

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie de l'Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Génie de l'Environnement

Présenté par

Melle Nouioua Hadjer

Thème

*Valorisation énergétique des déchets de
l'industrie fromagère: production d'un
biogaz*

Soutenue devant:

Président:	Mr M. Drouiche	Professeur, ENP
Promoteur:	Mr R. Bouarab	Professeur, ENP
Co- promotrice:	Mme N. Douag- Tirichine	Doctorante, ENP
Examineur:	Mr A. Mazeghi	MAB, ENP

Promotion 2013.

Remerciements

Je remercie d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné la force, le courage, la santé et la patience pour accomplir ce travail.

*Je tiens à adresser mon vif remerciement à Monsieur **R. Bouarab**, Professeur ENP, de m'avoir orienté par ses conseils judicieux dans le but de mener à bien ce travail, et d'avoir accepté de m'encadrer tout au long de cette étude.*

*Je remercie vivement Madame **N. Douag**, Doctorante ENP de m'avoir aidé et de toute la confiance qu'elle m'a accordé, par ses compétences, son savoir faire dans la transmission d'information.*

*Je remercie vivement Monsieur **M. Drouiche**, Professeur ENP, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Monsieur **A. Mazeghi**, MAB ENP, d'avoir examiné ce travail*

Je tiens à remercier tous les enseignants du département Génie de l'Environnement pour leurs aides et leurs conseils et pour Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation

Merci à tout le personnel du département de Génie de l'environnement.

DEDICACE

Au nom de Dieu le tout puissant et le miséricordieux par la grâce duquel j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

*A celle qui a toujours attendu ma réussite, à mon vaste abri d'amour et de tendresse, ma chère mère « **Khedidja** ».*

*A celui a été le plus brave des pères m'aidant à aller toujours vers le mieux et le meilleur, mon cher père « **Mohamed** ».*

*A mon cher frère : **Bakeur**.*

*A mes chères sœurs : **Amira et Sabrina**.*

*A tous mes amis(es) : **Seoura, Racha, Salwa, Djahida, Loubna, Manel, Chouaib**.*

A toute la promotion du 5^{ème} années de génie de l'environnement « 2012-2013 » et à tous mes amis(es) de l'école chacun par son nom.

A toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce travail par un conseil ; ou même un sourire.

A toute personne que j'aime et qui m'aime.

Hadjer

SOMMAIRE

RESUME

DEDICACES

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION.....	1
t reparti entre les régions et les pays.....	1
I.1. Origine des rejets en laiterie.....	4
I.2. Les paramètres indicateurs de la pollution	4
I.2.1. La demande biologique en oxygène (DBO5)	4
I.2.2. La demande chimique en oxygène (DCO)	4
I.2.3. Les matières en suspension (MES).....	5
I.2.4. Les matières volatiles en suspension (MVS).....	5
I.2.5. Les matières sèches totales (MST).....	5
I.2.6. L'azote	5
I.2.7. Le phosphore.....	5
I.2.8. Le pH	5
I.3. Impact des effluents laitiers sur l'environnement et leur pouvoir polluant.....	6
I.4. Le lactosérum.....	7
I.4.1. Définition et caractéristiques.....	7
I.4.2. Source du lactosérum	7
I.4.3. Composition du lactosérum.....	8
I.4.4. Différents types de lactosérum	9
I.4.5. Traitement et valorisation du lactosérum	10
II.1. Historique	14
II.2. Définition.....	15
II.3. Mécanismes biologiques de la bio-méthanisation	16
A. Phase d'hydrolyse	16
B. Phase d'acidogénèse	17
C. Phase d'acétogénèse.....	17
D. Phase de la méthanogénèse.....	17
III.1. Classification selon la température d'opération.....	21
III.2. Classification selon la siccité des intrants.....	22
1. La méthanisation par voie humide.....	22

3. La méthanisation par voie liquide.....	23
III.3. Classification selon le mode d'alimentation.....	23
A. Digesteurs méthanogènes discontinus	23
B. Digesteurs méthanogènes continus	23
III.4. Le choix du type de matériaux.....	23
III.5. Les systèmes de chauffage et d'agitation.....	24
III.6. Les systèmes de stockage	24
III.7. Conditions de mise en œuvre.....	24
III.8. Produits de la bio-méthanisation	28
III.8.1. Le biogaz.....	28
III.8.1.1. Composition du biogaz	28
III.8.1.2. Propriétés et caractéristiques du biogaz	28
III.8.1.3. Les caractéristiques moyennes du biogaz	28
III.8.1.4. Pouvoir calorifique du biogaz.....	29
III.8.1.5. Les équivalences énergétiques du biogaz	30
III.8.1.6. Valorisation du biogaz	31
III.8.2. Le digestat	32
III.9. Avantages et inconvénients de la bio-méthanisation	33
III.9.1. Avantages	33
III.9.2. Inconvénients	34
IV.2. Méthodes analytiques.....	37
IV.2.1. Mesure du pH.....	37
IV.2.2. Mesure de la DCO.....	37
V.1. Caractéristiques du lactosérum brut de Boudouaou	40
V.2. Valorisation du lactosérum	40
V.2.1. Evolution du pH	40
V.2.2. Evolution de la demande chimique en oxygène DCO.....	42
V.2.3. La production du biogaz	45
CONCLUSION.....	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

Liste des tableaux

Tableau I.1: <i>Quelques caractéristiques de différents effluent</i>).....	6
Tableau I.2 : <i>Normes de rejet des effluents</i>	7
Tableau I.3: <i>Composition du lait et du lactosérum</i>	9
Tableau I.5: <i>Composition type (en g/l) de lactosérum acide et doux</i>	11
Tableau I.6: <i>Applications du lactosérum dans la transformation des aliments</i>	15
Tableau III.1: <i>Familles de microorganismes responsables de la biométhanisation</i>	25
Tableau III.4: <i>Caractéristiques moyenne du biogaz</i>	30
Tableau III.5: <i>Pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane</i>	31
Tableau III.4: <i>Caractéristiques moyenne du biogaz</i>	32
Tableau III.5: <i>Pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane</i>	33
Tableau V.1: <i>Caractéristiques des substrats utilisés</i>	44
Tableau V.2 : <i>Données générales sur les digesteurs mis en œuvre</i>	44

Liste des figures

Figure II.1. <i>Représentation schématique des différentes étapes du processus de dégradation anaérobie des matières organiques.....</i>	<i>21</i>
Figure IV.1: <i>Photo du dispositif expérimental.....</i>	<i>40</i>
Figure IV.2: <i>Schémas de mesure et stockage du volume de biogaz produit.....</i>	<i>42</i>
Figure V.1: <i>Variation du pH en fonction du temps à T=35°C (digesteur I).....</i>	<i>45</i>
Figure V.2: <i>Variation de pH en fonction du temps à T=35°C (Digesteur II et III).....</i>	<i>46</i>
Figure V.3: <i>Variation de la DCO en fonction du temps à T=35°C (Digesteur I).....</i>	<i>47</i>
Figure V.4: <i>Variation de la DCO en fonction du temps à T=35°C (Digesteur II et III).....</i>	<i>47</i>
Figure V.5: <i>Variation de la productivité gazeuse en fonction du temps à T=35°C (digesteur I)..</i>	<i>49</i>
Figure V.6: <i>Variation de la productivité gazeuse en fonction du temps à T=35°C (digesteur II et III).....</i>	<i>50</i>

Introduction

INTRODUCTION

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

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

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

Cette forme d'énergie renouvelable largement disponible, de moins en moins coûteuses et non polluante est utilisée pour compléter l'énergie fossile non renouvelable.

La valorisation des déchets organiques et principalement les déchets de l'industrie fromagère pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique, à travers une autonomie énergétique et un développement agricole durable des zones rurales.

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

De nombreux sous-produits de l'industrie alimentaire sont rejetés dans la nature et constituent de ce fait un facteur de pollution.

L'industrie laitière issue de l'activité agro-alimentaire. Produit de grandes quantités de lactosérum, dont la gestion constitue un problème d'importance cruciale, sont actuellement rejetées dans les eaux résiduaires des usines, engendrant un problème de pollution environnementale.

Cette pollution est très dommageable en raison de la forte demande en oxygène des produits rejetés et de l'asphyxie du milieu qui peut en résulter. Elle se caractérise par une absence presque totale d'éléments toxiques mais elle présente une tendance forte à l'acidification et à la fermentation rapide.

Le lactosérum attire de plus en plus l'attention des chercheurs avec sa richesse en nutriments, son énorme pouvoir polluant qui détériore l'environnement. Il est devenu le centre d'intérêt de plusieurs recherches et plusieurs procédés de valorisation sont mis en évidence afin de remédier à ce grand problème.

Le travail exposé dans ce mémoire a pour objectif de contribuer à la production de biogaz à partir des déchets issus de l'industrie fromagère et porte sur:

- l'étude de l'effet de l'utilisation de l'hydroxyde de sodium pour le contrôle du pH sur un réacteur anaérobie travaillant en mésophilie;
- l'effet de l'ensemencement sur le rétablissement et les performances du digesteur.

Chapitre I : Industrie laitière

Comme toutes les industries agro-alimentaires, les industries laitières génèrent une pollution organique essentiellement biodégradable provenant des pertes de matières premières au cours du traitement et de la transformation du lait et les produits de nettoyage utilisés. Cependant, la très forte concentration de ces rejets organiques rend impossible le rejet pur et simple dans le milieu naturel (Moletta et Torrijos, 2001).

I.1. Origine des rejets en laiterie

La composition des effluents laitiers dépend de la nature du produit formé et donc des procédés mis en œuvre dans la laiterie:

- Les ateliers de pasteurisation du lait ne déversent que des eaux de lavage, correspondant à un lait très dilué.
- L'industrie des produits frais (yaourts et fromages frais) rejettent des eaux qui peuvent être assez concentrées.
- Les fromageries et caséineries produisent du sérum riche en lactose et pauvre en protéines, les beurreries du babeurre riche en lactose et en protéine mais pauvre en matière grasse. Le babeurre et le sérum correspondent à une pollution considérable.

I.2. Les paramètres indicateurs de la pollution

Les principales grandeurs caractérisant la pollution de l'effluent liquide sont:

I.2.1. La demande biologique en oxygène (DBO5)

Elle représente la quantité d'oxygène dépensée par les phénomènes d'oxydation chimique, d'une part, et d'autre part la dégradation des matières organiques par voie aérobie, nécessaire à la destruction des composés organiques.

I.2.2. La demande chimique en oxygène (DCO)

C'est la quantité d'oxygène consommée par les matières existantes dans l'effluent dans des conditions opératoires définies (Brissaud et Faby, 1997).

I.2.3. Les matières en suspension (MES)

Elles représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenues par un filtre. Les MES, qui comportent des matières organiques et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution de l'effluent.

I.2.4. Les matières volatiles en suspension (MVS)

Elles représentent la fraction organique des matières en suspension, elles sont mesurées par calcination à 620 °C d'un échantillon, dont on connaît déjà la teneur en MES, elles constituent environ 70% - 80% des MES. (Rodier, 1996)

I.2.5. Les matières sèches totales (MST)

Elles représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son extrait sec constitue à la fois les matières minérales en suspension et les matières solubles.

I.2.6. L'azote

Peut se trouver sous forme minérale (ammoniacal, nitrate) ou organique. La présence d'azote organique ou ammoniacal se traduit par une consommation d'oxygène dans le milieu naturel (Gaid, 1984).

I.2.7. Le phosphore

Peut également se trouver sous forme minérale en provenance des lessives ou des rejets industriels ou organiques. (Gomella, 1982)

I.2.8. Le pH

Cette caractéristique est importante car les microorganismes qui sont utilisés dans les systèmes de dépollution ne fonctionnent correctement que dans une gamme réduite de pH ($5 < \text{pH} < 7$).

