

# UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR : Sciences et Technologies

Département de Physique

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux

**Mémoire de Master**

---

## **Caractérisation Biochimique de Résidus de Biomasse pour la Production de Biogaz**

---

Présenté par :

**Cheikh Oumar SALL**

Sous la direction de :

**Dr Lat Grand NDIAYE**

Soutenu publiquement le 10 juin 2019 devant le jury composé par :

Noms et Prénoms	Grade	Qualité	Etablissement
Diouma KOBOR	Professeur	Président de jury	UASZ/ST
Bassirou SARR	Ingénieur	Rapporteur	PNB-SN/UASZ
Abdoulaye GASSAMA	Maître de conférences	Examineur	UASZ/ST
Samo DIATTA	Maître-Assistant	Examineur	UASZ/ST
Lat Grand NDIAYE	Maître de conférences	Directeur de mémoire	UASZ/ST

# Dédicaces

Je dédie ce Travail

A mes chers parents, ma mère Diéynaba et mon père Mamadou pour leur amour, leur soutien

A mon frère Samba et ma sœur Hawa pour leurs encouragements

A mes chères grandes mères Coura, khardiata et Rougui

A mes chers grands-pères Souleymane et Demba

A mes tantes Oulimata, Coura, Aminata,...

A mes oncles Ndongo, Abdoulaye, Gorgui, Amadou, Sada, Seydou, Ibrahima,...

A mes cousins Mamadou, Alassane, Ousmane, Bekkaye,...

A tout (e)s mes ami(e)s de la spécialité Physique des Matériaux

A mes tuteurs Idrissa, Saly, Tapha, Aramata

A toute ma famille paternelle et maternelle

A ceux que j'aime et surtout qui m'aiment

## Remerciements

Avant tout, je commence par remercier le bon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de pouvoir réaliser ce travail de mémoire.

Je remercie également les personnes qui m'ont apporté leur soutien durant la réalisation de ce mémoire de master.

Mes sincères remerciements au **Dr. Lat Grand NDIAYE**, qui a accepté de diriger et donner l'orientation de ce travail. La pertinence de ses conseils, sa méthodologie et sa rigueur scientifique ont accompagné l'aboutissement de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude envers **Pr. Diouma KOBOR, M. Bassirou SARR, Dr. Abdoulaye GASSAMA et Dr. Samo DIATTA** qui m'ont fait honneur d'être les membres du jury de ce travail de mémoire de master, vos remarques et suggestions me sont d'un grand intérêt.

Mes vifs remerciements à tous les enseignants de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) des sciences et de la technologie de l'université Assane Seck de Ziguinchor en particulier ceux des départements physique, chimique, mathématique et informatique, ma reconnaissance envers mes maîtres et professeurs de l'élémentaire au lycée qui ont contribué à mon épanouissement scolaire.

Je tiens à remercier aussi tous les docteurs, doctorants et doctorantes du département de physique des matériaux qui m'ont apporté leurs soutiens, leurs conseils.

Merci à **M. Omar Kata FAYE, M. Moussa TOURE et M. Jean Baptiste MANSALY** qui m'ont aidé à mieux comprendre mes expériences, sans eux je n'aurais pas pu mener à bien la partie expérimentale, je leurs exprime ma profonde gratitude.

Aux étudiants de master physique et chimique avec qui j'ai partagé la vie estudiantine.

Je remercie également les responsables des laboratoires de notre département et de la chimie en particulier **M.YOCK** et **Mme CAMARA**.

A mon père, à ma mère, grands-pères, mes grandes mères, à mes frères et sœurs Souleymane SOUMARE, Ndongo Amadou AMAR, Samba SALL, Mamadou SALL, Alassane SALL, Hawa SALL, Aissata SALL, une vive reconnaissance pour votre soutien durant mes études.

A mes tuteurs, oncles, tantes, cousin(e)s, neveux et nièces en l'occurrence Idrissa NDIAYE, Tapha NDIAYE, Saly NDIAYE, Aramata MANGA, Amadou SOUMARE, Sada SOUMARE, Oumar SALL, Abdoulaye SOUMARE, Gorgui SOUMARE, Oulimata SOUMARE, Aminata SOUMARE, , diéynaba SALL, Mariane SOUMARE, la famille LY, famille KANE, Alioune NDIAYE, Ami SALL,...Merci de tout cœur.

En fin, je remercie toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce travail de mémoire.

Résumé

Le biogaz est le résultat de la biométhanisation des matières organiques. Dans ce travail, nous avons entrepris une série d'expériences pour caractériser les différents résidus de biomasse pour la production de biogaz. Des échantillons de résidus de bouse de vache sont collectés au niveau du marché à bétails et les déchets ménagers organiques sont collectés dans le restaurant de l'université Assane Seck de Ziguinchor. L'étude des paramètres physico-chimiques a été réalisée à l'aide des méthodes standards et le biogaz a été mesuré par un analyseur (Optima7 Biogaz). La caractérisation physico-chimique des échantillons de bouse de vache et de déchets ménagers organiques donne respectivement, pour le pH 7,1 et 6,2, pour l'humidité (H) 78,013 % et 70,063 %, pour le taux de matières sèches (MS) 21,987 % et 29,937 %, pour le taux de matière volatile (MV) 80,150 % et 96,398 %, pour le taux des cendres (Ce) 19,850 % et 3,602 %, pour le taux de carbone total (CT) 46,063 % et 55,401 %, pour le taux d'azote organique (N) 1,457 % et pour le rapport Carbone sur Azote (C/N) 31,615 de bouse de vache. Durant le processus de la biométhanisation en phase mésophile les substrats de la bouse de vache et des déchets ménagers ont respectivement une température de 37 °C et 40 °C, ont permis de produire, durant 34 jours, 157,9 cm<sup>3</sup> de biogaz à partir de 3 kilogrammes et 23 jours, 373,61 cm<sup>3</sup> de biogaz à partir de 1 kilogramme . La composition du biogaz pour la bouse de vache et de déchets ménagers est respectivement de 27,08 % et 0,33 % de méthane ; de 12,84 % et 38,26 % de dioxyde de carbone.

Mots clés : Biométhanisation, Caractérisations, Bouse de vache, Déchets ménagers organiques

### Summary

Biogas is the result of the biomethanization of organic matter. In this work, we undertook a series of experiments to characterize the different biomass residues for biogas production. Samples of cow dung residues are collected at the livestock market and organic household waste is collected in the restaurant of Assane Seck University in Ziguinchor. The study of physico-chemical parameters was carried out using standard methods and the biogas was measured by an analyser (Optima7 Biogas). The physico-chemical characterization of the cow dung and organic household waste samples gives respectively, for pH 7.1 and 6.2, for moisture (H) 78.013 % and 70.063 %, for dry matter content (MS) 21.987 % and 29.937 %, for the volatile matter rate (MV) 80.150 % and 96.398 %, for the ash rate (Ce) 19.850 % and 3.602 %, for the total carbon rate (TC) 46.063 % and 55.401 %, for the organic nitrogen rate (N) 1.457 % and for the carbon to nitrogen ratio (C/N) 31.615 cow dung. During the process of biomethanization in the mesophilic phase, the substrates of cow dung and household waste have a temperature of 37 °C and 40 °C respectively, allowing the production, for 34 days, of 157.9 cm<sup>3</sup> of biogas from 3 kilograms and 23 days, 373.61 cm<sup>3</sup> of biogas from 1 kilogramme. The biogas composition for cow dung and household waste is 27.08 % and 0.33 % methane respectively; 12.84 % and 38.26 % carbon dioxide.

Keywords: Biomethanization, Characterization, Cow dung, Organic household waste

Table des matières

Dédicaces .....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Summary .....	iv
Table des matières .....	v
Liste des figures .....	viii
Liste des abréviations .....	x
Introduction générale.....	2
Chapitre I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	5
I.1) Définition de la biomasse .....	5
I.2) Historique de la biométhanisation .....	5
I.3) Mécanisme de la biométhanisation.....	5
I.3.1) Hydrolyse .....	6
I.3.2) Acidogénèse .....	6
I.3.3) Acétogénèse .....	7
I.3.4) Méthanogénèse .....	8
I.4) Composition et Caractérisation du biogaz.....	9
I.4.1) Définition du biogaz .....	9
I.4.2) Production de biogaz en fonction du résidu utilisé.....	9
I.4.3) Composition du biogaz .....	9
I.4.3.1) Composition chimique et les caractéristiques physiques.....	9
I.4.3.2) Demande chimique en oxygène (DCO).....	10
I.4.3.3) Demande biochimique en oxygène en 5 jour (DBO5).....	10
I.5) Paramètres influençant sur la production de biogaz .....	10
I.5.1) Le pH .....	11
I.5.2) La température .....	11
I.5.3) Les substances inhibitrices.....	12
I.5.4) Rapport de C/N, Carbone/Azote .....	12
I.5.5) Temps de séjour hydraulique .....	13

## Table des matières

I.5.6) La teneur en eau .....	13
I.5.7) Homogénéité du substrat.....	13
Conclusion du chapitre .....	13
Chapitre II. MATERIELS ET METHODOLOGIE .....	15
Introduction .....	15
II.1) Présentation de l'étude .....	15
II.2) Description de la zone d'étude .....	15
II.3) Conditions climatiques.....	15
II.4) Matériels.....	16
II.4.1) Collecte .....	16
II.4.3) Présentation des substrats de caractérisation .....	17
II.4.3.1) Le taux de matière sèche (MS) et Humidité (H) .....	17
II.4.3.2) Le taux de matière volatile (MV) ou taux de matière organique (MO).....	18
II.4.3.3) Le taux de cendre (Ce) ou taux de matière minérale (MM) .....	19
II.4.3.4) Le taux de carbone total .....	19
II.4.3.5) Taux d'azote organique .....	19
II.4.3.6) Le pH.....	22
II.4.3.7) Dispositif de production du biogaz.....	22
Conclusion du chapitre.....	23
Chapitre III. RESULTATS ET DISCUSSION .....	25
Introduction .....	25
III.1) Paramètres de caractérisation.....	25
III.1.1) Mesure du pH .....	25
III.1.2) Détermination du taux de matière sèche et de l'humidité.....	25
III.1.3) Détermination du taux de matières volatiles et de cendres .....	26
III.1.4) Détermination du taux de carbone total .....	26
III.1.5) Détermination de l'Azote organique .....	26
III.1.6) Détermination du rapport C/N (carbone/Azote).....	27
III.2) Les paramètres de la production .....	27
III.3) Dimensionnement du digesteur.....	28
III.3.1) Calcul du volume du gazomètre.....	28

Table des matières

III.3.2) Calcul du volume du réservoir .....	29
III.3.3) Evolution du volume de biogaz.....	31
III.3.4) Le volume du biogaz.....	31
III.4.4) Evolution du pH .....	32
Conclusion du chapitre :.....	32
Conclusion générale et perspectives .....	35
Références bibliographiques .....	37
Annexes 1 : Caractéristiques des matériels et produits utilisés pour la caractérisation .....	II
Annexe 2 : Détermination du taux d'azote organique.....	II

Liste des figures

Figure 1 : Mécanismes de la biométhanisation (Hess, 2007).....	6
Figure 2 : Site de collecte de résidus.....	16
Figure 3 : Exemples de différents substrats utilisés.....	17
Figure 4 : Dispositif de séchage.....	18
Figure 5 : Diagramme thermique pour la calcination.....	18
Figure 6: Dispositif de calcination.....	19
Figure 7 : Diagramme thermique pour la minéralisation.....	20
Figure 8: Dispositif de la minéralisation.....	20
Figure 9: Dispositif de distillation.....	21
Figure 10 : Dispositif de dosage.....	21
Figure 11 : Mesure du pH.....	22
Figure 12: Dispositif de production et Analyseur de biogaz.....	23
Figure 13: Evolution de production du biogaz,.....	31
Figure 14: Evolution du pH en fonction du temps.....	32

