chimique alcalin par le KOH pendant 24 h, en utilisant les boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar comme substrat.

Pour cela, 4 digesteurs ont été lancé avec différentes concentration en KOH (p/p) : 0 (non prétraité), 1, 5 et 7.5 % sous condition mésophile.

Les résultats obtenus après 72 jours d'étude, ont montrés qu'il à un effet positif du prétraitement alcalin sur la plupart des paramètres de fonctionnement de la digestion anaérobie, et cela apparait évidement sur le volume du biogaz cumulé pour les cas prétraités ou on a

Ces résultats obtenus durant cette étude reste à confirmer et à approfondir ce qui concerne le temps de prétraitement qui était 24h dans notre travail.

BIBLIOGRAPHIE

1. **Bensmail, L, (2014).** Contribution à la production du biométhane à partir des déchets ménagers de la ville de Bechar. Thèse Doctorat. Université de Bechar.
2. **Domien**. **A, (2006)**. Guide du traitement des déchets. 4 me édition. Éditions Dunod, Paris.
3. **Huffer, E , Nifenecker. H, (2005)**. L'énergie de demain : technique environnement économie. Édition EDP Sciences.
4. **Benyahia. B, (2012).** Modélisation et observation des bioprocédés à membranes : application à la digestion anaérobie .thèse doctorat cotutelle entre université de Tlemcen, Algérie et université de montpeller 2, France.
5. **Riviere, D**, **(2008)**. Comparaison des populations microbiennes de digesteurs anaérobies traitant des boues de station d'épuration : analyse moléculaire de la diversité et de l'activité. Thèse de Doctorat. Université Devry Val Dessonne.
6. **Effibi**. **K, (2009)**. Lagunage anaérobie : modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie, Thèse de Doctorat. Université de Liège Campus d'ARLON.
7. **Marache. L.E, (2001)** 'La méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur le devenir pathogène', thèse de doctorat, université Paul-Sabatier de Toulouse, France.
8. **Guen.le. G, (2003)** 'L'accompagnement des projets de méthanisation : Comment faire émerger des projets de méthanisation agricole dans le contexte actuel ?', Esitpa, école d'ingénieurs en agriculture. France,.
9. **Bochu .J.L, (2003)** Énergies et agriculture – de la maîtrise de l'énergie aux énergies renouvelables, Éditions Educagri,
10. **Almansour . E, (2011)** Bilans énergétiques et environnementaux de filières biogaz :thése de doctorat université de bordeaux .France.
11. **Boulenger. P, & Gallouin. Y, (2009).** Traitements biologiques anaérobies des effluents industriels. Techniques de l'ingénieur, Article/réf G1305, 1-23.
12. **Görisch. U,&Helm, M. (2008).** La production de Biogaz, Ulmer, Paris,
13. **Moletta. R. C, (coord.) (2008)**. La méthanisation. Édition TEC&DOC Lavoisier, Paris.

14. **Ouedrago.R.B**,**(1994)**. Traitement des ordure ménagéres au Sénegal, Thése vétérinaire Dakar.
15. **La farge (De) B(1995),** Le Biogaz, procédés de fermentation méthanique édition Masson .
16. **Goel. R., Mino. T, Satoh. H, Matsuo. T**, **(1998),** Comparison of hydrolytic enzyme systems in pure culture and activated sludge under different electron acceptor conditions. Water Science and Technology. University, Grahamstown , South Africa.
17. **Batstone. D.J, Keller. J, Angelidaki. I. Kalyuzhnyi. S, Pavlostathis, S.G, Rozzi. A, Sanders. W, Siegriest. H, Vavilin. V.A., (2002)**, The iwa anaerobic digestion model n°1 (adm1). Water Science and Technology
18. **Guendouz, J, (2008)**. Contribution à la recherche d'outils pour l'étude et le suivi des réacteurs de méthanisation par voie sèche. Montpellier, Montpellier II. Energétique et Génie des procédés.
19. **Zhang. B, He. P.-J, Lü. F, Shao, L.-M, eWang, P., (2007),** Extracellular enzyme activities during regulated hydrolysis of high-solid organic waste**.**
20. **Tong. X, Smith. L.H, McCarthy, P.L., (1990),** Methane fermentation of selected lignocellulosic materials. Biomass
21. **Sanders. W**, (2001). Anaerobic hydrolysis during digestion of complex substrates. Wageningen,
22. **Cirne. D.G, Paloumet. X, Bjornsson. L, Alves. M.M. , Mattiasson, B(2007)** ,Anaerobic digestion of lipid-rich waste - effects of lipid concentration.
23. **BOLLON. J (2012)**, Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche : essais expérimentaux et modélisation ,these de doctorat , Ecole doctorale de Chimie de Lyon (Chimie, Procédés, Environnement).
24. **Boutouta .I, (2012),** valorisation énergétique des déchets solides urbains de la ville de Blida, mémoire de master Université de Blida, Blida, Algérie.
25. **Derbal.K,(2015)** digestion anaérobie des déchets solides mélanges avec les boues de station d'épuration ,mémoire doctorat science en génie de l'environnement l'Université Mentouri de Constantine

ملخص

يركز هذا البحث على الدراسة العملية لتأثير المعالجة الكيميائية القلوية باستعمال هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) على التخمر اللاهوائي لأوحال محطة معالجة مياه الصرف الصحي لمدينة أدرار تحت درجة حرارة (35 م°). عدة تركيزات مختلفة من KOH تم اختبارها 0، 1، 5 و ٪7.5 (و / و) لمدة 24 س. بعد 72 يوما من المتابعة، أظهرت النتائج المتحصل عليها أن للمعالجة القلوية تأثير إيجابي على إنتاج الغاز الحيوي أين تم الحصول على 3213 مل من الغاز الحيوي في حالة عدم المعالجة و7638 مل في حالة المعالجة بـ 7.5٪ من KOH .

Résumé

Ce travail de recherche porte sur l'étude expérimentale de l'effet du prétraitement chimique alcaline par l'hydroxyde de potassium (KOH) sur la digestion anaérobie des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar en condition mésophile (35 °C). Des différents concentrations de KOH ont été testées : 0, 1, 5 et 7.5 % (p / p) pendant 24 h. Après 72 jours de suivre, les résultats obtenus ont montré qu'il y à un effet positif du prétraitement alcalin sur la production du biogaz ou on a obtenus un volume du biogaz égal à 3213 ml pour le cas non traité et de 7638 ml pour le cas traité avec 7.5 % de KOH.

Abstract

This research focuses on the experimental study of the effect of alkaline chemical pretreatment by potassium hydroxide (KOH) on the anaerobic digestion of sludge of Adrar lagoon station Under mesophilic conditions (35 °C). Various concentrations of KOH were tested: 0, 1, 5 and 7.5% (w / w) for 24 h. After 72 days of following, the results showed that there was a positive effect of alkaline pretreatment on the production of the biogas where a volume of biogas equal to 3213 ml got for the untreated case and 7638 ml for the case treated with 7.5% KOH.