I.2.9. L'équivalent habitant (EH)

Cela permet de comparer l'impact des effluents par rapport aux rejets domestiques, 1 EH = 57g de matière organique.

I.3. Impact des effluents laitiers sur l'environnement et leur pouvoir polluant

Les effluents laitiers ont une charge organique extrêmement élevée. C'est cette matière qui, concentrée dans les eaux ou les sols, provoque une pollution par asphyxie du milieu récepteur parmi lequel (Tableau I.1):

- Pollution des petits cours d'eau;
- Colmatage des sols autour des points de rejets;
- Génération d'odeurs indésirables dues à la fermentation;
- Graves perturbations des cycles biologiques et du milieu naturel lorsqu'elles sont en trop, grande quantité (l'eutrophisation).

Tableau I.1 *Quelques caractéristiques de différents effluents (Harang, 2010)*

Type d'effluent	pH	Volume/litre de lait	DCO (g/L)	DCO/DBO5
Eaux blanches	5,5 à 6	3,0 à 4,0	2,0 à 3,0	1,3 à 1,4
Lactosérum/petit lait	4,2	0,75	50 à 70	1,5
Mélange lactosérum, eaux blanches	4,0 à 4,5	4,0 à 5,0	10 à 12	1,7 à 1,8
Effluent domestique	7,0 à 8,0	150 L/EH	0,8 à 1	1,9

Les eaux de lavage de la fromagerie, de la salle de traites mélangées aux sérums d'égouttage constituent une charge polluante 15 fois plus élevée qu'une eau usée ménagère (Sottiez, 1985).

La DBO5 d'une eau domestique est évaluée à 300 mg/L et elle est estimée à 200 L le volume d'eau utilisée par habitant et par jour. Dans ce cas, un équivalent habitant est égal à 60 g d'oxygène, soit la DBO5 d'un litre de lactosérum.

Tableau I.2 Normes de rejet des effluents (Sottiez, 1985)

	Normes pour rejeter ou épandre les effluents	Eaux blanches
DCO (mg/l)	120	2000-3000
DBO5 (mg/l)	40	154-214
MES (mg/l)	30	300 à 1000
P total (mg/l)	-	20 à 100
N total (mg/l)	-	10 à 100
pH	5,5 à 8,5	4,5 à 7,5

De plus, un litre de lait transformé induit 60 g de DCO dont 50 g issus du lactosérum (qui est la partie la plus polluante de la charge organique) et seulement 10 g des eaux blanches (Harang, 2010). Le lactosérum a un impact environnemental beaucoup plus important dans l'environnement.

I.4. Le lactosérum

I.4.1. Définition et caractéristiques

Le lactosérum est la phase aqueuse jaune verdâtre translucide qui se sépare du caillé après la coagulation du lait durant la fabrication du fromage et de la caséine.

C'est un milieu dilué complexe contenant essentiellement du lactose, des protéines globulaires, une fraction azotée non protéique, de la matière grasse et des minéraux. Sa composition dépend du lait d'origine et du procédé de coagulation des caséines (Voilleau, 2009).

Sa principale caractéristique est qu'il contient beaucoup de lactose, ce sucre représente une principale source de carbone pour les microorganismes qui intéressent l'industrie agroalimentaire.

I.4.2. Source du lactosérum

Les deux principales voies industrielles de transformation du lait nature aboutissant au lactosérum, sont la beurrerie et la fromagerie.

A. La beurrerie

C'est l'ensemble des procédés qui conduisent à la fabrication du beurre à partir du lait nature. Après écrémage de ce dernier suivi d'une extraction de la caséine par précipitation, on obtient du « lactosérum écrémé ».

B. La fromagerie

C'est l'ensemble des procédés qui conduisent à la fabrication des fromages à partir du lait nature. Ce dernier subit les processus de coagulation et de synérèse, aboutissant d'une part à une phase solide le «fromage», d'autre part, à une phase liquide: le lactosérum (Veisseyere, 1975).

I.4.3. Composition du lactosérum

La composition du lactosérum dépend du lait d'origine et du procédé de coagulation des caséines. Il peut être considéré comme du lait dépourvu de matière grasse et de caséines, sa couleur jaune verdâtre est due à sa teneur élevée en vitamine B2 (Voilleau, 2009) (Tableau I.3).

Tableau I.3 Composition du lait et du lactosérum (Sottiez, 1985)

Constituants en g/l	Lait	Lactosérum
M. grasse	38	4
Caséine	26	-
Lactose	49	49
Azote non protéinique + protéines solubles	8	8
Sels minéraux	8	5
Total M. sèches	129	66

Le lait et le lactosérum ont presque la même composition, à part que le lactosérum est pauvre en matières grasses et sa fraction protéique ne contient plus de caséines puisque celles-ci sont passées dans le fromage (Tableau I. 3). Le lactosérum est composé essentiellement de:

A. Le lactose

C'est le constituant le plus important du point de vue poids par rapport à l'extrait sec du lait et plus encore par rapport à l'extrait sec du lactosérum (Vrignaud, 1979).

B. Les protéines

Les protéines du lactosérum sont faciles à digérer, contiennent tous les acides aminés essentiels en proportions adéquates et constituent une excellente source de nutrition. Elles constituent à l'état concentré, des sources de protéines recherchées tant par l'alimentation des jeunes animaux que pour l'alimentation humaine (Pierre et Fauquant, 1986).

C. Les vitamines

Le lactosérum contient les vitamines hydrosolubles (B et C) (Woo, 2002).

D. La matière grasse

La matière grasse du lait est retenue par le caillé dans la fabrication des fromages, cependant une certaine quantité est entraînée dans le sérum brut. Celle-ci est faible, mais le plus souvent dans les traitements industriels, le lactosérum est tout de même écrémé.

E. Les sels minéraux

Toutes les matières minérales du lait se trouvent dans le lactosérum. Le lactosérum est une source importante de calcium et de phosphore (Fersadou, 2009).

I.4.4. Différents types de lactosérum

Les différences de composition minérale et protéique des lactosérums sont en premier lieu à rattacher aux variations qualitatives des laits et en second lieu, à la diversité des technologies fromagères. Pour un même fromage, les lactosérums peuvent même différer selon l'usine (Saulnier et al, 1995). On peut distinguer deux types de lactosérum :

A. Le lactosérum doux

Il provient de la fabrication des fromages de type pâte pressée cuite ou non cuite et présente un pH compris entre 5 et 6. La coagulation du lait provient de la déstabilisation des micelles de caséines sous l'action de la présure (Violleau, 2009).

B. Le lactosérum acide

Il est obtenu après coagulation du lait par précipitation des caséines à leur pH isoélectrique de 4,6. Le lactosérum acide contient plus de calcium que le lactosérum doux étant donné que lors de l'acidification du lait, le calcium passe dans la phase liquide, c'est-à-dire le petit lait. La différence de composition de ces 2 types de lactosérum est représentée dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Composition type (en g/L) de lactosérum acide et doux (Violleau, 2009)

	Lactosérum doux	Lactosérum acide
pH	6,1- 6,7	4,6- 6
Matière sèche	71	65,8
Matières grasses	2,0	4,0
Lactose	49,0	44,0
Azote non protéique	0,5	0,2
Protéines	8,0	7,0
Acide lactique	2,0	5,0
Acide citrique	1,3	0,3
Minéraux	5,0	8,0
Dont		
(entre autre)	Phosphore	0,41
	Calcium	0,47
	Potassium	1,45
	Sodium	0,5
	Chlorures	2,19
		0,65
		1,25
		1,48
		0,53
		2,09

I.4.5. Traitement et valorisation du lactosérum

Nous assistons à des rejets énormes du lactosérum par les industries fromagères. Elles génèrent plus de 145 millions de tonnes de lactosérum liquide par année (Audic et al. ,2003).

Ces rejets constituent une menace réelle sur l'environnement de part sa richesse en matières organiques, en particuliers, le lactose 40% (Alais, 1984).

La pollution causée par 1000 m³/J d'eaux usées rejetées par une industrie laitière serait équivalente à celle d'une ville de 800 000 habitants (Kosikowsky, 1979). Dans ces conditions, il est devenu indispensable de le recycler pour éviter la menace polluante. Or, les recherches effectuées par la plupart des pays laitiers ont mis en évidence sa valeur nutritionnelle, ainsi que les possibilités de son utilisation dans plusieurs domaines (Luquet et Boudier, 1984).

Dans le domaine des industries alimentaires, la quantité de lactosérum utilisée est plus importante, il constitue aussi un ingrédient alimentaire à valeur ajoutée, utilisé dans une vaste gamme d'aliments et de boissons (Woo, 2002). De plus, il est utilisé pour enrichir les aliments ou les régimes pauvres en protéines. En pathologie, il est utilisé pour l'alimentation des malades diabétiques ou des sujets souffrant de mal nutrition et en alimentation de soutien pour les sportifs, les personnes âgées (Dryer, 2001), (Tableau I. 6).

Tableau I.6 Applications du lactosérum dans la transformation des aliments (Woo, 2002)

Propriété fonctionnelle	Mode d'action	Produits alimentaires
Solubilité / hydratation	Les protéines encapsulent l'eau	fixent/ Viandes, boissons, pains, gâteaux, saucisses
Gélatine / viscosité	Formation et coagulation de matrices de protéines	Vinaigrettes, soupes, coagulation de fromages, produits de boulangerie, sauces, viandes
Émulsification	Les protéines stabilisent les émulsions de matière grasse.	Saucisses, soupes, gâteaux, vinaigrettes, aliments pour bébé, colorants à café.
Moussage / fouettage	Les protéines forment une pellicule stable	Garnitures de crème fouettée, gâteaux mousseline, desserts
Goût / arôme / brunissement	Le lactose subit une réaction de Caramélisation	Produits de confiserie, viandes cuites au four à micro-ondes, saucisses, pains, produits de boulangerie, soupes, produits laitiers

Ainsi depuis une dizaine d'années, les scientifiques évaluent les effets bénéfiques des fractions de protéines de lactosérum. L'utilisation de ces fractions est efficace contre les maladies du cœur (réduction du cholestérol et de la tension artérielle), les ulcères, les cancers, etc. (Berry, 2000).

Dans le domaine de La biotechnologie, le lactosérum par sa composition biochimique possède d'intéressantes propriétés comme milieu de fermentation pour plusieurs

microorganismes assimilant le lactose comme source de carbone et d'énergie. A titre d'exemple, la culture des levures de bière, *Saccharomyces*.

Utilisation comme milieu de culture : le lactosérum liquide est un excellent substrat de fermentation pour la production de protéines unicellulaires (P.U.C) ou de métabolites (Bremerhaven, 2011).

Chapitre II : Bio-méthanisation

II.1. Historique

La découverte de la méthanisation remonte au 18^e siècle, précisément en 1776. Lorsque Volta, 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 a montré qu'il s'agissait d'un gaz combustible. Il l'a appelé «gaz des marais». En 1787, Lavoisier a appelé ce gaz «gaz hydrogène carboné». Et ce n'est qu'en 1865 que le terme méthane fut proposé. Il a été confirmé en 1892 dans un Congrès International de nomenclature chimique. Dès le début du 19^e siècle, ce phénomène a fait l'objet de nombreuses études dans le monde.

En 1808, Sir Davy, physicien et chimiste britannique, a étudié la fermentation anaérobie du fumier. En 1859, la première installation de méthanisation a été construite dans une colonie britannique à Bombay en Inde (Meynell, 1976). En 1881, un brevet a été déposé à Vesoul (70) par l'entrepreneur Louis Mouras concernant une nouvelle fosse pour l'épuration des eaux de latrines par «fermentation méthanique», une invention qui a été commercialisée par François Napoléon Marie Moigno, connu sous le nom d'Abbé Moigno, un mathématicien français (Builder, 1968). En 1884, Ulysse Gayon, élève en agronomie à l'école Louis Pasteur à Bordeaux, a observé la libération d'un gaz par la fermentation du fumier. En 1898 un autre brevet a été déposé à Exeter en Grande Bretagne par l'ingénieur Donald Cameron concernant une fosse septique pour le traitement des eaux d'égouts. Il a aussi construit une installation de méthanisation à Exeter et le biogaz était valorisé pour l'éclairage public.