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1: Exemples de réactions de dégradation de glucose (Hess, 2007).....	7
Tableau 2 : Réactions d'acétogénèse avec productions de dihydrogène et de l'acétate .....	8
Tableau 3 : Composition du biogaz de différents substrats de production. ....	10
Tableau 4: Valeurs de la DCO des substrats utilisés.....	10
Tableau 5 : Valeurs de la DBO5 des substrats utilisés.....	10
Tableau 6 : Paramètres physico-chimiques des substrats.....	27
Tableau 7: Composition du biogaz.....	28

## Liste des abréviations

SIE : Système d'Information Energétique  
MV : Matières Volatiles  
H : Humidité  
MS : Matières Sèches  
MO : Matière Organique  
MM : Matière Minérale  
pH : Potentiel Hydrogène  
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur  
PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur  
DCO : Demande Chimique en Oxygène  
DBO5 : Demande Biochimique en Oxygène à une durée de 5 jours  
AGV : Acides Gras Volatils  
ATEE : Association Technique Energie Environnement  
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie  
PED : Pays en Développement  
ppm : partie par million  
s.d : science direct  
SES : Situation Economique Sociale  
J.C : Jésus Christ  
OMS : Organisation Mondiale de la Santé  
ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie  
TSH : Temps de Séjour Hydraulique  
BV : Bouse de Vache  
DM : Déchets Ménager

# Introduction Générale

## **Introduction générale**

L'épuisement des énergies fossiles (pétrole (34,2 %), gaz (23,4 %), charbon (27,6 %)) responsables de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) participent au réchauffement climatique, à la pollution de l'air, de l'eau et de l'atmosphère qui augmentent les accidents cardio-vasculaires. Par ailleurs, au niveau local, on note une prédominance des produits biomassiques (bois et charbon de bois) à 42 % dont une large prédominance du secteur des ménages avec 47,8 % dans lequel, il y a 53 % de bois de feu (SIE-Sénégal, 2013). Selon l'organisation mondiale de la santé, l'utilisation du bois ou charbon de bois dans les ménages est responsable de la mort de 6300 sénégalais par an, notamment les femmes et les enfants (OMS, 2013). Face à ce contexte, le monde s'intéresse à la production d'énergies (éolienne, solaire, hydraulique, biomasse) à partir des ressources renouvelables. Parmi ces différentes sources d'énergie renouvelables, figure celle de la biomasse, qui constitue un gisement en continuelle augmentation et présente une très large diversité de composition. Actuellement, son exploitation et son utilisation pour la production d'énergie, sont autant plus intéressantes qu'elle intervient également dans la préservation de l'environnement en diminuant les pressions sur les ressources forestières (Afilal, 2007).

Plusieurs expériences concrètes dans le monde, soutenues par des études scientifiques ont démontré la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de la technologie de biométhanisation pour traiter les résidus de productions végétales et animales (ADEME, 2009). Selon ces expériences, ce procédé permet non seulement de réduire la quantité de résidus qui ne cesse de s'accroître par exemple les bouses de vache, les pommes de cajou, les résidus ménagers.... Au Sénégal des milliers de tonnes de résidus sont produits par jour et cela pourrait poser de graves problèmes à l'avenir.

La présente étude a pour objectif général de mener des tests de caractérisation biochimique de résidus de biomasse pour la production de biogaz à partir de résidus organiques ménagers, de la bouse de vache, les pommes de cajou.... Pour atteindre cet objectif, nous nous sommes fixés l'identification des différents substrats de biomasse méthanisables, leurs caractérisations et la promotion d'énergie durable qui est le biogaz.

Ce mémoire comporte trois chapitres et est organisé de la façon décrite ci-dessous.

Le premier chapitre présente l'étude bibliographique qui comprend les définitions de la biomasse et du biogaz, l'historique de la biométhanisation et son mécanisme, la composition du biogaz et les paramètres influençant sur sa production et se termine par une conclusion.

## Introduction générale

Le deuxième chapitre propose une présentation et une description de la zone d'étude, il dresse la liste des matériels utilisées et la méthodologie de travail pour nos différentes manipulations. Le troisième chapitre sera consacré aux résultats et discussions des différents paramètres de caractérisation et de production du biogaz.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale, qui résume les résultats des tests expérimentaux ainsi que les perspectives.

# Chapitre I :

# Etude Bibliographique

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **I.1) Définition de la biomasse**

De manière générale, on peut être définir la biomasse comme étant l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou d'origine animale. La biomasse considérée à des fins énergétiques englobe des végétaux provenant des cultures et des déchets. Les déchets peuvent être soit solides (issus de la transformation du bois, agricoles ou déchets ménagers), soit liquides (les boues de station d'épuration, déjections animales).

### **I.2) Historique de la biométhanisation**

Le biogaz est connu depuis longtemps et semble avoir été utilisé au X<sup>e</sup> siècle avant J.C pour chauffer les bains en Assyrie (Lusk, 1998). Toutefois, c'est à partir du XVII<sup>e</sup> siècle que les scientifiques ont commencé à s'intéresser au processus de la biométhanisation. Ainsi à cette époque, Boyle et Papin ainsi que Van Helmont découvrirent que la décomposition des corps d'animaux et des plantes produisait un gaz inflammable. Un siècle plus tard, Volta conclut qu'il existait une corrélation directe entre la quantité de matière organique qui se dégradait et la quantité de gaz formé. Entre 1804 et 1810, Dalton, Henry et Davy découvrirent la composition chimique du méthane qui s'échappait lors de la décomposition des animaux. Le premier digesteur industriel fut construit en 1859 en Inde, dans une colonie de Bombay. Dès 1897, le gaz issu de la fermentation des effluents sanitaires d'une léproserie fut utilisé pour l'éclairage alors qu'en 1896, le gaz issu des boues était utilisé pour l'éclairage des rues d'Exeter en Angleterre. La recherche appliquée relative à la biométhanisation commença avec Buswell en 1990. Ainsi il identifia les principaux processus de la biométhanisation.

### **I.3) Mécanisme de la biométhanisation**

La biométhanisation est un processus naturel et biologique de conversion de la matière organique, présent naturellement dans les écosystèmes (marais, prairies humides, bovins). Il s'agit d'une dégradation anaérobie de la matière organique produisant principalement du méthane (CH<sub>4</sub>) et du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Ce processus se déroule en quatre (4) étapes différentes à savoir l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse (voir figure 1).

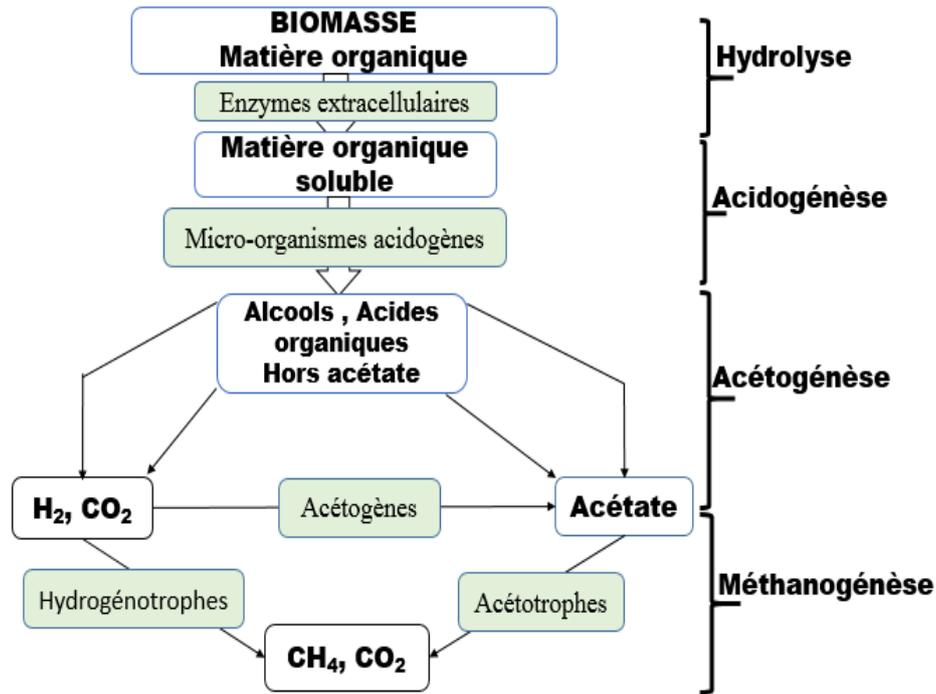


Figure 1 : Mécanismes de la biométhanisation (Hess, 2007)

### I.3.1) Hydrolyse

Les matières organiques sont converties en molécules plus simples (monomères) solubles. A l'aide d'enzymes extracellulaires secrétées (protéases, lipases, cellulases...), permettant de rendre disponible la matière organique nécessaire à son assimilation dans le métabolisme microbien. Les plus petites molécules telles que les sucres, les acides organiques complexes peuvent pénétrer dans la cellule. Une fois dans la cellule ces molécules simples pourront être utilisées comme sources d'énergie pour le métabolisme (Hess, 2007).

L'hydrolyse n'est pas un mécanisme obligatoire de la biométhanisation, mais une étape obligatoire pour la solubilisation des complexes organiques insolubles non disponibles pour les micro-organismes (Effebe, 2009).

### I.3.2) Acidogénèse

Au cours de cette étape, les matières organiques issues de l'hydrolyse et qui sont déjà sous forme soluble sont métabolisés par les micro-organismes. Les molécules vont être converties en de nouveaux composés organiques simples à courte chaîne de (2 à 6 atomes de carbone) comme les acides gras volatils (AGV) tels que le propionate, butyrate mais également en lactate, ou en alcool tels que le méthanol, l'éthanol,... L'éthanol et le lactate qui sont produits par des voies métaboliques moins intéressantes énergétiquement ne sont généralement pas synthétisés à l'équilibre (Dinopoulou et al., 1987). Du gaz carbonique et du dihydrogène sont également produits au cours de ces réactions.

Des exemples de réactions de dégradation de glucose sont montrés dans le tableau 1.

**Tableau 1** : Exemples de réactions de dégradation de glucose (Hess, 2007)

Produits de la réaction	Réactions
Propionate	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$ (éq.1)
Butyrate	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2 + 2CO_2$ (éq.2)
Ethanol	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$ (éq.3)
Lactate	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH$ (éq.4)

Les acides générés pendant l'acidogénèse vont provoquer une diminution de pH. A bas pH inférieur à 5, la production de l'éthanol est élevée, alors qu'à pH plus faible inférieur à 4, il y a une forte production d'acides gras volatils (AGV). Les bactéries acidogènes préfèrent des environnements acides dont le pH est entre 4,5 et 5,5 (Hess, 2007).

### I.3.3) Acétogénèse

La troisième étape de la biométhanisation correspond à l'acétogénèse. Durant cette étape, ce sont les alcools et les acides gras volatils (AGV) produits qui sont utilisés en tant que substrats pour former de l'acide acétique, de l'hydrogène et du dioxygène de carbone. Les produits formés durant cette étape varient avec le type de bactéries dans le système, ainsi qu'avec les conditions environnementales comme la température et le pH.

Au cours de cette étape, on distingue deux principaux groupes de bactéries acétogènes :

1) Les homo-acétogènes ou les acétogènes syntrophes productrices d'hydrogène, produisant essentiellement de l'acétate à partir du dioxyde de carbone et du dihydrogène, mais pouvant également utiliser le méthanol, la méthylamine ou par la réduction du  $CO_2$  par  $H_2$ . Les micro-organismes responsables de ces réactions sont strictement anaérobies et forment un groupe extrêmement hétérogène.

Les bactéries ont un temps de multiplication assez long de l'ordre de 1 à 7 jours. Le tableau 2 présente certaines réactions de dégradation possibles.

**Tableau 2** : Réactions d'acétogénèse avec productions de dihydrogène et de l'acide acétique

Substrats	Réactions
Propionate	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$ (éq.5)
Butyrate	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$ (éq.6)
Ethanol	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$ (éq.7)
Lactate	$\text{CH}_3\text{CHOHCOOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$ (éq.8)

2) Les hétéro-acétogènes ou acétogénèse non-syntrophes convertissent majoritairement les substrats en acétate. Ces organismes non-syntrophes sont capables de croître de façon autotrophe.

#### I.3.4 Méthanogénèse

Cette étape correspond à la dernière phase de la biométhanisation qui permet la production de méthane en faisant intervenir deux groupes de bactéries méthanogènes, les bactéries acétotrophes et les bactéries hydrogénotrophes, d'où l'existence de deux voies conduisant à la production du méthane.

##### ✓ Les bactéries acétotrophes

Ces organismes peuvent produire du méthane à partir de nombreux substrats comportant un groupement méthyle comme l'acétate, le méthanol mais aussi des (n)-méthylamine (Hippe et al., 1979).

La production de méthane ( $\text{CH}_4$ ) à partir de l'acide acétique, est une réaction de décarboxylation produisant environ 70 % du méthane :



Cette réaction est limitée à quelques espèces de bactéries méthanogènes nommées bactéries méthanogènes acétotrophes et dont le temps de dédoublement est compris entre 2 et 10 jours.

##### ✓ Les bactéries hydrogénotrophes

Les bactéries hydrogénotrophes contribuent à la production du méthane à partir du dioxyde de carbone comme accepteur d'électrons. Il s'agit d'une réaction de réduction de carbone produisant environ 30 % de méthane.



C'est la voie d'élimination par oxydation de l'hydrogène produit pendant les étapes d'hydrolyse et surtout d'acétogénèse.

## **I.4) Composition et Caractérisation du biogaz**

### **I.4.1) Définition du biogaz**

Le biogaz est un mélange composé de méthane ( $\text{CH}_4$ ), de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et des traces ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ), produit par fermentation anaérobie (en absence d'air) de matières organiques dans une unité de biométhanisation. Le principe de ces unités est de créer et d'optimiser la production de biogaz dans des digesteurs puis de le capter pour le valoriser en : chaleur seule (par combustion), en carburant (après épuration et compression du gaz) et en chaleur + électricité (par cogénération). Cette activité s'accompagne de production d'un produit humide riche en matière organique appelée digestat qui peut être ensuite utilisé comme épandage sur les terres cultivés.

### **I.4.2) Production de biogaz en fonction du résidu utilisé**

En fonction des résidus, substrats utilisés, le rendement en méthane et la composition du biogaz peuvent varier. A titre d'information voici quelques-uns des résidus les plus fréquents dans notre région :

- ✓ les résidus agricoles : paille, herbe, maïs,...
- ✓ les déjections animales : lisier, fumier, fiente...
- ✓ les déchets agro-alimentaires : déchets de légumes ou de fruits...
- ✓ les déchets des collectivités : tontes de pelouse, feuilles,...

Comme les déjections animales sont utilisées, la bouse de vache est un substrat de composition variable dans le temps, dépendant de l'alimentation des animaux et de leur lieu d'élevage. Il en est de même pour les déchets ménagers organiques sont constitués de résidus de cuisine et de légumes (pomme de terre, de carotte, de salade, de manioc, d'oignon, etc) dépendant des terres de maraîchage.

### **I.4.3) Composition du biogaz**

Le biogaz se caractérise par sa composition chimique et par ses caractéristiques physiques. Il est essentiellement un mélange de méthane ( $\text{CH}_4$ ), de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et de traces de l'azote ( $\text{N}_2$ ), dioxygène ( $\text{O}_2$ ) et de l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

#### **I.4.3.1) Composition chimique et les caractéristiques physiques**

Les différentes sources de production conduisent à des compositions spécifiques différentes. La composition du biogaz dépend du substrat utilisée (voir Tableau 3).

**Tableau 3** : Composition du biogaz de différents substrats de production.

Composants	Bouse de vache	Référence	Déchets ménagers	Référence
CH <sub>4</sub> (%)	[53 – 57]	(Faye, 2017)	[50 – 60]	(Adeossi, 2013)
CO <sub>2</sub> (%)	[40 – 43]		[38 -34]	
H <sub>2</sub> S (ppm)	[200 – 1200]		50	(Moletta, 2008)
O <sub>2</sub> (%)	[0,10 – 0,20]		[0 – 1]	
PCS (MJ/m <sup>3</sup> )	[24 – 25]		-	
PCI (MJ/Kg)	[16 – 18]		-	
C (%)	[30 – 31]	(Sakouvogui et al., 2018)	46,686	(Traoré et al., 2016)
C/N	21,4		29,033	
N (%)	1,46		1,608	

#### I.4.3.2) Demande chimique en oxygène (DCO)

La mesure de la demande chimique en oxygène (DCO) permet d'estimer la charge organique polluante de l'échantillon. Sa mesure avant un traitement physique et chimique permet également de contrôler le bon fonctionnement de l'activité des micro-organismes anaérobies dans le biodigesteur (voir Tableau 4).

**Tableau 4** : Valeurs de la DCO des substrats utilisés

	Substrats	Valeurs	Référence
DCO (gO <sub>2</sub> /l)	Bouse de vache	[60 – 80]	(Adeossi, 2013)
	Déchets ménagers	287	(Rakotoniaina, 2012)

#### I.4.3.3) Demande biochimique en oxygène en 5 jours (DBO5)

La détermination de la Demande Biochimique en Oxygène au bout de 5 jours (DBO5) consiste à mesurer la consommation d'oxygène requise pour oxyder la matière organique dans un échantillon à une température de 20 °C pendant un temps limité par convention de 5 jours et à l'obscurité (voir Tableau 5).

**Tableau 5** : Valeurs de la DBO5 des substrats utilisés

	Substrats	Valeurs	Référence
DBO5 (gO <sub>2</sub> /l)	Bouse de vache	[55 – 100]	(Chen et al., 2007)
	Déchets ménagers	1,16	(Ukondalemba, 2015)

### I.5) Paramètres influençant sur la production de biogaz

Plusieurs facteurs environnementaux peuvent influencer le bon fonctionnement de la biométhanisation.

### **I.5.1) Le pH**

C'est l'un des plus importants paramètres pour la biométhanisation et le contrôle accru de sa variation est fondamental pour le bon fonctionnement des digesteurs. Un pH stable indique un système en équilibre et une biométhanisation performante. En revanche, des variations du pH, plus souvent sa diminution, sont signes de problèmes. Les bactéries méthanogènes sont très sensibles aux valeurs de pH du milieu et ont un optimum entre 6,5 et 7,5 (Sakouvogui et al., 2018). La biométhanisation se déroule normalement pour ces valeurs de pH (6,5 et 7,5): l'activité des bactéries méthanogènes diminue rapidement et peut être complètement stoppée à partir de 5,5 alors que les bactéries acidogènes continuent à produire des acides gras volatils (AGV) jusqu'à des pH voisins de 4,5 (Henze et al., 1996).

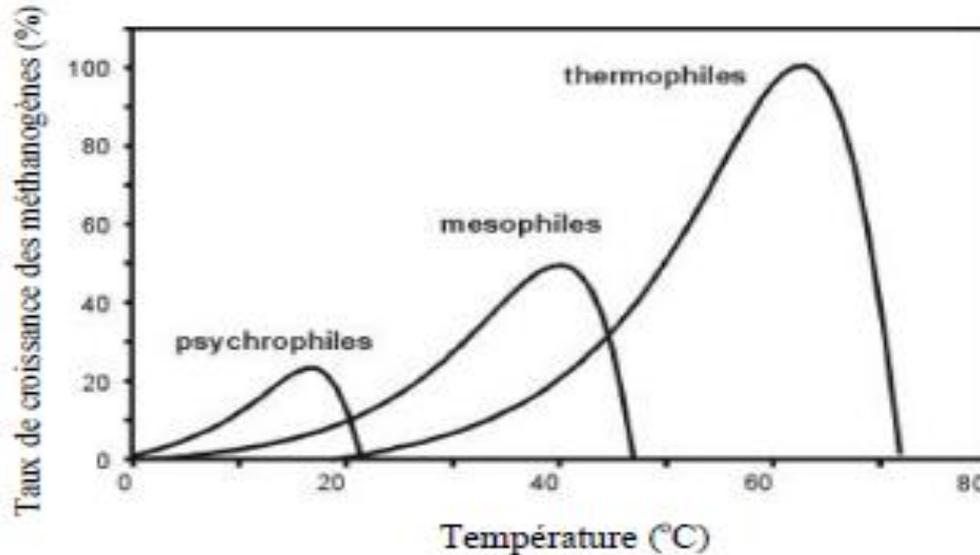
Comme la biométhanisation est une séquence de réactions, chacune ayant des sous-produits différents, les uns peuvent influencer négativement les autres. Une surproduction des acides gras volatils par les organismes acidogènes peut mener à une baisse du pH et conséquemment à une inhibition de la méthanogénèse.

### **I.5.2) La température**

Les différents groupes bactériens de la biométhanisation sont sensibles à la température, car des changements brutaux de température peuvent entraîner un déséquilibre du processus qui pourrait entre autre ralentir une étape par rapport à une autre. Des plages de températures optimales peuvent être définies dans les meilleures conditions de déroulement de la biométhanisation (voir figure 2) :

- ✓ La zone psychrophile entre 4 – 20 °C, la température optimale croit vers 15 °C. Elle est moins efficace avec de faibles productions de biogaz (Bernet et Buffière, 2008).
- ✓ La zone mésophile est entre 30 – 40 °C, avec la température optimale de fonctionnement de 35 °C, c'est la gamme la plus utilisée à cause de sa stabilité et de sa bonne production de biogaz (Bernet et Buffière, 2008). De plus les microorganismes mésophiles sont plus robustes et plus tolérants aux variations de température. Le temps de séjour moyen est de 3 semaines (ADEME, s.d.).
- ✓ La zone thermophile est entre 60 – 65 °C, la température optimale de fonctionnement se situe autour de 55 °C. Elle est de plus en plus utilisée pour le traitement solide. Des températures plus élevées permettent l'amélioration de la vitesse de l'hydrolyse et une meilleure dégradation du substrat. Le taux de croissance méthanogène est plus efficace car la réaction est accélérée par la chaleur. Le temps de séjour moyen varie entre 10 et 15 jours (ADEME, s.d.).

Les avantages d'un régime thermophile par rapport à un régime mésophile sont la réduction du temps de séjour du procédé, une destruction des microorganismes pathogènes, une augmentation de la solubilité et de l'accessibilité des substrats. L'inconvénient est une dépense énergétique importante pour le maintien de la température à 55 °C.



**Figure 2** : Effet de la température sur le taux de croissance des méthanogènes (Hess, 2007)

### I.5.3) Les substances inhibitrices

Certaines substances sont inhibitrices, par exemple :

- ✓ L'ammoniac  $\text{NH}_3$  : en concentrations au-delà de quelques grammes par litre par exemple à 100 mg/l (Hajjaji et *al.*, 2010) peut inhiber la phase méthanogénèse de la biométhanisation. Cette concentration peut être causée par un apport élevé de matières riches en protéines.
- ✓ L'hydrogène sulfuré  $\text{H}_2\text{S}$  : c'est un gaz avec une odeur caractéristique dite « d'œuf pourri ». Il provoque des nausées et vomissements, à haute concentration supérieure à 700 ppm (Meres, 2005), il affecte le système nerveux central et provoque la mort. Des substrats riches en protéines sulfurées et en sulfates peuvent mener à une augmentation de la production de  $\text{H}_2\text{S}$ . Il est également toxique pour les microorganismes méthanogènes, en plus d'être corrosif pour les matériaux à 250 mg/l (Hajjaji et *al.*, 2010).
- ✓ Le cyanure  $\text{CN}^-$  à (5 mg/l), le trichlorométhane à (1 mg/l), le formaldéhyde (100 mg/l) et le nickel à (200 mg/l) peuvent être responsables du mauvais déroulement de la biométhanisation voire dans certains cas bloquer le processus, ce qui peut nécessiter l'arrêt et le redémarrage du digesteur (Hajjaji et *al.*, 2010).