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, 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'Ecole Nationale d'Agriculture d'Alger, ont travaillé sur la méthanisation du fumier et des effluents de l'élevage.

Après avoir connu un certain développement, Cette technologie a reculé rapidement et a été presque oubliée durant les années cinquante et soixante avec l'arrivée des sources énergétiques fossiles moins coûteuses et facilement disponibles.

Les chocs pétroliers de 1973, de 1976 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. Elle a connu une réussite importante

dans le domaine agricole, notamment avec les techniques de «méthanisation à la ferme». En France, par exemple, une centaine d'installations de méthanisation à la ferme ont été construites à l'époque. Ces événements ont été accompagnés par un développement scientifique au sein d'équipes de recherche. Ces dernières ont travaillé sur l'amélioration du procédé concernant le fonctionnement des méthaniseurs pour substrats divers comme la partie fermentescibles des ordures ménagères ou encore les effluents industriels.

Le traitement des déchets municipaux par méthanisation a démarré à l'échelle industrielle en 1988 avec la première installation au monde à Amiens, traitant 80.000 t/an de déchets ménagers et utilisant le digesteur mis au point par la société VALORGA.

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 pollutions. 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. En plus, les domaines concernés par le procédé se sont multipliés pour y inclure les résidus, déchets et effluents résiduels des industries agroalimentaires ainsi que la gestion des substrats méthanisables, et ce, quelles que soient leurs origines.

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 ce qui rend la production du biogaz adaptable avec tous les types de débouchés possibles à proximité ou à distance pour des usages internes ou externes.

II.2. Définition

La digestion anaérobie ou fermentation méthanique est le processus naturel de la dégradation de la matière organique par une population microbienne complexe, et qui se traduit par la formation d'un gaz combustible appelé biogaz ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) et un résidu solide appelé digestat, plus ou moins appauvri en matières organiques. La fermentation avait d'ailleurs été définie par Louis Pasteur, depuis 1860, comme une vie sans air, une vie en anaérobiose.

La méthanisation est utilisée avec succès pour éliminer les pollutions d'origine organique tout en produisant de l'énergie et en consommant moins que les traitements aérobies ce qui explique le nombre important de ses applications dans le domaine du traitement des effluents et des déchets solides et liquides de diverses origines.

II.3. Mécanismes biologiques de la bio-méthanisation

Toutes les matières organiques ont le potentiel de se décomposer en mode anaérobie si les conditions sont propices. Cependant, certaines matières organiques prendront plus de temps que d'autres. C'est le cas de la matière ligneuse contenant de la lignine, comme le bois et les écorces. En effet, la matière ligneuse est plus difficilement biodégradable et est donc désavantagée dans les procédés de digestion anaérobie qui ont des temps de résidence relativement courts. Les matières ayant le meilleur potentiel sont les matières putrescibles, comme les résidus de tables, les résidus de procédés agroalimentaires, l'herbe, les boues municipales et les boues de papeteries (Zaher et al. 2007).

Comprendre les mécanismes réactionnels menant au processus de bio-méthanisation permet de saisir l'importance de connaître les caractéristiques des intrants et de prévoir les sous-produits de ces réactions. Encore aujourd'hui, la synergie qui règne entre les microorganismes dans les bio-digesteurs n'est pas tout à fait maîtrisée. Il s'agit, en effet, d'interrelations complexes entre différentes communautés microbiennes. Ces communautés divergent en fonction des intrants et des conditions dans le bioréacteur. Une étude a même démontré la présence, dans un seul bioréacteur, de près de 140 espèces différentes impliquées dans le processus de bio-digestion (Cresson, 2006). Entre la matière organique initiale et le biogaz final, il existe de nombreux intermédiaires.

Les bactéries anaérobies ont tendance à produire du CH_4 et du CO_2 à partir de la matière organique contrairement aux bactéries aérobies qui oxydent la matière organique en CO_2 et H_2O . Ce procédé comporte plusieurs étapes, la méthanisation est découpée traditionnellement en quatre phases :

A. Phase d'hydrolyse

Par laquelle les macromolécules organiques se trouvent décomposées en éléments plus simples. Le déchet solide est ainsi liquéfié et hydrolysé en petites molécules solubles, à l'origine du jus de fermentation. On parle alors de «solubilisation» des matières organiques.

B. Phase d'acidogénèse

Elle transforme les molécules simples par l'action des bactéries en acides de faibles poids moléculaire, tel que l'acide lactique ou des acides gras volatils de 2 à 5 atomes de carbone (acétate, propionate, butyrate,...); parallèlement, sont produits des alcools de faibles poids moléculaires, tel que l'éthanol, du bicarbonate (HCO_3^-) et de l'hydrogène moléculaire (H_2).

C. Phase d'acétogénèse

Tous les produits résultants de l'étape de liquéfaction/fermentation autres que l'acétate CH_3COO^- , le bicarbonate HCO_3^- et l'hydrogène moléculaire nécessitent une transformation supplémentaire avant de pouvoir effectivement produire du méthane. C'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfato-réductrices, productrices d'hydrogène, et d'hydrogène sulfuré (H_2S).

D. Phase de la méthanogénèse

La dernière étape est celle qui mène à la production du méthane. Cette étape est également la plus sensible et demande un bon contrôle de la température, du brassage et du pH. De plus, alors que les étapes précédentes peuvent tolérer la présence en faible quantité d'oxygène, cette étape est dite anaérobie strict. Encore une fois, cette phase est réalisée grâce à deux grandes catégories de microorganismes. Les méthanogènes hydrogénophiles (ou hydrogénotrophes) qui produisent le méthane en réduisant le dioxyde de carbone ou l'acide formique par l'hydrogène. Ces microorganismes travaillent donc en étroite collaboration avec celles de la phase de l'acidogénèse qui leur fournit du dioxyde de carbone et de l'hydrogène.

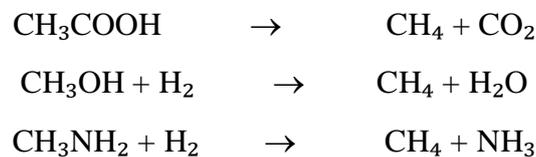
Ces également eux qui permettent de régulariser le taux d'hydrogène dans le bio-digester. Le deuxième groupe de microorganismes de la phase méthanogénèse est composé des méthanogènes acétoclastes (ou acétotrophes) qui utilisent le dioxyde de carbone, l'acétate, l'acide acétique, le méthanol et la méthylamine pour produire le méthane. Ce groupe de microorganismes génère normalement près de 70 % du méthane dans un bio-digester (CRAAQ, 2008; Cresson, 2006).

Les bactéries méthanogènes acétoclastes ont des vitesses de réaction faibles avec des temps de doublement pouvant aller de 0,5 à plusieurs jours, tandis que les bactéries méthanogènes hydrogénophiles qui servent aussi de consommatrices d'hydrogène, ont des temps de doublement très rapides, de l'ordre de quelques heures. Ces vitesses de croissance

élevées traduisent le fait que l'énergie récupérée lors des réactions effectuées est importante. Dans la digestion anaérobie, la pollution organique se retrouve principalement sous forme gazeuse et la production de boues en excès est faible. Elle est particulièrement bien adaptée aux effluents ayant une concentration supérieure à $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de DBO. En Europe, cette technique de dépollution est essentiellement utilisée pour le traitement des effluents industriels.

La méthanogenèse au cours de laquelle deux types de bactéries méthanogènes prennent le relais : les premières, acétogènes, réduisent l'acétate en méthane et en bicarbonate. Les secondes, hydrogéné- trophiques, réduisent le bicarbonate en méthane (CH_4).

- Les bactéries acétogènes, productrices de méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamines:



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



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

-De moitié aux trois quarts de méthane (CH_4)

-De un quart à la moitié de dioxyde de carbone (CO_2)

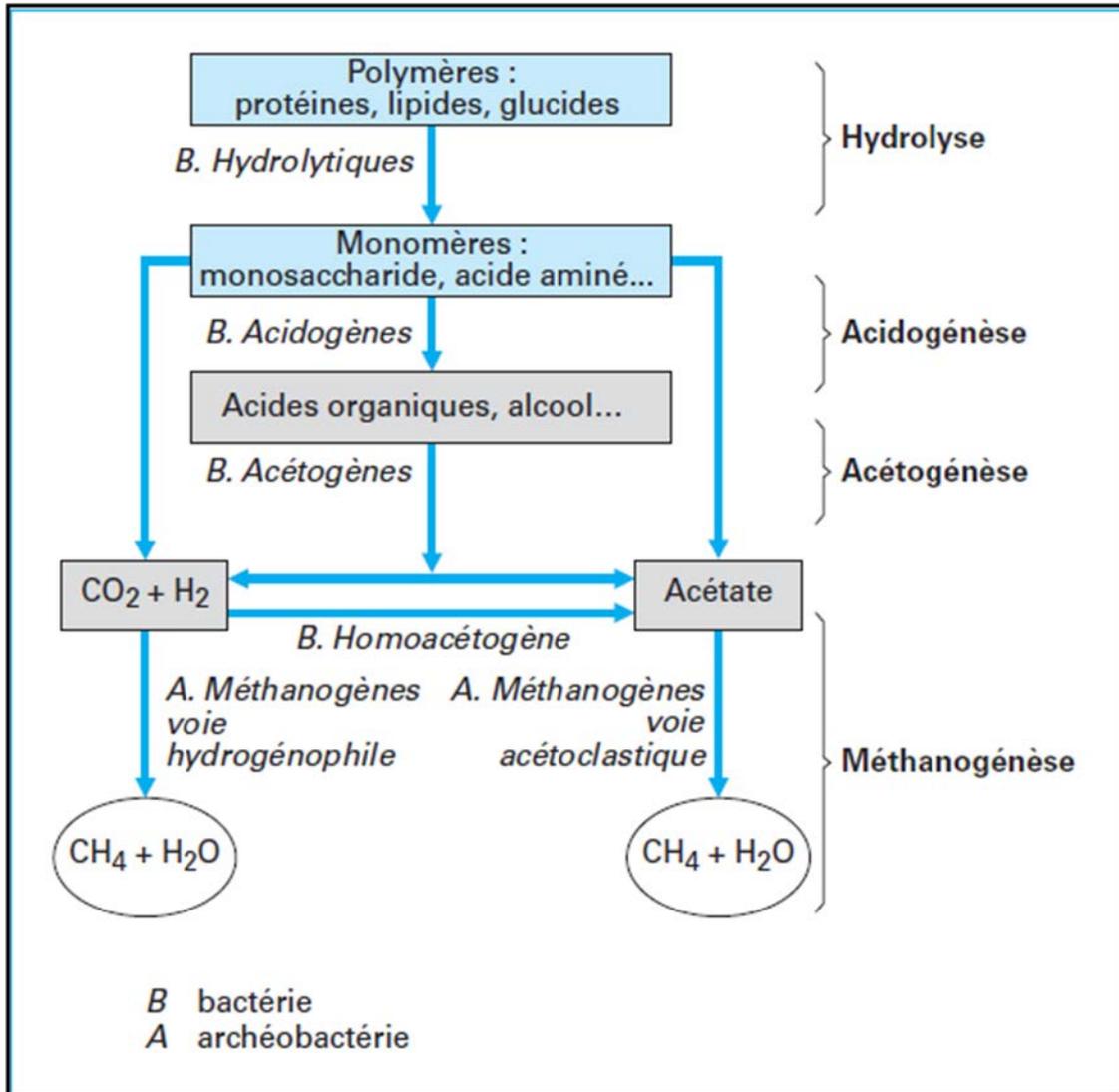


Figure II.1. Représentation schématique des différentes étapes du processus de dégradation anaérobie des matières organiques

Chapitre III : Production de biogaz

Il existe une multitude de types de bio-digesteurs. Le choix de ce dernier doit tenir compte de divers paramètres, tels que la capacité nécessaire, la caractérisation des matières à traiter et l'utilisation finale du biogaz et du digestat.

Les familles de bio-digesteurs peuvent être divisées selon quatre critères distincts. Ces critères sont:

- la température d'opération de la réaction de bio-méthanisation,
- le taux de siccité des intrants (procédé sec ou humide),
- le mode d'alimentation du bio-digesteur (en continu ou en lot),
- le nombre d'étapes menant à la production de méthane.

Malgré ces distinctions, certains procédés peuvent combiner plusieurs de ces critères, ce qui rend encore plus difficile leur classement.

III.1. Classification selon la température d'opération

Il existe trois plages de températures où la bio-méthanisation en milieu contrôlé est possible. À chacune de ces plages est associée une famille de microorganismes responsables de transformer la matière organique introduite en biogaz et en digestat. Le tableau résume ces trois familles et leurs températures d'opération (Tableau III.1).

Tableau III.1 Familles de microorganismes responsables de la bio-méthanisation (Cresson, 2006; Ostrem, 2004; Zaher et al., 2007)

Famille de microorganismes	Plages de températures	Température optimale
Psychrophiles	10 à 30 °C	12 à 18 °C
Mésophiles	20 à 50 °C	35 °C
Thermophiles	50 à 75 °C	55 à 60 °C

Les microorganismes psychrophiles sont les moins complexes à contrôler dans un bio-digesteur, puisqu'ils ne nécessitent pas un contrôle de la température très précis. Par contre, les réactions sont plus lentes, donc exigent un bio-digesteur plus grand. De plus, des trois familles, elle est celle qui possède le rendement en production de méthane le plus faible (Cresson, 2006).

La famille des mésophiles est la plus souvent utilisée dans la bio-digestion des matières organiques. Son rendement pour la production de biogaz et son besoin de chaleur modéré en font le choix d'un grand nombre de constructeurs et d'opérateurs de bio-digesteurs.

Les microorganismes mésophiles sont également plus résistants aux écarts de températures que la famille des thermophiles.

Finalement, la famille des microorganismes thermophiles est celle qui possède le meilleur rendement. Cependant, son besoin élevé en chaleur fait en sorte qu'une bonne partie du biogaz produit sert au chauffage du bio-digesteur. Malgré ce fait, en réduisant le temps de résidence des matières organiques dans ce type de bio-digesteur, il est possible d'obtenir un rendement supérieur aux bio-digesteurs fonctionnant à moyenne température. Par contre, ce rendement de production de biogaz (par rapport au volume du bio-digesteur) se fait au détriment du rendement d'abaissement de la charge organique des extrants. Les procédés thermophiles nécessitent donc des solutions pour traiter le digestat plus riche en matière organique. Néanmoins, les technologies thermophiles sont régulièrement le choix des fabricants, puisque les bio-digesteurs sont plus petits, possèdent de bons rendements de production de biogaz et la destruction des microorganismes pathogènes est plus efficace (Cresson, 2006; Ostrem, 2004; Zaher et al., 2007).

III.2. Classification selon la siccité des intrants

Les différents procédés de bio-méthanisation peuvent également être divisés en fonction de la siccité des matières organiques à l'intérieur des bioréacteurs. Il existe trois approches, soit la bio-digestion par voie humide, sèche et liquide.

1. La méthanisation par voie humide

La technique la plus courante en agriculture. Dans cette technique, le substrat a une consistance pâteuse. Le taux de matière sèche est généralement inférieur à 20 %, mais il est défini par la technologie utilisée. Le temps de séjour dans le digesteur, est de 40 à 60 jours et le procédé peut être thermophile ou mésophile.

2. La méthanisation par voie sèche

Elle est en cours de développement. Dans cette technique, le substrat a une consistance solide et comporte plus de 20 % de matière sèche. En général, le fumier de l'exploitation sert de base à la méthanisation. Les technologies proposées fonctionnent majoritairement en mésophile, et le temps de séjour moyen est de 2 mois.

3. La méthanisation par voie liquide

Elle représente une solution pour les industriels. Cette technique utilise un digestat liquide peu chargé en matières en suspension. Elle est rencontrée pour le monde agricole en laiterie, en fromagerie et en cave vinicole.

III.3. Classification selon le mode d'alimentation

Il existe une diversité de digesteurs (Scriban, 1999).

A. Digesteurs méthanogènes discontinus

L'alimentation en substrats se faisant en une fois ou bien de façon étagée dans le temps.

B. Digesteurs méthanogènes continus

- sans recyclage de microorganismes actifs: constitués de digesteurs continus infiniment mélangés, les digesteurs du type piston, les digesteurs en boucle.
- avec recyclage de microorganismes actifs : en dehors du digesteur, ou dans le digesteur: soit sans support (digesteur à lits de boues) soit avec support (digesteur à lits fixés).

III.4. Le choix du type de matériaux

En ce qui concerne le choix du type de matériaux pour la fabrication du digesteur, les trois matières utilisées sont :

Le béton, l'acier et les constituants polymériques. L'acier et le béton sont néanmoins largement et plus couramment utilisés (Pidoux, 2000).

III.5. Les systèmes de chauffage et d'agitation

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

Pour ce qui concerne le brassage, il peut être soit mécanique, au bien il est assuré par un bullage à gaz. Les deux procédés donnent tous les deux de bons résultats. Toutefois, le bullage à gaz est plus efficace pour les lisiers de porcs et le brassage mécanique par pompe donne plus de réussite pour les fumiers de bovins (Böhm, 1995).

III.6. Les systèmes de stockage

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

Le stockage peut se faire à plusieurs gammes de pression (entre 4 et 200 bar) mais le stockage du gaz à haute pression n'est que très rarement utilisé (Böhm, 1995)

III.7. Conditions de mise en œuvre

Plusieurs paramètres doivent être contrôlés pour le déroulement optimal de la méthanisation, et un suivi continu de ces paramètres est nécessaire pour maintenir la stabilité du processus et des qualités et quantités de biogaz et de digestat produits (Demuyneck *et al.*, 1984; La Farge, 1995; Moletta, 2008).

A. L'absence d'oxygène

Pour rappel, la méthanisation est une fermentation en anaérobie stricte. La flore méthanogène responsable de la production du méthane ne peut se développer qu'en absence d'air.

B. Nature du substrat

La digestion est une technique de dépollution et de conditionnement des déchets, qu'ils soient liquides ou solides:

1- Les déchets solides

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

2- Les déchets liquides

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

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

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

C. Température de digestion

La température est un paramètre physique qui agit directement sur l'activité de micro-organismes anaérobies et par conséquence sur la stabilité de la digestion, sur les rendements de production de biogaz et sur la performance de traitement.

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

D. Potentiel hydrogène pH

Le pH est un paramètre chimique important puisque la communauté bactérienne méthanogène est sensible aux variations de pH. Cette communauté requiert un milieu neutre avec une valeur de pH comprise entre 6,5 et 8,5 pour son fonctionnement optimal.

E. Homogénéité de substrat

C'est un paramètre important pour optimiser les conditions de la méthanisation en assurant un bon contact entre les micro-organismes et la biomasse traitée et en évitant les gradients de température dans le digesteur. Cette homogénéité peut être garantie par plusieurs voies : un brassage mécanique, une recirculation de substrat ou une recirculation sous pression du biogaz produit.

F. L'agitation

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

G. L'humidité

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité des déchets doit être suffisante pour que l'hydrogène, première étape de la bio-méthanisation, puisse se dérouler normalement. Si au contraire l'humidité est insuffisante, l'acidification se fait trop vite au détriment de la méthanisation, de ce fait le substrat organique doit être dilué (85 à 90% d'eau avec 10 à 15% de matière sèche), (Tou, 2001).

H. Concentration de matière organique dans les substrats

Le niveau de concentration en matière organique dans les substrats est important pour le fonctionnement de l'installation et pour la prévision des quantités de biogaz produit. Ce paramètre peut être mesuré par la « Demande Chimique en Oxygène » (DCO) avec comme unité courante la masse d'oxygène consommé pour la dégradation biologique (gO_2/l). La mesure de cette grandeur à l'entrée et à la sortie du méthaniseur permet de calculer l'efficacité

du traitement. Ce paramètre peut également être mesuré par le COT «Carbone Organique Total».

I. Rapport C/N

Ce rapport devra se situer autour de 30 sans jamais dépasser 35 (Herman, 2010).

J. Le temps de séjour

La période durant laquelle vont séjourner les substrats est déterminante sur leur taux de dégradation par la flore microbienne. La température et la nature du substrat auront également un effet non négligeable. Ces paramètres réunis peuvent faire varier le temps de séjour des matières dans le réacteur de quelques heures à plusieurs dizaines de jours. Afin d'uniformiser le substrat et d'homogénéiser les conditions au sein du digesteur.

K. La présence des inhibiteurs

La fermentation anaérobie peut parfois être ralentie par la présence d'inhibiteurs. Certaines molécules, au-delà de seuils de concentration déterminés, entraînent des inhibitions des espèces bactériennes impliquées dans la méthanisation. Ces molécules inhibitrices peuvent être apportées dans l'effluent d'entrée ou générées par le processus de méthanisation lui-même.

Tableau III.2 Liste des inhibiteurs connus et de leurs concentrations seuils pour la méthanisation (Moletta et Torrijos, 1999)

Substances	Modérément inhibitrices (mg/L)	Fortement inhibitrices (mg/L)
Chlorure de sodium	10 000	40 000
Sodium	3 500 à 5 500	8 000
Potassium	2 500 à 4 500	12 000
Calcium	2 500 à 4 500	8 000
Magnésium	1 500 à 3 000	3 000
Azote ammoniacal	1 000 à 1 500	> 3 000
Sulfure	-	200
Cuivre	-	50 à 70
Chrome (VI)	-	200 à 600
Chrome (III)	-	180 à 420
Nickel	-	30

III.8. Produits de la bio-méthanisation

III.8.1. Le biogaz

Le gaz, produit par la fermentation méthanogène, est connu sous les noms de gaz de marais, gaz des égouts ou biogaz.

III.8.1.1. Composition du biogaz

La composition du biogaz est consignée dans le tableau III.3.

Tableau III.3 *Composition du biogaz (Lagrange, 1979).*

Gaz	%
Méthane CH ₄	50 à 70
Dioxyde de carbone CO ₂	35 à 40
Gas divers: H ₂ S, NH ₃ , C _n H _{2n} ...	0,5 à 3
Azote N ₂	1 à 5
Hydrogène H ₂	1 à 3
Oxygène O ₂	0,1 à 1

III.8.1.2. Propriétés et caractéristiques 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 environ égale à 0,7. Par conséquent, en cas de fuite, le bio-méthane aura tendance à s'échapper vers le haut contrairement au butane et au propane, ce qui évite les risques d'accidents (Lagrange, 1979).

III.8.1.3. Les caractéristiques moyennes du biogaz

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

Tableau III.4 Caractéristiques moyenne du biogaz (De La Farge, 1995).

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

III.8.1.4. Pouvoir calorifique du biogaz

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

Tableau III.5 Pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane (De La Farge, 1995)

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

* KWh ≈ 860 kcal.

- **Pouvoir calorifique supérieur (PCS)**

C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible. Cette énergie comprend la chaleur sensible, mais aussi la chaleur latente de

vaporisation de l'eau, généralement produite par la combustion. Cette énergie peut être entièrement récupérée si la vapeur d'eau émise est condensée, c'est-à-dire si toute l'eau vaporisée se retrouve finalement sous forme liquide.