### I.5.4) Rapport de C/N, Carbone/Azote

La relation entre la teneur en carbone et en azote de la matière organique est représentée par le rapport C/N. Il correspond au degré de minéralisation de la matière organique. Plus le taux

d'azote est important, plus le rapport est bas et plus la vitesse de minéralisation est élevée. Pour un bon rendement de production de biogaz, le rapport C/N optimal est compris entre 20 et 30 (Ostrem, 2004). Un rapport plus élevé entraîne une consommation rapide de l'azote et conduit à une faible production de biogaz. D'un autre côté, une trop faible valeur entraîne une accumulation d'ammoniac et des pH dépassant 8,5 sont toxiques pour les bactéries méthanogènes (Zaher et *al.*, 2007).

#### **I.5.5) Temps de séjour hydraulique**

Il s'agit d'un paramètre fondamental de la biométhanisation. Le temps de séjour hydraulique, c'est le temps nécessaire à la dégradation complète de la matière organique présent dans le substrat. Ce temps de séjour varie selon la composition du substrat (Matière Sèche, Matière Volatile, Carbone Total, Azote Organique), la taille des particules du substrat, la température de fonctionnement du digesteur. Ce paramètre opératoire a un impact direct sur les différentes étapes réactionnelles de la biométhanisation. En effet, un temps de séjour inférieur à 5 jours est insuffisant pour avoir une digestion stable en raison du lessivage des microorganismes méthanogènes. Ainsi, jusqu'à une certaine limite, plus le temps de séjour sera long, plus le rendement de dégradation de la matière organique sera important. (Buffiere et *al.*, 2007).

#### **I.5.6) La teneur en eau**

La présence d'eau a une grande influence sur l'action des bactéries, principalement dans le cas où ces valeurs sont basses. La teneur en eau minimale est de 60 à 70 % et augmente la production de biogaz, elle peut atteindre un maximum aux environs de 80 % (Amazigh, 2013). Dans tous les cas, la teneur en eau des déchets doit être suffisante pour que l'hydrolyse, première étape de la méthanisation, puisse se dérouler normalement. Si au contraire la teneur en eau est insuffisante, l'acidification se fait trop vite au détriment de la méthanisation, de ce fait le substrat organique doit être très dilué : 85 à 90 % d'eau avec 10 à 15 % de matière sèche (Afedes, 1982).

#### **I.5.7) Homogénéité du substrat**

C'est un paramètre important pour optimiser les conditions de la biométhanisation en assurant un bon contact entre les micro-organismes et la biomasse traitée et en évitant les différences de température dans le digesteur.

#### **Conclusion du chapitre**

La synthèse de l'étude bibliographique des paramètres physico-chimiques et biochimique de la caractérisation pour la production de biogaz nous a permis de savoir leurs plages d'évolution mais aussi de connaître les limites des résultats expérimentaux.

# **Chapitre II :** **Matériels** **et** **Méthodologie**

## **MATERIELS ET METHODOLOGIE**

### **Introduction**

Ce chapitre, est consacré à la description de la méthodologie de notre travail et à présenter les matériels utilisés pour la caractérisation des résidus de biomasse utilisés et la production de biogaz à partir de ces dits résidus. Ce chapitre présente aussi la zone d'étude ainsi que les conditions climatiques et, finit sur les matériels et la méthodologie utilisée.

### **II.1) Présentation de l'étude**

Cette partie fera l'objet de la caractérisation biochimique de nos résidus de biomasse au niveau du laboratoire de Chimie et Physique des Matériaux (LPCM) de l'université Assane Seck et ensuite de la production de biogaz à partir de digesteurs en bouteille plastique dans un bain marie.

### **II.2) Description de la zone d'étude**

La zone d'étude sise au niveau de la plateforme de démonstration de site de l'université Assane Seck se situe plus précisément derrière les salles M0 de Latitude 12°32' Nord et 16°17' Ouest (Google Earth, 2019) avec deux biodigesteurs de 10 m<sup>3</sup>. C'est un site isolé des bâtiments car il s'agit d'une installation de production de biogaz qui peut représenter des risques d'incendie, d'explosion en cas de fuite et des odeurs.

### **II.3) Conditions climatiques**

La région de Ziguinchor est située à 12°33' de Latitude Nord et 16°16' de Longitude Ouest, déclinaison magnétique 13°05 (ANSD, 2014). Son altitude est de 19,30 m dans la partie Sud-Ouest du Sénégal occupe une superficie de 7339 km<sup>2</sup> (ANSD, 2014) et est limitée au nord par la République de Gambie, au Sud par la République de Guinée Bissau, à l'Est par la Région de Kolda et à l'Ouest par l'océan Atlantique.

La région de Ziguinchor a un climat de type soudano sahélien et subit une forte influence maritime sur la côte. C'est une région assez arrosée. La saison des pluies s'étale en moyenne sur cinq mois, de mai à Octobre. Les différentes stations météorologies de la région enregistrent chaque année une pluviométrie assez élevée.

Le régime thermique de la région se caractérise par une température moyenne annuelle d'environ 27 °C. La moyenne mensuelle maximale à Ziguinchor (37 °C) se produit en Avril, la minimale (15,50 °C) en Janvier. De Janvier à Juin, les températures dépassent souvent 35 °C pendant la journée et tombent en dessous de 20 °C la nuit entre Décembre et Avril (ANSD, 2014).

On rencontre dans la région des vents chauds et secs (harmattan) dans le secteur Nord-Est de Novembre à Mai et des vents chauds et humides (mousson) dans le secteur Sud-Ouest de Mai à Novembre. En général, on note une uniformité relative de la durée de l'insolation qui est importante toute l'année avec une légère baisse en hivernage due à la couverture nuageuse.

#### II.4) Matériels

C'est l'ensemble des outils (broyeur, étuve, four à moufle, distillateur, thermostat, etc) et des matières premières (bouse de vache et déchets ménagers) utilisées, pour la réalisation de cette étude de mémoire de master.

##### II.4.1) Collecte

La collecte des déchets ménagers a été faite au niveau du restaurant de l'université et la bouse au « Daaral » qui est situé à quelques kilomètres de l'université entre la route nationale (54) et le cimetière de Tylène (voir figure 2).



**Figure 2** : Site de collecte de résidus, (a) Restaurant de l'université (b) Marché à bétail « Daaral »

La collecte se fait à l'aide de sacs de 50 kg après la descente des vaches vers 10 heures. Elle est faite pendant une durée d'environ de 2 h 30 min afin de remplir 10 sacs. Ensuite les sacs sont transportés sur le site des biodigesteurs suivi d'un prétraitement (tri des matières non dégradables et mélange avec de l'eau dans la chambre d'alimentation à l'aide d'un mixeur). Une fois cette dernière opération faite, le mélange est envoyé dans la fosse où se déroule le processus de biométhanisation.

La bouse de vache (figure 3.c) est un substrat de composition variable dans le temps, dépendant de l'alimentation des bétails et de leur lieu d'élevage. L'échantillon est prélevé en évitant toute autre matière non dégradable pour la digestion par exemple le tri des matières plastiques, du sable.

Les déchets ménagers organiques (figure 3.b) sont composés essentiellement de résidus de cuisine tels que les épluchures de carotte, de manioc, de pomme de terre, de riz etc. Ces échantillons ont été broyés séparément et ensuite mélangés. Le broyage permet une diminution de la taille des particules pour faciliter le bon déroulement de la première phase de la biométhanisation qui est l'hydrolyse, mais aussi pour faciliter la biométhanisation de la matière organique et rendre facile l'accès aux bactéries méthanogènes lors de la digestion.



**Figure 3 :** Exemples de différents substrats utilisés, (a) Déchets ménagers (b) Déchets ménagers après broyage et mélange (c) Bouse de vache

#### II.4.3) Présentation des substrats de caractérisation

Avant toute opération de la biométhanisation, il est intéressant de mesurer certains paramètres des substrats comme le taux d'humidité, le taux de matière sèche, le taux de matière volatile, le taux des cendres, le taux de carbone total, le taux d'azote, la demande chimique en oxygène, la demande biochimique en oxygène etc. Pour se faire nous allons utiliser les matériels suivants.

##### II.4.3.1) Le taux de matière sèche (MS) et Humidité (H)

Le broyeur est la machine qui permet de rendre plus fine les résidus utilisés pour un rendement de production meilleure. Car plus que la matière organique est fine plus que la dégradation est rapide et la digestion aussi pour les bactéries.

Les boites de pétri sont séchées à vide dans une étuve à une température de 105 °C puis pesées les boites dont la masse obtenue est notée  $m_0$ . Introduisons une masse  $m$  de l'échantillon dans les boites puis l'ensemble est pesé avant étuvage, la masse obtenue est notée  $m_1$ . L'échantillon est répandu uniformément dans les boites de pétri et sont placés dans l'étuve chauffée à une température de 105 °C pendant 24 heures. A la sortie de l'échantillon, l'ensemble est pesé, la masse obtenue est notée  $m_2$  (voir figure 4).

Ces essais se font sur trois (3) boites de pétri différentes d'où l'expression des résultats.

$$MS = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (\text{éq.11})$$

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (\text{éq.12})$$

Avec  $m_0$ : masse de la boîte de pétri

$m_1$ : masse de la boîte de pétri + échantillon avant étuvage

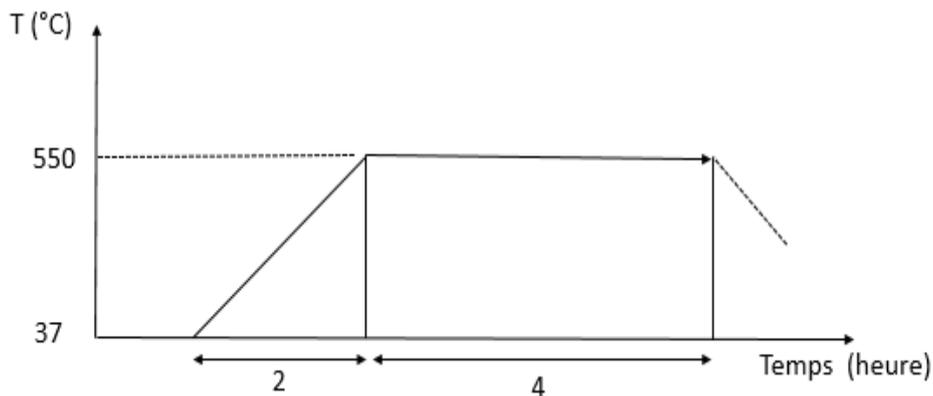
$m_2$  : masse de la boîte de pétri + échantillon après étuvage



**Figure 4** : Dispositif de séchage, (a) broyeur (b) étuve et (c) boîte de pétri

#### II.4.3.2) Le taux de matière volatile (MV) ou taux de matière organique (MO)

Le creuset est pesé avec son couvercle à vide avec une masse  $m_0$ . Une masse  $m$  de l'échantillon est introduite dans le creuset en silice puis l'ensemble est pesé avant chauffage, la masse obtenue est notée  $m_1$ . Le creuset contenant l'échantillon, muni de son couvercle est introduit dans le four à moufle à une température de 550 °C pendant 6 heures à son sorti à l'aide d'un pinceau, l'ensemble est pesé, la masse obtenue est notée  $m_2$ . Le temps de montée est fixé à 2 heures à une température de 200 °C (voir figure 5).



**Figure 5** : Diagramme thermique pour la calcination

Ces essais se font sur trois (3) creusets différents d'où l'expression des résultats.

$$MV = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (\text{éq.13})$$

Avec  $m_0$ : masse du creuset vide et de son couvercle

$m_1$ : masse du creuset, du couvercle et de l'échantillon avant chauffage

$m_2$ : masse du creuset, du couvercle et de l'échantillon après chauffage



**Figure 6** : Dispositif de calcination, (a) four à moufle et (b) creuset en silice avec son couvercle

#### II.4.3.3) Le taux de cendre (Ce) ou taux de matière minérale (MM)

La nacelle est pesée à vide dont la masse notée  $m_0$ . Une masse  $m$  de l'échantillon est introduite dans la nacelle puis l'ensemble est pesé avant calcination, la masse obtenue est notée  $m_1$ . La nacelle contenant l'échantillon est introduite dans le four à moufle à une température de 550 °C pendant 24 heures à sa sortie à l'aide d'un pinceau, puis l'ensemble est pesé, la masse obtenue est notée  $m_2$ .

Ces essais se font sur trois (3) nacelles différentes d'où l'expression des résultats.

$$C_e = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (\text{éq.14})$$

Avec  $m_0$ : masse de la nacelle à vide

$m_1$ : masse de la nacelle et de l'échantillon avant calcination

$m_2$ : masse de la nacelle et de cendres.

#### II.4.3.4) Le taux de carbone total

Le carbone organique total dans les déchets peut être estimé à partir de la formule suivante (Afilal et *al.*, 2014) :

$$CT = \frac{MV}{1,74} \quad (\text{éq.15})$$

$CT$ : carbone total

$MV$ : matière volatile

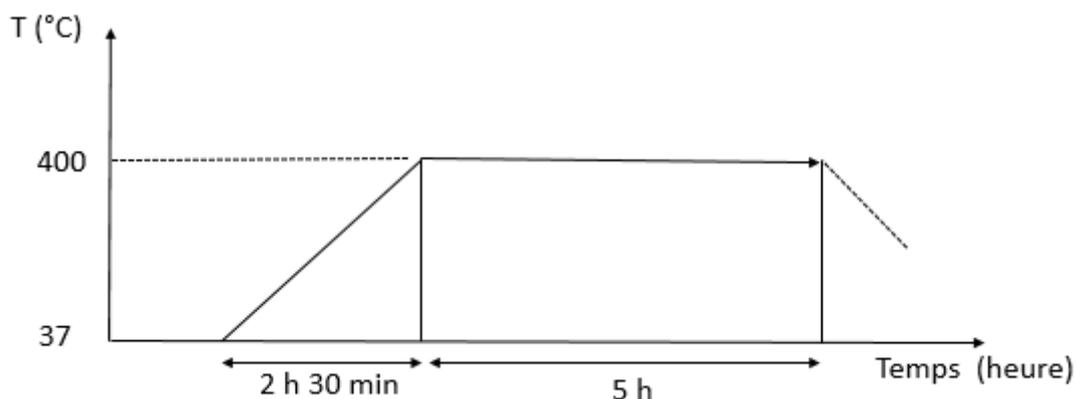
#### II.4.3.5) Taux d'azote organique

La méthode utilisée est la méthode de kjeldahl qui comporte 3 étapes (voir Annexe):

Etape 1 : La minéralisation

On prépare simultanément trois prises d'essai du même échantillon. Introduire successivement dans chaque tube de minéralisation environ 1 g d'échantillon, 2 g de sulfate de cuivre et 10 ml

d'acide sulfurique concentré ( $d=1,84 \text{ g/l}$ ), à l'éprouvette et avec précaution. On Placer les tubes dans un four à moufle à une température de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 5 heures (voir figure 8) avec un temps de monté de 2 heures 30 minutes à une température de  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  (voir figure 7).



**Figure 7 :** Diagramme thermique pour la minéralisation



**Figure 8 :** Dispositif de la minéralisation

Etape 2 : distillation de l'ammoniac

Préparation de la distillation : dans un ballon, on transvase le contenu de l'échantillon, 200 ml de soude ( $\text{NaOH}$ ), 20 ml d'eau distillée, 3 gouttes de phénophtaléine et ensuite on complète 250 ml d'eau distillée. On observe une solution de coloration rose qui est basique.

- ✓ Dans un erlenmeyer, on introduit 25 ml d'acide borique, 25 ml d'eau distillée et 3 gouttes de rouge de méthyle. C'est la solution qui va récupérer le  $\text{NH}_3$  lors de la distillation.

Distillation proprement dite : le ballon est placé dans le distillateur, à droite et l'erlenmeyer avec l'acide borique est placé à gauche, illustré sur la figure 9.

- ✓ Les ions  $\text{NH}_4^+$  qui résultent de cette minéralisation sont transformés ensuite en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) par la soude ( $\text{NaOH}$ ).

Le  $\text{NH}_3$  passe du ballon vers l'erlenmeyer grâce à la vapeur bouillante puis au refroidissement du condensateur. Au fur et à mesure, l'acide borique capte le  $\text{NH}_3$  : il y a formation du complexe  $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{BO}_3)$  dans l'erlenmeyer.

Pendant 30 minutes environs, on note que la solution du ballon est passée de rose en bleu à la fin et la solution d'acide borique passe du rose à l'orange pâle.

A la fin de la distillation, on obtient donc un complexe  $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{BO}_3)$  avec un volume de 130 ml.



**Figure 9:** Dispositif de distillation, (a) début de la distillation et (b) fin de la distillation avec changement de coloration

✓ Le dosage

La figure 10 représente le dispositif de dosage qui constitue de doser toute la solution obtenue de la distillation avec de l'acide chlorhydrique 0,1 N.



**Figure 10 :** Dispositif de dosage, (a) début du dosage et (b) virage de la coloration

Calcul du pourcentage de l'azote organique

$$N = \frac{(V_1 - V_0) \times T \times M_N}{1000 \times m} \times 100 \quad (\text{éq.16})$$

Avec m : masse de l'échantillon

T : titre de la solution d'acide chlorhydrique,  $T=0,1 \text{ mol/l}$

$M_N$  : masse molaire de l'azote en gramme par mole

$V_0$  : volume d'HCl utilisé pour le dosage à blanc,

$V_1$  : volume d'HCl utilisé,

Essai à blanc : il a pour but de soustraire l'ammoniac contenu dans les réactifs de l'ammoniac contenu dans l'échantillon. On fait un essai à blanc en mettant tous les réactifs sauf l'échantillon. La procédure est la même voir ci-dessous (les étapes).

#### **II.4.3.6) Le pH**

Le potentiel Hydrogène pH a été mesuré sur une masse d'échantillon homogénéisé avec un volume d'eau à l'aide d'un pH-mètre (voir figure 11).



**Figure 11** : Mesure du pH

#### **II.4.3.7) Dispositif de production du biogaz**

Pour cette expérience, nous avons utilisé, 3 kg de bouse de vache et 3 litres d'eau sur un ratio de 1/1 dans une bouteille en plastique de capacité de 10 litres qui constitue le digesteur. Pour chauffer et uniformiser la température, on utilise un thermostat, le digesteur est placé dans un bain marie de température 37 °C. Le digesteur est fermé et branché à une chambre à air permet de stocker le biogaz produit (voir figure 10). Des prélèvements sont faits chaque jour pour la mesure du pH.



**Figure 12:** Dispositif de production et Analyseur de biogaz

### **Conclusion du chapitre :**

Dans ce chapitre, nous avons décrit en détails les matériels et les méthodes utilisées pour le bon déroulement de l'étude. Et les résultats ainsi obtenus seront établis et commentés dans le chapitre 3.

# Chapitre III :

# Résultats et Discussion

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Introduction

Ce chapitre, est consacré à la présentation des résultats obtenus et les discussions tant sur la caractérisation des différents substrats sur leurs productions en biogaz. En effet les résultats obtenus nous ont permis de dresser des tableaux récapitulatifs ci-contre.

#### III.1) Paramètres de caractérisation

Les données des paramètres physico-chimiques du substrat de la bouse de vache et déchets ménagers sont consignées dans le tableau 6 suivant.

##### III.1.1) Mesure du pH

Le pH a été mesuré à une masse  $m$  de l'échantillon homogénéisé avec de l'eau à l'aide d'un pH-mètre. Les résultats montrent que le pH de la bouse de vache et des déchets ménagers est respectivement 7,5 et 6,2. Dans la littérature, Sakouvogui *et al.*, 2018 trouvent une valeur du pH de 7,5 tandis que Afilal et Belkhadir, 2008 donnent une valeur de 6,81 pour la bouse de vache alors que Traoré *et al.*, 2016 trouvent 5,85 pour les déchets ménagers.

Ces résultats sont conformes aux données indiquées dans la littérature. Le pH acide est dû à la présence d'acide organique (composé organique présentant des propriétés acide c'est-à-dire capable de libérer un ion hydronium ( $H_3O^+$ ) dans les substrats de déchets ménagers comme dans notre cas, il y a la présence d'oignon qui peut causer le pH acide.

##### III.1.2) Détermination du taux de matière sèche et de l'humidité

Les résultats du taux de matières sèches et de l'humidité obtenus par des méthodes standards pour les substrats de bouse de vache sont respectivement 21,987 % et 78,013 %. Pour des déchets ménagers, le taux de matières sèches est de 29,937 % et l'humidité est de 70,063 %. Les mesures ont été réalisées en triplet. Dans la littérature, Sakouvogui *et al.*, 2018 ont trouvé des valeurs du taux de matières sèches comprise entre 15 à 21 % et une humidité de 85 % tandis que Mellak *et al.*, 2019 obtient une valeur de 18 % de matières sèches pour le substrat de la bouse de vache. Pour les déchets ménagers le taux de matières sèches selon Moletta, 2008 trouve une valeur comprise entre 32 et 42 % et Ukondalemba, 2016 obtient une valeur d'humidité de 65 %. Ces valeurs corroborent les valeurs trouvées dans la présente étude.

Des études ont montré que des taux d'humidité supérieurs à 60 % augmentent la production de biogaz, pouvant atteindre un maximum de production pour les valeurs avoisinant les 80 % (Ait-Brahim, 2013).

La détermination du taux de matières sèches est un critère qui permet de classer le substrat en fonction de son aptitude à être plus ou moins dégradé par voies biochimiques. Le taux de

matières sèches de notre substrat d'étude, est de 21,987 % pour la bouse de vache et 29,937 % de déchets ménagers, nous confronte à une digestion anaérobie par voie sèche de pourcentage entre 15 % et 40 % (Adeossi, 2013).

### **III.1.3) Détermination du taux de matières volatiles et de cendres**

Les résultats du taux de matières volatiles ont été obtenu par (éq.13) et de cendres (éq.14) des substrats utilisés (bouse de vache) obtenus sont respectivement 80,150 % et 19,850 % alors pour les déchets ménagers, le taux de matières volatiles est de 96,398 % et de cendres est de 3,602 %. Dans la littérature, la valeur du taux de matières volatiles se situe entre 74 à 85 % (Adeossi, 2013) tandis que Al Seadi, 2001 obtient une valeur de 80 % alors que ADEME, 2013 trouve une valeur du taux de cendres de 24,1% pour la bouse de vache. Selon Traoré et *al.*, 2016, la valeur de matières volatiles est de 80,46 % et de cendres 1,36 % tandis que Boutouta et *al.*, 2018 trouvent 90,60 % de matières volatiles pour les déchets ménagers. Les résultats obtenus sur nos substrats sont en accord avec les valeurs issues de la littérature.