▪ **Pouvoir calorifique inférieur (PCI)**

C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible sous forme de chaleur sensible, à l'exclusion de l'énergie de vaporisation (chaleur latente) de l'eau présente en fin de réaction.

Le méthane brûle avec une flamme bleue, lorsque sa combustion est complète. Celle-ci s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur. Dans ces conditions, 1 m³ de méthane peut atteindre en brûlant une température de 1400 °C et dégage une quantité de chaleur de 8500 à 9500 kcal.

La comparaison du pouvoir calorifique du biogaz avec celui des combustibles usuels permet d'énoncer les équivalents approximatifs suivants :

- ❖ 1 m³ de biogaz équivaut, du point de vue énergétique à 1,25 kwh.
- ❖ Sa combustion produit une quantité d'énergie équivalente à celle de 0,7 litre de pétrole ou 0,6 litre de gasoil (Tou, 2001).

III.8.1.5. Les équivalences énergétiques du biogaz (Tou, 2001; Angélique, 2002)

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'un N m³ de biogaz brut qui a une composition moyenne contenant 60% en méthane (CH₄) vaut environ 5,75 kWh et est semblable à celui de:

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

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

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

III.8.1.6. Valorisation du biogaz

La composition du biogaz est variable, dépendante de plusieurs paramètres mais elle est en général, proche de celle du gaz naturel. Il existe plusieurs modes de valorisation du biogaz (ATEE; Moletta, 2008; Sabonnadière 2007).

1) Valorisation thermique

La valorisation thermique se fait notamment par la combustion du biogaz dans une chaudière pour la production d'eau chaude, de vapeur ou d'air chaud. C'est la voie la plus simple de valorisation du biogaz. En effet, il suffit de comprimer le biogaz avant de l'injecter dans le brûleur. Cependant, des teneurs élevées en hydrogène sulfuré ou en vapeur d'eau peuvent provoquer des problèmes conduisant à des dysfonctionnements. L'énergie produite a plusieurs débouchés, et peut servir pour divers usages thermiques selon la situation. Une partie peut être consommée, si nécessaire, pour l'échauffement du digesteur, mais aussi pour l'échauffement des locaux, le séchage des fourrages, la déshydratation des boues urbaines, etc.

2) Valorisation en force motrice

Dans ce cas il est brûlé dans des moteurs à combustion interne traditionnels adaptés à la combustion de biogaz. Il s'agit de moteurs dits dual- fuel dérivés des moteurs diesel qui fonctionnent avec un mélange de biogaz avec une petite quantité de gazole (5-10% du mélange) permettant son auto- inflammation ou de moteurs à étincelles dérivés des moteurs essence fonctionnant au biogaz seul.

3) Valorisation électrique

D'un point de vue électrique, plusieurs voies de valorisation sont possibles.

- Moteur thermique équipé d'un alternateur : Il s'agit des mêmes moteurs que ceux mentionnés ci-dessus.
- Chaudière au biogaz, suivie d'une turbine à vapeur : Elle présente la voie classique la plus simple pour la production de l'électricité à partir de biogaz puisque l'épuration de celui-ci n'est pas exigée comme dans le cadre de sa valorisation thermique.
- Turbine à combustion : Le biogaz est brûlé dans une chambre qui précède la turbine, puis décomprimé dans la turbine équipée d'un alternateur. Dans ce cas le biogaz doit être déshydraté et comprimé en amont de la chambre de combustion.

4) Cogénération

Il s'agit d'une valorisation combinée de la chaleur et de l'électricité, elle est déployable à partir des trois techniques présentées pour la valorisation électrique en y ajoutant des échangeurs thermiques récupérant la chaleur perdue. Les rendements énergétiques peuvent alors atteindre 90%.

5) Valorisation en biocarburant automobile

L'utilisation du biogaz comme carburant automobile demande une excellente qualité de pureté du gaz. Il doit contenir un minimum de 96 % de méthane. Il ne doit pas contenir d'eau, de soufre, d'organo- halogénés, de carbone ou de métaux. Il est nécessaire également de le comprimer.

6) Injection sur le réseau de gaz de ville

Pour son utilisation dans le réseau de gaz de ville, une épuration importante est nécessaire afin de rendre la composition du biogaz proche de celle du gaz naturel.

7) Pas de valorisation (torchère)

Le biogaz peut être brûlé dans une torchère lorsque la valorisation énergétique n'est pas la motivation essentielle de la méthanisation, mais pour d'autres raisons aussi comme :

- la réglementation obligeant les sites polluants à dépolluer leurs rejets.
- l'efficacité du traitement par méthanisation, au regard d'autres techniques, par rapport à la consommation énergétique, à l'occupation du sol ou au coût global.

III.8.2. Le digestat

Le «digestat» est la matière organique qui n'a pas été transformée en biogaz lors de la fermentation. En sortant du digesteur ou réacteur, il doit être déshydraté et mis en tunnels de maturation étanche ou bien ventilés pour achever la réaction anaérobie et commencer une phase de compostage. Il devient alors un déchet traité et stabilisé. Ce digestat peut servir comme un amendement agricole à cause de ses qualités fertilisantes vu sa teneur en Azote, Phosphore, Potassium, Calcium, etc.

III.9. Avantages et inconvénients de la bio-méthanisation

III.9.1. Avantages (Mignon, 2010 ; Agra-Ost, 2006 ; Alseadi et al., 2008)

- Réduction des GES: La bio-méthanisation permet d'éviter les rejets dans l'atmosphère du CH₄ qui se dégage des stockages d'effluents. De plus, la combustion du biogaz transforme une molécule de CH₄ en eau plus une molécule de CO₂. Cette dernière est près de 21 fois moins nocive pour l'environnement que le méthane.
- Filière locale et emploi : la création d'unités permet de diversifier le métier d'agriculteur et parfois même de créer de l'emploi durable.
- Production et autonomie énergétique : comme énoncé plus haut, le biogaz est une source d'énergie à part entière pouvant être valorisée de plusieurs façons. Elle peut se substituer en partie voir totalement aux énergies fossiles et permet par conséquent de rendre les producteurs indépendants de celles-ci. Une part de l'énergie verte est consommée localement et à moindre coût.
- Production d'un produit semi-fini : le digestat, valorisé comme amendement agricole, possède une part d'azote minéralisée. Ceci entraîne une meilleure assimilation par les plantes. Grâce au fractionnement des doses et à des apports survenant aux moments où la plante en ressent le besoin, il est possible de réduire la part d'azote lessivée dans le sol responsable de la pollution des eaux.
- Intérêts agronomiques du digestat : on peut citer la valeur fertilisante du digestat, son effet structurant pour le sol, son caractère désodorisé ainsi qu'une réduction des adventices et des pathogènes. Il permet également de réduire l'utilisation des fertilisants chimiques lourds en bagage énergétique.
- Diversification : la diversification du métier d'agriculteur diminue les risques liés aux crises rencontrées par ce secteur et apporte un nouveau revenu au sein de l'exploitation.
- Traçabilité: les intrants mais aussi le digestat bénéficient d'une surveillance et de tests permanents évitant ainsi des dangers pour notre environnement.
- Valorisation des sous-produits : le processus constitue une voie de traitement et de valorisation des déchets de l'agriculture mais aussi des secteurs industriels et agro-alimentaires.
- Accessibilité : la bio-méthanisation peut répondre à des situations variées. Elle s'applique aussi bien à la ferme qu'à l'entreprise.

- Stockage : l'agriculture a connu récemment une importante mise aux normes des stockages d'effluents. Pour certains, elle a engendré des coûts trop importants qui ont poussé bon nombre d'éleveurs à mettre un terme à leur activité. La bio-méthanisation est une manière différente de stocker ses effluents tout en les valorisant. Elle réduit également les volumes et par conséquent les frais liés au transport et à l'épandage.
- Subvention de l'état : cette activité est hautement subventionnée par l'état : aides à l'investissement (ISA...), aides à la production (CV), déduction fiscale et exonération du précompte immobilier.
- Meilleure image de l'agriculture : diminuer les odeurs, hygiéniser les effluents, produire de l'énergie verte, créer de l'emploi sont des facteurs permettant de redorer l'image de notre agriculture aux yeux de la société.

III.9.2. Inconvénient (Mignon, 2010 ; Herman, 2010 ;Schenkel, 2010)

- Investissement : il représente le frein majeur au développement de cette technique. En effet, l'investissement de départ est lourd et nécessite d'apporter une part de capital propre ainsi que des garanties auprès des banques encore trop souvent réticentes du fait de la méconnaissance de la bio-méthanisation.
- Saisonnalité des apports : les effluents d'élevage sont essentiellement produits durant les mois d'hiver. Les intrants énergétiques sont récoltés durant l'été et au début de l'automne. Les ressources en intrants doivent être précisément déterminées avant d'entreprendre la bio-méthanisation de façon à garantir un fonctionnement continu du digesteur.
- Traitement des effluents : la méthanisation ne représente pas encore une solution pour le traitement en azote des déchets agricoles.
- Période de mise en route : à l'heure actuelle, l'établissement de telles installations peut prendre de 2 à 4 ans.
- Administratif : les dossiers au niveau des aides, du permis, etc. demandent du temps, de l'argent et de ce fait découragent souvent les porteurs de projet.
- Purification biogaz : la purification du biogaz entraîne des déchets (soufre, métaux lourds) qu'il faut ensuite gérer.
- Utilisation de la chaleur : une des conditions nécessaires à la bonne rentabilité d'un projet reste l'utilisation et la valorisation continue de la chaleur produite tout au long de l'année.

Chapitre IV : Matériel et méthodes

IV.1. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de deux parties principales.

- ❖ **Digesteur:** C'est une enceinte fermée qui est utilisée pour la digestion en discontinu, de la matière organique; dans notre cas il s'agit du Lactosérum issu de la production de fromage. Le digesteur que nous avons utilisé est une enceinte fermée en plastique d'une capacité de 5 litres, de forme cylindrique, utilisée verticalement. Sur son bouchon on a percé trois trous, le premier pour le thermomètre maintenu à $T=35^{\circ}\text{C}$, le deuxième pour l'ajout de l'inoculum, et le troisième pour un tuyau servant à la récupération du gaz produit (Figure IV.1).



Figure IV.1: Photo du dispositif expérimental

- ❖ **Le substrat:** Le substrat utilisé est constitué essentiellement de lactosérum prélevé à la laiterie de Boudouaou. Le lactosérum de nature douce a été transporté dans des jerricans de 5 L et a été placé dans un congélateur pour éviter toute dégradation de la matière organique avant utilisation. Pour la co-digestion, on a utilisé des boues activées. Ces boues ont été ramenées, le jour même, de la Station d'épuration des eaux usées S.E.A.A.L de Baraki.

❖ Préparation et lancement de la fermentation

La fermentation se déroule dans un digesteur d'une capacité de 5 L. Pour les co-digestions, on a utilisé un mélange contenant 2 L de lactosérum et 3 L de boues activées. L'ajustement du pH à 7 se fait avec une solution de NaOH (2N).

IV.2. Méthodes analytiques

IV.2.1. Mesure du pH

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH mètre étalonné de marque:(Fisherbrand, hydruS 100 et de sonde: HI 1131)

IV.2.2. Mesure de la DCO

La densité de la matière organique a été déterminée au moyen d'un spectrophotomètre UV- visible en mesurant l'absorbance à une longueur d'onde de 600 nm et en se référant à un blanc ne contenant que l'eau distillé. La mesure de la densité optique doit être inférieure à 1,3 pour pouvoir appliquer la loi de Lambert- Beer. La valeur de la DO est ensuite convertie en une entité de mg d'O₂/l qu'on appelle demande chimique en oxygène (DCO), par le biais d'une courbe d'étalonnage présentée en annexe dont l'allure est une droite d'équation :

$$DO = 0,0003 \text{ DCO} + 0,0067 \quad \text{avec: DCO (mg/L d'O}_2\text{)}$$

IV.2.3. Détermination du volume de biogaz

Le volume de biogaz produit dans le bioréacteur va transiter dans une colonne graduée (en ml) remplie d'eau. La variation de niveau d'eau produit par la production du biogaz indique le volume de gaz produit, Ce système est facile à mettre en œuvre. Cette méthode a été approuvée au niveau du laboratoire de bioconversion à l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien à Adrar (URER.MS Adrar), (Siboukeur, 2010). Le dispositif conçu pour mesurer le volume du biogaz est illustré par la figure IV.2.

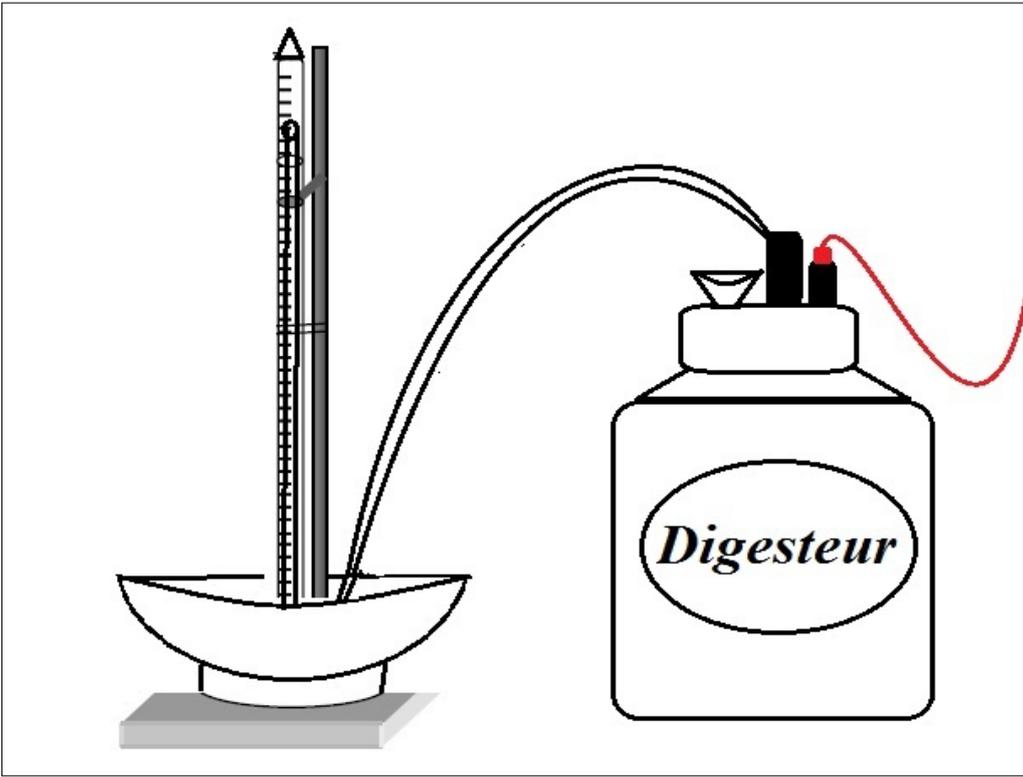


Figure IV.2: Schéma de mesure et de stockage du biogaz produit.

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1. Caractéristiques des substrats utilisés

La digestion de lactosérum issu de l'unité de production de Boudouaou a duré 25 jours et les caractéristiques initiales du lactosérum sont représentées dans le tableau suivant:

Tableau V.1: *Caractéristiques des substrats utilisés.*

Substrat	Paramètres	Résultats
Lactosérum	pH	6,44
	DCO	10 235 mg d'O ₂ /L
Lactosérum- boue	pH	6,57
	DCO	40 150 mg d'O ₂ /L

V.2. Valorisation du lactosérum

Dans cette partie, on a étudié une des voies de valorisation du lactosérum qui est la valorisation énergétique qui se traduit par la production d'un biogaz. Pour cela, on a effectué des fermentations dans un réacteur de capacité de 5 L isolé hermétiquement pour assurer l'anaérobiose.

Afin de bien voir le potentiel de production du biogaz à partir des déchets de l'industrie fromagère. On a travaillé sur les trois fermentations suivantes:

Tableau V.2 : *Données générales sur les digesteurs mis en œuvre.*

Digesteur	Substrat	Ajustement du pH	inoculum
Expérience I	Lactosérum	Sans	Sans
Expérience II	Lactosérum- boue	Avec du NaOH (2N)	Sans
Expérience III	Lactosérum- boue	Avec du NaOH (2N)	Avec (boue)

V.2.1. Evolution du pH

Les figures ci après illustrent les différentes courbes d'évolution du pH au niveau des trois digesteurs expérimentaux étudiés.

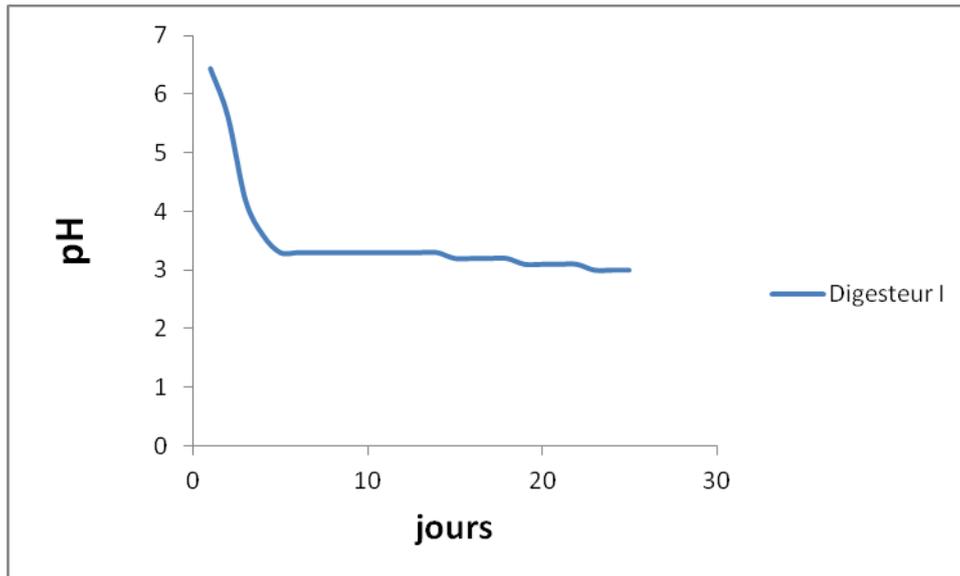
Expérience I

Figure V.1: Variation du pH en fonction du temps à $T=35^{\circ}\text{C}$ (digesteur I)

Le pH initial du lactosérum était de 6.4. Ce pH a diminué avec le temps jusqu'à une valeur de 3.3 après seulement 5 jours de mise en route de l'expérience. Cette valeur de pH est restée constante jusqu'à la fin de l'expérience.

Durant la digestion anaérobie du lactosérum, la formation des acides gras volatiles est très rapide. Le lactose s'hydrolyse facilement par les bactéries formatrices de ces acides. Les valeurs de pH de 3.3 relevées lors de cette étude sont similaires à celles rapportées par Ghaly (1989), Ghaly et Pyke (1991) et Ghaly et Ramkumar (1999). Ce sont ces faibles valeurs de pH (3.3) qui sont à l'origine de l'inhibition de la phase méthanogène (Ghaly et Ramkumar, 1999) responsable de la production de biogaz. On retient donc que le digesteur n'a pas produit de bio-méthane du fait de l'acidification du milieu.

Expériences II et III

La phase de démarrage est indispensable pour la constitution des populations bactériennes qui vont effectuer la fermentation et assurer une marge de pH permettant la production de biogaz. La correction du pH a été réalisée dès le 1^{er} jour à l'aide d'une solution de NaOH (2N) pour atteindre un seuil minimum de 7. On constate, d'après la figure V.2, que l'évolution du pH dans les deux digesteurs II et III présente un même comportement tout au long de la phase du démarrage. Une légère augmentation du pH en faveur du digesteur III, a été détectée dès le 20^e jour.

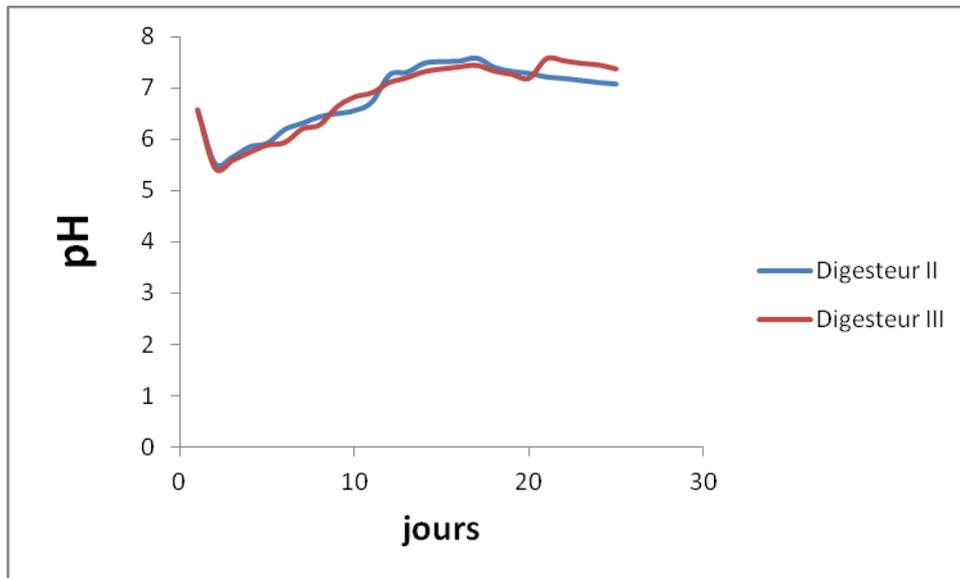


Figure V.2: Variation de pH en fonction du temps à $T=35^{\circ}\text{C}$ (Digesteur II et III)

V.2.2. Evolution de la demande chimique en oxygène DCO

La valeur de la DCO est une mesure du pouvoir polluant d'un déchet. Donc sa réduction correspond à la quantification du succès de n'importe quel système de traitement dans la réduction de la matière organique contenu dans le déchet (Ghaly et Ramkumar, 1999).

Le coefficient de variation obtenu, durant le suivi de la variation de la DCO était très petit, de l'ordre de 3%. L'abattement de la DCO varie peu ou pas dans l'enceinte réactionnelle. Cela est dû à l'inhibition de la méthanisation aux faibles valeurs de pH acide (3.3).

Le cas de figure V.3 qu'on a obtenu montre une diminution considérable de la demande chimique en oxygène (DCO) durant les 25 jours de la digestion, au sein des deux digesteurs II et III.

En premier lieu, il y a conversion de la matière organique en acides volatiles qui est le principal contributeur à la DCOS (demande chimique en oxygène soluble). Par la suite vient la production des cellules microbiennes et le biogaz à partir des composants organiques solubles (Ghaly et Ramkumar, 1999).