Des études scientifiques ont montré que si un taux de matières volatiles est important et supérieur à 70 % (Tahri et *al.*, 2012), on peut assister à une bonne production de biogaz. Dans notre cas, les résultats obtenus sont assez élevés varient entre 80,150 % et 96,398 %.

### **III.1.4) Détermination du taux de carbone total**

Le taux de carbone total (éq.15) a été déduit du taux de matières volatiles après calcination de l'échantillon dans un four à moufle à 550 °C pendant 6 heures. Les résultats obtenus de nos substrats sont 46,063 % pour la bouse de vache et 55,401 % pour les déchets ménagers qui restent ainsi supérieurs aux valeurs issues de la littérature qui sont de 31 % (Sakouvogui et *al.*, 2018) et de 46,686 % (Traoré et *al.*, 2016). Cette différence de pourcentage peut être due à l'alimentation des vaches, leur milieu de vie et sur la terre.

Cependant, on note bien que cette valeur se situe dans les gammes des taux en carbone favorisant l'augmentation et la croissance des micro-organismes dans le substrat soit dans la plage de 20 % à 70 % (Sakouvogui et *al.*, 2018).

### **III.1.5) Détermination de l'Azote organique**

Calcul du taux d'Azote dans l'échantillon, on utilise (éq.16). On procède aux calculs comme suit :

Le volume  $V_1 = 18,8$  ml est la quantité de HCl nécessaire pour casser tout le complexe obtenu à partir de la figure 10 et  $V_0 = 8,4$  ml de l'essai à blanc.

$$N = \frac{(18,8 - 8,4) \times 0,1 \times 14,01}{1000 \times 1} \times 100$$

$$N = 1,457 \%$$

La détermination de l'azote est importante dans le processus de la biométhanisation mais un excès de l'azote inhibe partiellement ou totalement le processus et donc rompt la production de biogaz. Dans notre étude le taux d'azote organique est évalué à 1,457 % ce qui est une valeur proche de celle tirée de la littérature qui est 1,46 % (Sakouvogui, 2018).

### III.1.6) Détermination du rapport C/N (carbone/Azote)

Le rapport C/N illustrant le ratio entre le pourcentage de carbone et celui de l'azote permet de prévoir d'une manière générale, l'état d'équilibre influençant la digestibilité d'un substrat. Pour la bouse de vache, ce rapport est évalué à 31,615. Cette valeur est supérieure à la plage optimale de production de biogaz qui est de 20 à 30 (Sakouvogui et *al.*, 2018 ; Ostrem, 2004 ; Kothari et *al.*, 2014) tandis que Degueurce, 2016 trouve une valeur comprise entre 26 à 31.

Le rapport entre le carbone et l'azote dans le substrat dépend de la déjection et de l'alimentation du bétail.

Pour que le rendement du substrat soit efficace en biométhanisation, il faut qu'il soit riche en carbone, pauvre en soufre et équilibré en azote. Un rapport de C/N trop élevé résulte en un manque rapide d'azote, ce qui limite la production de biogaz car l'absence d'azote est un facteur d'inhibition. A l'inverse, un rapport de C/N trop faible résulte en la formation de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) qui augmente le pH du digesteur.

**Tableau 6** : Paramètres physico-chimiques des substrats

Substrats	H(%)	MS(%)	MV(%)	Ce(%)	CT(%)	N(%)	C/N	pH
Bouse de vache	78,013	21,987	80,150	19,850	46,063	1,457	31,615	7,5
Déchets ménagers	70,063	29,937	96,398	3,602	55,401	-	-	6,2

### III.2) Les paramètres de la production

Le tableau 7 ci-dessous représente la composition du biogaz produit qui est déterminée par un appareil de type (Optima7 Biogaz). Après branchement de l'appareil en tête de la chambre à air, le biogaz va passer premièrement par un filtre et ensuite par l'appareil, et donc ce dernier affiche directement sur l'écran le pourcentage de chaque gaz composant le biogaz (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>). La lecture est prise après stabilisation du résultat affiché. L'instrument permet aussi de mesurer, la concentration de l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>S) dans le biogaz produit et d'autres

paramètres que sont, le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) et le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) (voir figure 14).

Ces résultats ont été obtenus au 34<sup>e</sup> jour de la production à une température maintenue à 37 °C pour la bouse de vache et 23<sup>e</sup> jour à une température de 40 °C pour les déchets ménagers. La composition du biogaz pour les substrats de bouse de vache est respectivement en méthane (CH<sub>4</sub>) 27,08 % et 12,84 % dioxygène de carbone (CO<sub>2</sub>) alors que des déchets ménagers, la composition de méthane est 0,33 % et 38,26 % de dioxygène de carbone (CO<sub>2</sub>). En effet ces deux gaz, sont les paramètres majoritaires contenus dans le biogaz mais le méthane dispose d'un pourcentage plus élevé pour la bouse de vache donc on peut dire que le gaz est inflammable tandis que pour les déchets ménagers le dioxyde de carbone est plus élevé donc le gaz n'est pas inflammable. La faible valeur du pourcentage de méthane constaté dans notre étude pourrait s'expliquer par le manque d'agitation continue du digesteur et à la nature du substrat.

Quant aux pourcentages d'oxygène 11,1 % et 12 % retrouvés dans l'échantillon de biogaz, des entrées d'air dues à des fuites lors des prélèvements pourraient être la cause. En effet des fuites ont été notées lors du transport du dispositif (chambre à air) au niveau du site afin de mesurer la composition du biogaz. Une faible entrée d'air dans le digesteur induirait la coexistence de la biométhanisation en grande part qui justifierait le fort pourcentage de CO<sub>2</sub>.

La forte concentration de H<sub>2</sub>S de 31 ppm obtenue sur les déchets ménagers peut être responsable du mauvais déroulement de la biométhanisation, ce qui entraîne un faible pourcentage de méthane. Aussi, on note une variation du pH dans le milieu qui est très acide durant tout le processus.

**Tableau 7 : Composition du biogaz**

Substrats	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	PCS (MJ/m <sup>3</sup> )	PCI (MJ/Kg)	pH final
Bouse de vache	27,08	12,84	11,1	1	11,8	8,7	6,8
Déchets ménagers	0,38	38,26	12	31	0,1	0,1	3,6

### III.3) Dimensionnement du digesteur

Pour le dimensionnement du notre biodigesteur, on commence d'abord par le volume du gazomètre (G), le volume utile (V) et enfin le volume totale du digesteur (volume du réservoir).

#### III.3.1) Calcul du volume du gazomètre

Pour le calcul du volume du gazomètre, on utilise le modèle de Hashimoto pour déterminer la production spécifique journalière puis à partir du volume utile, on calcule la production volumique journalière.

$$G = P_v \times V \tag{éq.17}$$

La production du biogaz par m<sup>3</sup> du digesteur s'obtient à partir de la relation suivante :

$$P_v = \frac{B_0 \times S}{TSH} \left[ 1 - \frac{K}{TSH \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (\text{éq.18})$$

Où

T : Température

$$\mu_m = 0,013(T) - 0,0129 \quad (\text{éq.19})$$

$\mu_m$  : Coefficient cinétique (taux de croissance journalière des microorganismes)

$$K = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \times s} \quad (\text{éq.20})$$

K : constante d'inhibition qui est spécifique pour un substrat donné

TSH : temps de séjour hydraulique de l'influent dans le digesteur

B<sub>0</sub> : Potentiel de production de méthane

$$S = \frac{m \times c}{V}$$

S : Charge volumique en substrat (éq.21)

$$\text{Ainsi } G = P_v \times V = \frac{B_0 \times S \times V}{TSH} \left[ 1 - \frac{K}{TSH \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (\text{éq.22})$$

### III.3.2) Calcul du volume du réservoir

Le volume du réservoir (V<sub>D</sub>) est le volume du digesteur. C'est aussi le volume de l'ensemble formé par le gazomètre et le volume du substrat.

$$V_D = G + V \quad (\text{éq.23})$$

$$\text{Sachant que } V = Q \times TSH \quad (\text{éq.24})$$

Le débit (Q) est fonction de la masse (m) du substrat à digérer et du ratio de son mélange avec de l'eau (1 : x) ; le volume qu'occupe cette masse vaut :

$$v = \frac{m}{\rho_s} \quad (\text{éq.25})$$

avec v en [m<sup>3</sup>], m en [kg] et  $\rho_s$  en [kg/m<sup>3</sup>]

$$Q = v(1 + x) = \frac{m(1+x)}{\rho_s} ; x \text{ en } [m^3] \quad (\text{éq.26})$$

$$V = \frac{m(1+x)}{\rho_s} \times TSH \quad (\text{éq.27})$$

La charge volumique (S) s'exprime en fonction de la masse du substrat (m), de la concentration de la matière organique dans le substrat (c) et du volume utile (V)

$$S = \frac{m \times c}{V} \quad (\text{éq.28})$$

$$S = \frac{c}{(1+x) TSH} \quad (\text{éq.29})$$

En introduisant (éq.23) et (éq.28) dans (éq.24), on obtient ainsi (éq.31)

$$V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_s} \left[ TSH + \frac{B_0 \times c \times \rho_s}{(1+x) \times TSH} \left( 1 - \frac{K}{TSH \times \mu_m - 1 + K} \right) \right] \quad (\text{éq.30})$$

La valeur du potentiel méthanogène de la bouse de vache et de déchets ménagers vaut :

$B_0 = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$  (Wikam et al., 2009) et  $B_0 = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$  (Vedrenne, 2007).

✓ Les données de la bouse de vache

$T = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m_{\text{ech}} = 3 \text{ kg}$ ,  $V_{\text{eau}} = 3 \text{ l}$ ,  $TSH = 34 \text{ jours}$ ,  $c = 10 \%$ ,  $\rho_s = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $x = 1$

$$\mu_m = 0,013(37) - 0,0129 = 0,352 \text{ j}^{-1}$$

La valeur de la constante d'inhibitrice (K) utilisée pour la bouse de vache vaut :

$$K = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \times \frac{10 \times 1000}{34(1+1)}} = 11,667$$

✓ Les données des déchets ménagers

$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m_{\text{ech}} = 1 \text{ kg}$ ,  $V_{\text{eau}} = 2 \text{ l}$ ,  $TSH = 23 \text{ jours}$ ,  $c = 10 \%$ ,  $\rho_s = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $x = 1/2$

$$\mu_m = 0,013(40) - 0,0129 = 0,391 \text{ j}^{-1}$$

La valeur de la constante d'inhibitrice (K) utilisée pour les déchets ménagers vaut :

$$K = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \times \frac{10 \times 1000}{23(1+1/2)}} = 57,1610^3$$

On utilise (éq.31) :

$$V_{D(BV)} = \frac{3(1+1)}{1000} \left[ 34 + \frac{0,2 \times 10 \times 1000}{(1+1) \times 34} \left( 1 - \frac{11,667}{34 \times 0,352 - 1 + 11,667} \right) \right]$$

$$V_{D(BV)} = 0,293 \text{ m}^3$$

$$V_{D(DM)} = \frac{1(1+1/2)}{1000} \left[ 23 + \frac{0,5 \times 10 \times 1000}{(1+1/2) \times 23} \left( 1 - \frac{57,1610^3}{23 \times 0,391 - 1 + 57,1610^3} \right) \right]$$

$$V_{D(DM)} = 0,0345 \text{ m}^3$$

Dans notre cas pour un digesteur à gazomètre, des volumes de  $0,293 \text{ m}^3$  et  $0,0345 \text{ m}^3$  seront nécessaire pour digérer 3 kg de bouse de vache et 1 kg de déchets ménagers concentré à 10 % de matières organiques mélangées à de l'eau suivant le ratio 1:1 et 1:2.