Expérience I

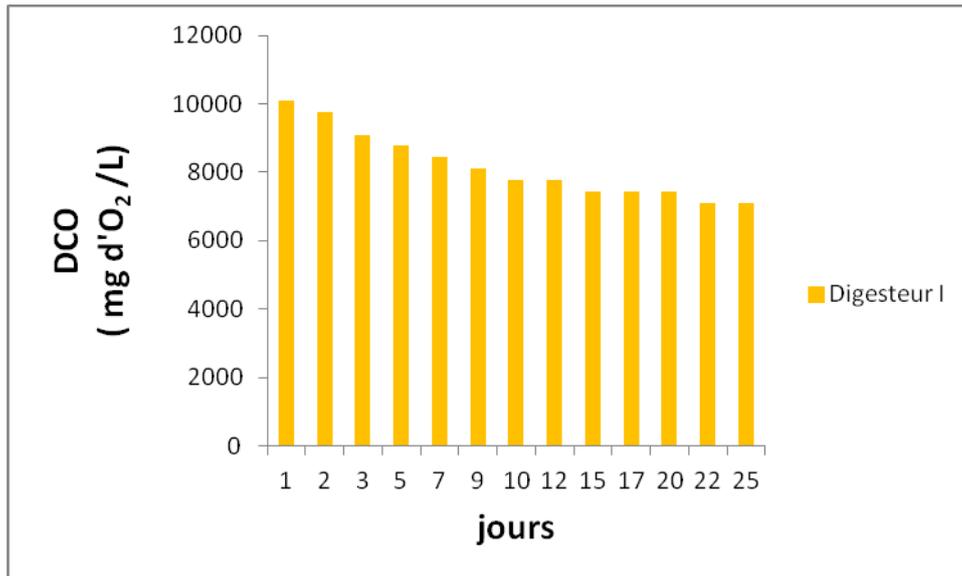


Figure V.3: Variation de la DCO en fonction du temps à T=35°C (Digesteur I).

Expériences II et III

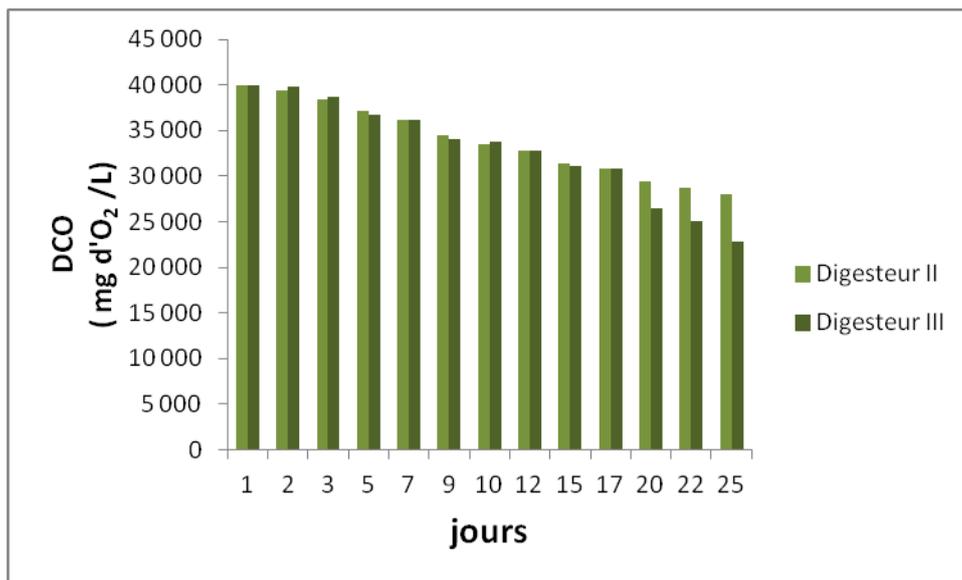


Figure V.4: Variation de la DCO en fonction du temps à T=35°C (Digesteur II et III).

Le coefficient de variation de la DCO dans les deux digesteurs (II et III), était petit (de 0.8 % à 11 %), ce qui indique des conditions de stabilité plus au moins favorables.

Le coefficient de variation était très petit (0,6 à 1.9 %), indiquant des conditions de stabilité favorables (Ghaly et Ramkumar, 1999).

La réduction de la DCO dans les deux digesteurs, était de l'ordre de 25% et 42% pour le digesteur II et III respectivement. Cette différence dans l'abattement de la DCO entre les deux digesteurs, est due à l'effet de l'ajout de l'inoculum dans le digesteur III. L'inoculum contenait des populations bactériennes, ce qui a accentué un petit peu la diminution de la DCO dans le digesteur III contrairement au digesteur II.

Les rapports de réduction de la DCO pour le Lactosérum après une digestion anaérobie varient considérablement dans la littérature. Clanton et al. (1985) rapportait une réduction de DCO inférieure à 20% pour un temps de séjour de 17 jours. Ghaly (1989) une réduction de 13.4% pour un digesteur à 2 étapes travaillant à 35°C et un temps de séjour de 15 jours. Bakus et al. (1988) une réduction de 11% pour un digesteur travaillait à 38°C et 30 jours de séjour. Clanton et al. (1981) une réduction inférieure à 42% pour un digesteur opérationnel à 38°C et pour différents taux d'alimentation. Fox et al. (1988) rapportait pour un digesteur opérationnel à 38°C et un temps de séjour de 12 jours une réduction de 39%. Ghaly et Pyke (1991), 32.2% de réduction de DCO dans un digesteur à 2 étapes travaillait à 35°C et pour un temps de séjour de 15 jours. Fox et al. (1992) a trouvé une réduction de 61% pour un digesteur travaillait à 38°C et un temps de séjours de 7 jours. Yan et al. (1989), Hawang et Hansen (1992) rapportaient une réduction de 97 et 99% respectivement. Les taux de réduction de la DCO (25% et 42%) rencontrés dans cette étude, concordent avec les valeurs rapportaient par la littérature.

V.2.3 Acides gras volatiles

La teneur en acides gras volatiles trouvé durant cette étude était assez élevée (19480 mg/L), comparé à celle des autres substrats (boues de stations d'épuration, déchets d'élevages,...), utilisés dans la digestion anaérobie. Cela est dû à la rapidité de l'hydrolyse du lactose contenu dans le lactosérum pour avoir des courtes chaînes d'acides volatiles. Des concentrations de même ordre de grandeur ont été rapportées par plusieurs chercheurs dans le cas de la digestion du lactosérum; Yang et al. (1992); Bakus et al. (1988) et Fox et al.

V.2.3. La production du biogaz

Expérience I

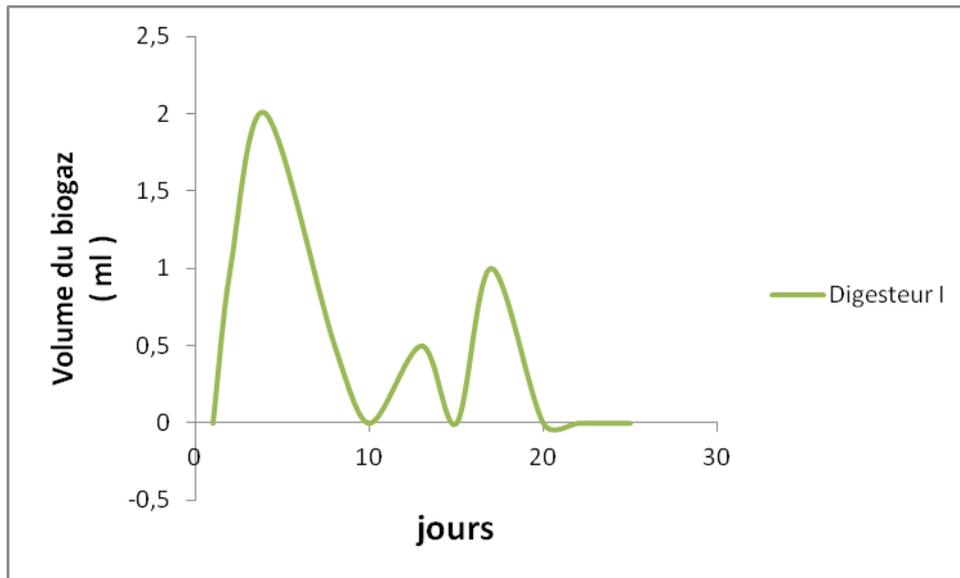


Figure V.5: Variation de la production de biogaz en fonction du temps à $T=35^{\circ}\text{C}$ (digesteur I).

Il est à relever de la figure V.5 que la quantité de biogaz produite dans le digesteur I reste très faible (0.25 ml/J). Cela est dû à l'inhibition de la méthanogenèse qui est la phase où il y a conversion des produits assimilables par les microorganismes en particules gazeuses.

La production de gaz dans les digesteurs expérimentaux conduits en discontinu, débute après la phase de démarrage avec une quantité croissante progressivement pour atteindre un niveau de production stable, puis elle commence à chuter.

L'entrée en production de biogaz pour les digesteurs II et III a débuté dès que la valeur limite inférieure de pH convenable pour la production de biogaz est atteinte (3^{e} jour).

Après ajout de l'inoculum dans le digesteur III, on constate un redémarrage de la production. L'inoculum garantit l'existence de populations microbiennes responsables de la bio-méthanisation.

Expériences II et III

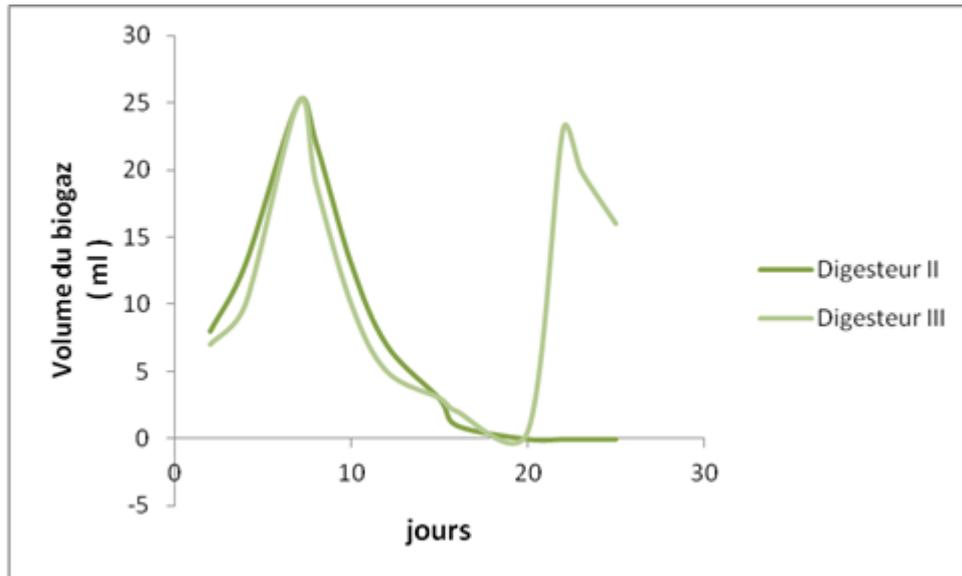


Figure V.6 : Variation de la production de biogaz en fonction du temps à $T=35^{\circ}\text{C}$ (digesteur II et III).

Conclusion

CONCLUSION

Les problèmes environnementaux de l'industrie engendrent la pollution de l'eau, de l'air et du sol, au bruit et aux déchets. Dans la filière laitière, le principal problème se situe au niveau de l'eau. Les industries laitières n'ont aucune incidence particulière sur la pollution de l'air et des sols.

L'industrie fromagère étant un exemple des industries laitières qui compte parmi ces pollueurs, elle est à l'origine de la pollution des cours d'eau par le rejet de quantités considérables de lactosérum qui est un sous produit très riche en matières organiques, facilement biodégradable et très fermentescible. Même s'il ne présente pas de toxicité, le rejeter dans le milieu naturel engendrera une importante pollution : odeurs désagréables, tendance d'acidification des cours d'eau, etc. Afin de prévenir ce problème, la stratégie mise en place consiste à effectuer une récupération maximale du coproduit et le valoriser.

La valorisation par voie biologique est l'un des moyens les plus efficaces qui peuvent réduire de manière importante la charge polluante d'un déchet de nature organique.

Le but de notre travail est de valoriser la biomasse par digestion anaérobie. On a utilisé comme matière première le lactosérum issu de la laiterie de Boudouaou.