A partir de (éq.28), on calcule

$$V_{BV} = \frac{3(1+1)}{1000} \times 34 = 0,204 \text{ m}^3$$

$$V_{DM} = \frac{1(1+1/2)}{1000} \times 23 = 0,0345 \text{ m}^3$$

Ainsi nous pouvons en déduire le volume maximal journalier de biogaz produit :

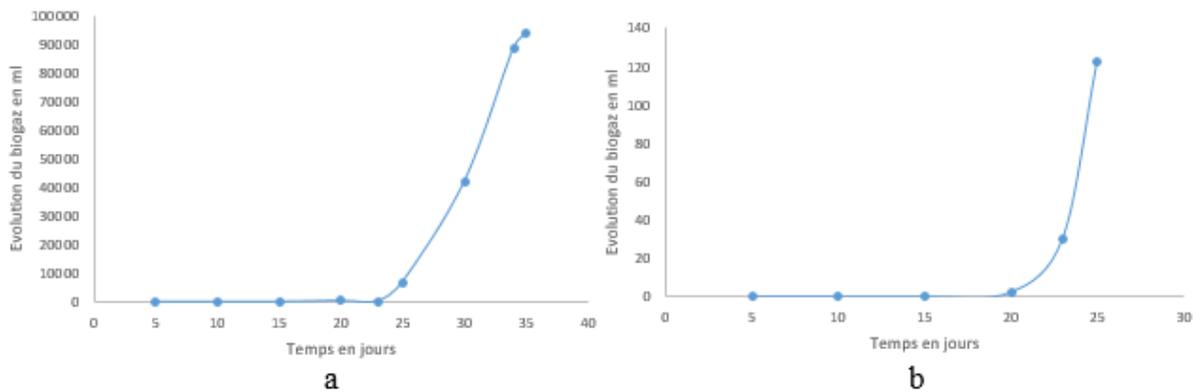
$$G_{BV} = 0,293 - 0,204 = 0,089 \text{ m}^3 \text{ soit } 89 \text{ litres de biogaz}$$

$$G_{DM} = \frac{0,5 \times 1 \times 10}{23} \left[ 1 - \frac{57,1610^3}{23 \times 0,391 - 1 + 57,1610^3} \right] = 3,03910^{-5} \text{ m}^3 \text{ soit } 30,39 \text{ ml de biogaz}$$

### III.3.3) Evolution du volume de biogaz

Pour un digesteur de 10 litres et 5 litres contient respectivement une masse de 3 kilogrammes de bouse de vache et 1 kilogramme de déchets ménagers.

La figure 15 représente le volume de production de biogaz dans le gazomètre en fonction du temps. L'étude de production de biogaz a montré une production est presque nulle dès les premiers jours de la biométhanisation sur les substrats étudiés, mais au bout de 23 jours, la production en biogaz de la bouse de vache est plus importante que celui de déchets ménagers. Le volume de biogaz presque nul des déchets ménagers ne peut être expliqué par l'inhibition du processus avec une concentration de  $H_2S$  de 31 ppm très élevée et la variation du pH.



**Figure 13** : Evolution de production du biogaz, (a) Bouse de vache (b) Déchets ménagers

### III.3.4) Le volume du biogaz

Pour calculer le volume du biogaz théorique produit par la biométhanisation à partir d'un digesteur en bouteille plastique de capacité de 10 litres pour la bouse de vache et de 5 litres de déchets ménagers et une chambre à air pour stocker le biogaz, on utilise des équations (éq.31) simples. La mesure du volume de biogaz nous permet de dimensionner notre biodigesteur à des fins énergétiques comme la cuisson, l'éclairage, etc.

$$V = 2\pi^2 \times r^2 \times R \quad (\text{éq.31})$$

- ✓ Pour la bouse de vache

$$R = 23 \text{ cm et } r = 2 \text{ cm}$$

$$V = 2\pi^2 \times (2)^2 \times 23 = 1816,01 \text{ cm}^3$$

$$V = 1816,01 \text{ cm}^3 \text{ soit } 1,816 \text{ litres}$$

- ✓ Pour les déchets ménagers

$$R = 23 \text{ cm et } r = 3 \text{ cm}$$

$$V = 2\pi^2 \times (3)^2 \times 23 = 4086,01 \text{ cm}^3$$

$$V = 4086,01 \text{ cm}^3 \text{ soit } 4,086 \text{ litres}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V = \text{volume du biogaz (cm}^3\text{)} \\ \text{rayon R (cm)} \\ \text{rayon r (cm)} \end{array} \right.$$

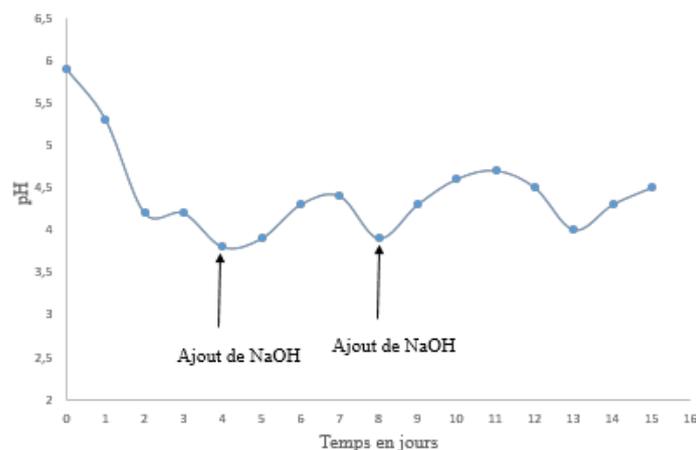
La production de biogaz est évaluée à 1816,01 cm<sup>3</sup> durant une période de 34 jours pour la bouse de vache à un rendement de 2,04 % et 4086 cm<sup>3</sup> durant 23 jours pour les déchets ménagers. Le rendement obtenu pour les déchets ménagers est impossible car la valeur du volume au niveau du gazomètre est inférieure à celui de l'expérience. Pour un bon rendement de production de biogaz, il faut qu'on ajuste le pH à une valeur de 6,5 et 7,5 (Sakouvogui et al., 2018).

Ce volume est faible, pouvant s'expliquer par la quantité de substrats introduits, le ratio utilisé, le manque d'agitation et les conditions de mesure journalière du digesteur.

#### III.4.4) Evolution du pH

Afin d'assurer un bon déroulement de la biométhanisation dans le digesteur, il est important de suivre l'évolution de pH du milieu des déchets ménagers. L'étude montre une chute rapide de pH dès le premier jour (pH initial = 5,9 à pH final = 4,2), ce qui rend le pH très acide (figure14). Cette chute peut être expliquée par la décomposition de la matière organique et la production des acides gras volatils. Dans notre cas, on observe lors de la biométhanisation production des acides gras volatils et leur accumulation dans le milieu. La quantité de biogaz produit a été estimée durant les 5 jours à 0 m<sup>3</sup> (figure 13).

L'ajout de NaOH au 8<sup>e</sup> et 13<sup>e</sup> jour a permis de corriger l'anomalie observée dans le milieu avec une faible augmentation du pH.



**Figure 14** : Evolution du pH en fonction du temps

#### Conclusion du chapitre :

Les résultats de caractérisation obtenus durant notre étude ne montrent aucun paramètre contraignant. Mais les résultats de production des déchets ménagers montrent des paramètres

inhibiteurs. Ces résultats pouvaient bel et bien être améliorés si on a un digesteur plus adéquat pour la production.

# Conclusion générale et perspectives

### **Conclusion générale et perspectives**

Notre pays est confronté actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie dont l'objectif est d'économiser ses réserves énergétiques qui se sont découvertes récemment et la dépendance aux énergies fossiles. L'introduction, l'utilisation des énergies renouvelables telles que la biomasse (biogaz), permettrait d'instaurer une société qui sera basée sur le recyclage et non le gaspillage. Il est connu que les énergies fossiles ne sont pas éternelles, elles sont plus tôt épuisables.

Ce travail de mémoire a comme objectif, la caractérisation biochimique de résidus de biomasse pour la production de biogaz. Pour se faire, nous avons d'abord identifié les substrats méthanisables et produit du biogaz une énergie durable.

La particularité de la méthodologie utilisée dans ce mémoire repose sur la caractérisation des substrats pour la production de biogaz. Les résultats obtenus des tests de caractérisation de nos résidus, de leurs paramètres physico-chimiques ne montrent aucun paramètre majeur contraignant à la production de biogaz. La production de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) à partir de la bouse de vache est évaluée respectivement à 24,08 % et 12,84 %, valeurs obtenues à une température de 37 °C dans un bain marie maintenu uniforme à l'aide d'un thermostat alors les déchets ménagers sont évalués à 0,33 de  $\text{CH}_4$  et 38,26 de  $\text{CO}_2$  à une température de 40 °C. Le choix de la température de 37 °C et 40 °C, repose sur le fait que la température ambiante de la région de Ziguinchor est dans cet ordre de grandeur et du fait que le régime mésophile demeure la plus utilisée à cause de sa stabilité et de sa bonne production de biogaz. La biométhanisation apporte déjà beaucoup à notre société par l'économie d'énergie occasionnée, en la produisant, par la mise en œuvre d'outils propres de dépollution très performants et la réduction des émissions de gaz à effet de serre ( $\text{CH}_4$  et  $\text{CO}_2$ ). L'ensemble des résultats constitue un acquis majeur pour la valorisation énergétique des résidus de bouse de vache et déchets ménagers par biométhanisation.

Il pourrait être intéressant d'installer des digesteurs de plus grande dimension, d'entreprendre des mesures poussées de caractérisation et d'utiliser un gazomètre pour le stockage du biogaz produit. Aussi la détermination du taux d'azote pour les déchets ménagers afin de connaître le rapport du carbone et de l'azote.

# Références Bibliographiques

### Références bibliographiques

**Adeossi, F.G.F. (2013).** Caractérisation du biogaz produit à partir des substrats bovins et porcins dans la région du centre du Burkina Faso, Mémoire de master d'ingénieur de l'eau et de l'environnement, Burkina Faso.

**Afilal, M.E. et Belkhadir, N. (2008).** Caractérisation physicochimique et microbiologique des différents substrats organiques au cours de la fermentation méthanique. Projet de recherche, Université Mohamed 1<sup>er</sup> Oujda, pp 1-5.

**Afilal, M.E., Elasri, O. et Merzak, Z. (2014).** Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz (organic waste characterization and evaluation of its potential biogaz), J. Mater. Environ. Sci., **5**(4), pp 1160-1169.

**Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'énergie (ADEME). (2009).** Méthanisation agricole et utilisation de culture énergétique en codigestion Avantages/inconvénients et optimisation. Rapport final, p 130.

**Ait-Brahim, R., Amazigh, A. et Mahach, H. (2013).** Digesteur à Biogaz, Mémoire dans le cadre du projet de fin d'étude de la licence professionnelle.

**Al Seadi, T. (2001).** Good practice in quality management of AD residues from biogas production. Report made for the International Energy Agency, Task 24 –Energy from Biological conversion of Organic Waste. Published by IEA Bioenergy and AEA Technology Environment, Oxfordshire, United Kingdom.

**Amarante, J.A.L. (2010).** Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux-technologies disponibles et enjeux pour le Québec. Grade de maitre en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

**Boutouta, I., Cheknane, B., Zermane, F., Djaafri, M. et Boutemak, K. (2018).** Etude de la Bio méthanisation en réacteur discontinu Application aux déchets solides urbains de la ville de Blida, Revue des Energies Renouvelables, **2**, pp 199 – 206.

**Buffiere, P., Carrere, M., Lemaire, O. et Vasquez, J. (2007).** Guide méthodologique pour l'exploitation d'unités de méthanisation de déchets solides, projet METHAPI-Expertise.

**Degueurce, A., Tomas, N., Le Roux, S., Martinez, J., Peu, P. (2016).** Biotic and abiotic roles of leachate recirculation in batch mode solid- state anaerobic digestion of cattle manure. Bioresource Tehnology, **200**, pp 388-395.

**Effebi, K.R. (2009).** Lagunage anaérobie : Modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie. Thèse de doctorat, Université de Liège, Arlon, p 157.

- Faye, O.K. (2017).** Bilan de conception et dimensionnement d'un biodigesteur en briques de ciment pour la vulgarisation chez les populations. Mémoire de master, Université Assane Seck de Ziguinchor, Ziguinchor.
- Hajjaji, N., Pons, M.N., Renaudin, V. et Houas.A. (2010).** Production du biogaz par digestion anaérobie : Aspects technologiques et environnementaux, séminaire 2010 de l'Ecole Doctorale RP2E «Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits et Environnement » Nancy, pp 301- 308.
- Hess, J. (2007).** Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie e régulation en vue de sa valorisation, thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, UFR sciences, p 229.
- Hippe. H., Caspari. D., Fiebig. K., et Gottschalk. G. (1979).** Utilization of trimethylamine and other N-methyl compound for growth and methane formation by *Methanosarcina barkeri*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **1**, pp 494– 498.
- Igoud S., Tou I, Kehal S., Mansouri N. et Touzi A. (2002).** Premier Approche de la Caractérisation du Biogaz Produit à Partir des Déjections Bovines. *Energ.Ren.* **5**, pp 123-128.
- Kaloum, S., Khelafi, M., Djaafri, M., Tahri, A. et Touzi, A. (2007).** Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers. *Revue des Energies Renouvelables* **10**, 4, pp 539- 543.
- Kothari, R., Pandey, A.K., Kumar, S., Tyagi, V.V., Tyagi, S.K. (2014).** Different aspect of dry anaerobic digestion for bio-energie, An overview. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, **39**, pp 174-195.
- Lusk, P.1998.** Methane recovery from animal manures, a current opportunities casebook, 3rd edition, Golden, CO.Work performed by Resource Development Associates, Washington, DC.
- Meres, M. (2005).** Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa production et de son exploitation dans des centres de stockage des déchets ménagers. Thèse doctorat, Environnement Science, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jagiellone Cracovie, France, p 140.
- Moletta, R. (2008).**Technologique de la méthanisation de la biomasse, déchets ménagers et agricoles. *Méthanisation 8*, Editions TEC & DOC, Lavoisier, Paris, pp 181-204.
- Mottet, A. (2009).** Recherche d'indicateur de biodégradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile : Application aux boues secondaire d'épuration non traitées et prétraitées thermiquement, thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier.

- M'Sadak, Y., Ben M'Barek, A. et Baraket, S. (2010).** Suivis physico-chimique et énergétique de la biométhanisation expérimentale appliquée à la biomasse bovine. *Revue, Nature et Technologie*, **7**, pp 81-86.
- Rakotoniaina, V.A. (2012).** Co-méthanisation des déchets fermiers et alimentaires : expérimentation et modélisation. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, Saint-Denis, France, p 141.
- Sakouvogui, A., Balde, Y.M., Barry, M.F, Kanté, C. et Keita, M. (2018).** Evaluation du potentiel en biogaz de la bouse de vache, de la fiente de poule et en codigestion à Mamou, République de Guinée. *Afrique Science* **14** (5), pp 147-157.
- Tahri. A., Djaafri. M., Khelafi. M., Kalloum. S. et Salem. F. (2012).** Amélioration du rendement de la production de biogaz par codigestion des déchets organiques (déchets d'abattoir et de volaille), *Revue des Energies Renouvelables SIENR*, **12**, Ghardaïa, pp 375-380.
- Tandia, C.T. (2007).** Protocole de détermination des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Centre Régional pour l'eau potable et l'assainissement à faible coût.
- Tchanche, B. (2018).** Analyse du Système énergétique du Sénégal. *Revue des énergies Renouvelables*, **1**, pp 73- 88.
- Tou. I, Igoud. S. et Touzi. A. (2001).** Production de Biométhane à partir des Déjections Animales, *Rev.Energ.Ren. : Production et Valorisation-Biomasse*, pp 103-108.
- Traoré, D., Nikiema, M., Somda, M .K., Sawadogo, J.B., Dayert, D. et Traoré, A.S. (2016).** Contribution à la biométhanisation de la biomasse végétale: cas des résidus de légumes au Burkina Faso, *int. J. Biol.Chem.Sci.***10** (1), pp 35-47.
- Ukondalemba, L.M. (2016).** Caractérisation et tests de traitement des déchets ménagers et boues de vidange par voie anaérobie et compostage pour la ville de Kinshasa. Thèse de doctorat, Université de Liège, Arlon ; p 274.
- Vedrenne, F. (2007).** Etude des processus de dégradation anaérobie et de production de méthane au cours de stockage des lisiers, thèse de doctorant, science de l'environnement, ENSAR-Rennes.
- Wikan, W. T., Asari, A., Ana, N. et Elita, R. (2009).** Design and development of Reactor for farmer group scale, *Indonesia Journal of Agriculture* **2** (2), pp 121- 128.
- Zaher, U., Cheong, D.Y., WU, B. et Chen, S. (2007).** Producing Energy and Fertilizer From Organic Municipal Solid Waste, Washington state department of ecology, Washington state university.

Webographie :

[www.ansd.sn](http://www.ansd.sn) (situation économique et sociale régionale), consulté le 18 janvier 2019.

[www.sie-energie.gouv.sn](http://www.sie-energie.gouv.sn) (Système d'Information Energétique du Sénégal), 2013, consulté le 3 Février 2019.

[www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz\\_schema.html](http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_schema.html) (le pôle énergie renouvelable des ardenes version, (2015)), consulté le 14 décembre 2018.

Agence de l'environnement et la Maitrise de l'Energie (ADEME) (s.d).Méthanisation.

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow> consulté le 18 Décembre 2018.

Google Earth, date des images satellites le 6 Mars 2019, consulté le 11 Mai 2019.

[www.rewmi.com](http://www.rewmi.com) Organisation Mondiale de la Santé. (2013). Consulté le 23 Mai 2019

# Annexes

**Annexes 1 : Caractéristiques des matériels et produits utilisés pour la caractérisation**

Les matériels	Caractéristiques	Produits
Une étuve de séchage	Marque VENTI-Line températures ambiantes de 18 °C à 32 °C, fréquence 50/60 Hz puissance de 1,00 kW	Sulfate de cuivre (CuSO <sub>4</sub> )
Une balance	Marque ENTRIS 623-1S précision d'affichage de 1 mg portée maximale 620 g	Acide sulfurique concentré (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), d=1,84 g/l M=98,08 g/mol, 95 - 98 %
Four à moufle	Marque Nabertherm Modèle L 9/12/B180 Puissance 50/60Hz, puissance 3,0kW température maximale 1200 °C 90 minutes à température maximale.	Solution acide borique (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ) M=61,83 g/mol
Analyseur biogaz	5 V/0,5- 1,2 A 280 EN50379-2 (O <sub>2</sub> , CO, NO)	Solution d'acide chlorhydrique (HCl) 0,1 N
Un broyeur		Soude (NaOH), 0,1 N
Creuset en silice	2934,75 mm <sup>3</sup>	Phénophtaléine
Burette	25 ml	Rouge de méthyle
Pipette	10 et 25 ml	Eau distillée
Distillateur	Heating Mantles Model 655, 220 V/ 50 Hz	
Ballon tricole	1000 ml	
Erlenmeyer	250 ml	
Des boites de pétri	414,219 mm <sup>3</sup>	

**Annexe 2 : Détermination du taux d'azote organique****Méthode de kjeldahl**

L'azote KJELDAHL correspond à celui qui se trouve sous la forme de composés azotés organiques et d'ammonium.

L'expression « azote KJELDAHL » trouve son origine dans le nom de celui qui a mis au point la méthode universelle utilisée pour doser les fractions azotées concernées.

L'azote organique est essentiellement formé par des protéines, des polypeptides, de l'urée, des acides aminés. Tandis que l'azote minéral est constitué par l'ammoniaque, les nitrites, les nitrates et pour l'azote ammoniacal représente l'azote sous la forme  $NH_4^+$ .

$$N_{KJELDAHL} = N_{organique} + N_{NH_4^+} \quad (\text{éq.32})$$

### ✓ Principe

L'azote organique est minéralisé sous forme de sulfate d'ammonium par l'action conjuguée de l'acide sulfurique et de catalyseur de minéralisation. Le schéma de la réaction est le suivant :



Les ions  $NH_4^+$  qui résultent de cette minéralisation, ainsi que ceux qui préexistaient dans l'échantillon, sont transformés ensuite en ammoniac par une lessive de soude.



### ✓ Produits

- Catalyseur de minéralisation, le ;
- Acide sulfurique concentré ( $H_2SO_4$ ),  $d=1,84$  g/l (dangereux) ;
- Solution acide borique ( $H_3BO_3$ ) agent anti moussant;
- Solution d'acide sulfurique 0,1 N ;
- Lessive de soude (dangereuse) ;
- Phénophtaléine ;
- Rouge de méthyle.

### ✓ Matériels

- Tubes en silice pour la minéralisation ;
- Burette de 25 ml ;
- Pipette de 10 et 25 ml ;
- Fiole Jaugé de 100 ml ;
- Eprouvette de 10 et 100 ml ;
- Béchers ;
- Distillateur ;

### ✓ Mode opératoire

#### ➤ Préparation de l'échantillon

On prépare simultanément trois prises d'essai du même échantillon.

Introduire successivement dans chaque tube de minéralisation :

- Environ 2 g de catalyseur : sulfate de cuivre;
- 1g d'échantillon à l'éprouvette ;

- 10 ml d'acide sulfurique concentré  $d=1,84$  g/l, à l'éprouvette et avec précaution ;
- Minéralisation
  - Placer les tubes dans un four à moufle ;
  - Mettre en marche le four;
  - Laisser la minéralisation se faire durant 5 heures dès l'apparition des fumées blanches ;
  - Eteindre le four ;
  - Saisir les tubes avec la pince prévue à cet usage et déposer avec précaution les tubes sur le portoir ;
  - Laisser refroidir;
- Distillation
  - Préparation de la distillation,  
Dans un ballon à tricole, on introduit
    - Le contenu du tube ;
    - On complète à 25 ml d'eau distillée ;
    - Quelques gouttes de rouge de phénolphtaléine ;
    - On complète 250 ml d'eau distilléeDans l'erenmeyer, on introduit
    - 25 ml de solution d'acide borique
    - 25 ml d'eau distillée ;
    - Quelques gouttes de rouge de méthyle ;
    - Placer un erlenmeyer contenant 25 ml d'acide borique sur le socle de réception ;
  - Distillation proprement dite
    - Mettre en marche la distillation ;
    - Observer que la solution contenue dans l'erenmeyer vire au rose ;
    - Recueillir environ 100 à 200 ml de distillat ;
    - Retirer l'erenmeyer ;
    - Retirer le tube de distillation avec un gant d'amiante et le déposer sur son portoir ;
- Dosage
  - Titre le contenu de l'erenmeyer par  $H_2SO_4$  ou  $HCl$  à 0,1 N jusqu'à ce que la solution rose revienne à sa couleur initiale ;
  - Noter  $V_1$  le volume d'acide utilisé ;
  - Vider et rincer l'erenmeyer ;

Essai à blanc

- On fait un essai à blanc en mettant tous les réactifs sauf l'échantillon. La procédure est la même voir ci-dessous
- Noter  $V_0$  le volume d'acide utilisé pour obtenir le changement de coloration,  $V_0$  correspond au volume du dosage de l'essai à blanc.