Le suivi des effets de l'ensemencement et l'ajout de l'hydroxyde de sodium pour le contrôle du pH, sur les performances d'un digesteur anaérobie travaillant à une température mésophile (35°C), a montré qu'il est nécessaire de contrôler et d'ajuster le pH d'un digesteur durant la digestion anaérobie pour un lactosérum doux.

Sans contrôle de pH, la valeur réduite de 3.3 a inhibé le processus de la méthanogenèse et comme incidence directe une production presque nulle de biogaz. Le réajustement du pH à une valeur de 7 a fait accroître la production de biogaz jusqu'à atteindre une valeur maximale de 25 ml et un abattement de DCO de 25%.

Le réensemencement du digesteur après ajustement du pH s'est avéré nécessaire afin de restaurer la production de CH₄ avec un abattement de DCO de 43%.

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

Références bibliographiques

- 1) **Gaid .A:** épuration biologique des eaux usées urbaines / Ed : N° 124 05 /1984]
- 2) **Agra-Ost. 2006.** *Evaluation du potentiel de la filière agricole de biométhanisation.* St-Vith : s.n. 2006. p. 69.
- 3) **Alais,C.** La valorisation du lactosérum " les bases et les problèmes". La Technique laitière, (1981), 952, 7-10.
- 4) **Al seadi, Teodorita et al. 2008.** *Biogas Handbook.* [éd.] T. AL SEADI. Esbjerg : s.n., 2008. p. 126. ISBN 978-87-992962-0-0.
- 5) **ATEE.** Association Technique Energie Environnement-Club Biogaz. <http://www.atee.fr/>.
- 6) **J.L. Audic , B.Chaufer, et G. Daufin,** Non-food applications of milk components and dairy co-products. A review: INRA, EDP Sciences, (2003), 417-438.
- 7) **B. D.Backus, C. J. Clanton, P. R. Goodrich and H. A. Morris.** 1988. Carbon-to-nitrogen.
- 8) Ratio and hydraulic retention time effect on the anaerobic digestion of cheese whey.
- 9) *Transactions of the ASAE*, Volume 31, No. 4 pp. 1274] 83.
- 10) **B. De La FARGE.** «Le biogaz : Procédés de fermentation méthanique », Edition Masson, Toulouse 1995.
- 11) **D. Berry.** *Ingredients foods. Dairy foods*, (2000), 101(4), 32p
- 12) **B. Lagrange.** « Biométhane : principes, techniques, et utilisations », Tome 02, Edition Edisud, Energies Alimentaires, 1979
- 13) **T. Bremerhaven ,** étude de faisabilité de nouvelles techniques pour la valorisation des déchets dans le secteur agroalimentaire au Maghreb arabe, (2011), 1-33.
- 14) **A. Builder,** (1968). Les fosses septiques : leur construction, leur fonctionnement, leur entretien, Dunod, Paris, p.254.
- 15) **C. J.Clanton, P. R. Goodrich, H. A. Morris and B. D. Backus.** 1985. Anaerobic digestion of
- 16) cheese whey. In: *Agricultural Waste Utilization and Management.* ASAE Publication 13-85. ASAE, St. Joseph, Michigan, pp. 475] 82.
- 17) **C. J. Clanton, P. R. Goodrich, P. A. Le e and B. D. Backus.** 1981. Anaerobic digestion of cheese whey as a wastewater treatment alternative. ASAE Paper No. 81-6007. St. Joseph, Michigan.
- 18) **R .Cresson,** (2006). Étude du démarrage de procédés intensifs de méthanisation. Impact des conditions hydrodynamiques et de la stratégie de montée en charge sur la formation et l'activité du bio film. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université Montpellier II. [En ligne]. http://www.inra.fr/ea/fichier_these/These-RCresson.pdf (page consultée le 26 juillet 2010).
- 19) **Cyril Gomella ; Henri Guerrée :** les eaux usées dans les agglomérations urbaine ou rurales / Ed : Eyrolles, 1982].
- 20) **Demuyneck, M., Nyns, E. J., & Palz, W.** (1984). *Biogas Plants in Europe : A Practical Handbook* (D. Reidel). Dordrecht / Boston / Lancaster, p.361.
- 21) **Dryer,J.** La grande diversité du lactosérum. *Dairy foods*, (2001), 102(5), 1-35.
- 22) **Fersadou H.** Valorisation du Lactosérum par production de l'acide lactique par *Streptococcus thermophilus*. Mémoire de fin d'étude en génie de l'environnement. Ecole Nationale Polytechnique, El Herrach ,2009.
- 23) **Fox, E. J.** 1989. *Buffers Used for pH Control in Anaerobic Digestion of Cheese Whey.* Unpublished M.S. Thesis. University of Minnesota, St. Paul, Minnesota.
- 24) **Fox, E. J., C. J. Clanton, P. R. Goodrich, B. D. Backus and H. A. Morris.** 1988. Buffers used for pH control in anaerobic digestion of cheese whey. ASAE Paper No. 88-6605. St. Joseph, Michigan.
- 25) **Fox, E. J., C. J. Clanton, P. R. Goodrich, B. D. Backus and H. A. Morris.** 1992. Liming an

- 26) **Ghaly, A. E.** 1989. Biogas production from acid cheese whey using a two stage digester. *Energy Sources*, Volume 11, pp. 237] 50.
- 27) **Ghaly, A. E, Pyke J. B.** 1991. Amelioration of methane yield in cheese whey fermentation by controlling the pH of the methanogenic stage. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Volume 27, pp. 217] 37.
- 28) **Ghaly A.E, Ramkumar D.R,** Controlling The Ph Of Acid Cheese Whey In A Two-Stage Anaérobic Digester With Sodium Hydroxide, (1999), 26p.
- 29) **Graieb, M.** (1988). Etude et réalisation d'une installation de méthanisation avec chauffage. Mémoire de spécialisation, Institut national Agronomique de Tunis, Tunisie.
- 30) **Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., & Danquah, M. K.** (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1037-1047.
- 31) **Herman, Ph.** 2010. *Vade-mecum technique et administratif relatif à la biométhanisation de biomasse humide en Région wallonne*. [éd.] IRCO. Gesves : s.n., 2010. p. 78. Vol. II.
- 32) **Hwang, S. H. and C. L. Hansen.** 1992. Performance of upflow anaerobic sludge blanket s UASB. reactor treating whey permeate. *Transactions of the ASAE*, Volume 35, No. 5, pp. 1665] 71.
- 33) **I.Tou, S. Igoud et A. Touzi.** « Production du biométhane à partir des déjections animales », Revue des énergies renouvelables, Publication du CDER, juin 2001
- 34) **V. Jaquet-Violeau.** Déminéralisation par électrodialyse en présence d'un complexant application au lactosérum. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique. Toulouse, 1999.
- 35) **J. Brissaud et A. Faby.** « L'utilisation des eaux usées épurées en agriculture ».Office nationale de l'eau de Montpellier, 1997].
- 36) **J.L. Böhm.** « Cours sur la méthanisation », Ecole Supérieure d'Agriculture, ANGERS 1995.
- 37) **J. Rodier.** «L'analyse de l'eau, les eaux résiduaires, eau de mer», DUNOD ,8ème édition, PARIS ,1996
- 38) **Kosikowsky L.,** 1979. Utilisation du lactosérum et produits à base de lactosérum. Science et technique, revue laitière française: 972, 11-97.
- 39) **La farge (B. de).** – *Le biogaz, procédé de fermentation méthanique*. Masson (1995).
- 40) **-L. Angelique.** « Biométhanisation », Séminaire sur les métiers de l'énergie, Université de liège- Haute Ecole Charlemagne- Hemes, avril 2002.
- 41) **F. Luquet, et J.F.Boudier .** Utilisation des lactosérums en alimentation humaine et animale. *Apria*, (1984), 21, 83-90.
- 42) **P.Meynell,** (1976). Methane: planning a digester, Prism, Pre., Dorchester, Dorset, p.3.
- 43) **C.Mignon,** 2010. *Biométhanisation : Facteurs limitants et incitants le développement de la biométhanisation en Région wallonne - Propositions d'amélioration*. Gembloux : ValBiom, 2010. p. 18 pg.
- 44) **R. Moletta, C.** (coord.) (2008). La méthanisation. Édition TEC&DOC Lavoisier, Paris, p.532.
- 45) **R. Moletta, et M. Torrijo ,** Impact environnemental de la filière laitière, F1500. Techniques de l'ingénieur, (2001), 16 p.
- 46) **M.Pidoux.** « Agriculture et effet de serre : Adaptation des pratiques agricoles, - Alternatives énergétiques », Edition D .A. Environnement, ANGERS 2000
- 47) **K. Ostrem.,** (2004). Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. Submitted in partial fulfillment or requirement for Master of Sciences thesis in Earth Resources Engineering. Columbia University. [En ligne]. http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Ostrem_Thesis_final.pdf

- 48) **A .Pierre, et J. Fauquant,**. Principes pour un procédé industriel de fractionnement des protéines du lactosérum. Le Lait, 1986, 66 (4), 405-419.
- 49) **H. Roque,** (1981). Fondement théoriques du traitement biologique des eaux. Chap. 3-6 : Traitement anaérobie, 1476-1532.
- 50) **Sabonnadière, J.-C.** (2007). Nouvelles technologies de l'énergie 3 géothermie et énergies de la biomasse, Hermes Science, Paris, p.262.
- 51) **F. Saulnier, F. Ferrero, J.Y .Bottera, et G . Linden .**Variations de composition et nature de la fraction insoluble des lactosérums industriels, Laboratoire de biochimie . Lait, (1995), 75, 93-100.
- 52) **Schenkel, Yves. 2010.** *Présentation du cours d'énergies renouvelables.* [PDF] [éd.] Y. SCHENKEL. Gembloux, Belgique : Gembloux Agro Bio Tech, 2010.
- 53) **R. Scriban, 1999.** Biotechnologie. 5ème édition *Tech & doc.* Lavoisier. Parie. Pages: 193-210.
- 54) **H. Siboukeur 2010.** Contribution à la production du biogaz à partir des boues de la station d'épuration de la ville de Hassi R'mel. Mémoire de magister d'étude en génie de l'environnement. Ecole Nationale Polytechnique, El Herrach, 2010
- 55) **P. Sottiez,** Produits dérivés des fabrications fromagères. lait et produits laitiers : vache, brebis, chèvre. Paris, Ed Lavoisier, (1990), 633p.
- 56) **M. Torrijos, R. Moletta,** Traitement des effluents de la filière laitière, F1501, Techniques de l'ingénieur, 1999. 9p.
- 57) **R. Veissyere,** Technologie du lait. Paris, Masson Rustique,1975.
- 58) **V. Vrignaud,** Le lactosérum, une matière première noble pour les industries alimentaires humaines et animales. Revue laitière française, 1979, 372, 27-39.
- 59) **Woo, A.** La grande diversité du lactosérum. Agriculture et agroalimentaire, Canada, 3-13.
- 60) **J. Q.Yan, K. V. Lo and P. H. Liao.** 1989. Anaerobic digestion of cheese whey using up-flow anaerobic sludge blanket reactor. Biological Wastes 27, pp. 289] 305.
- 61) **U. Zaher, D-Y. Cheong, B. Wu, et S.Chen.** (2007). Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste. Department of biological systems engineering.Washington State University. [En ligne]

Annexes

ANNEXE 1: Réactifs

1.1. Détermination de la DCO :

- Acide sulfurique, H_2SO_4 .
- Bichromate de potassium, $K_2Cr_2O_7$.
- Sulfate mercurique, $HgSO_4$.
- Sulfate d'argent, Ag_2SO_4 .
- Biphthalate de potassium, $KHC_8H_4O_4$.
- Solution de digestion.
- Réactif acide.
- Solution d'acide sulfurique 9 N.
- Solution étalon de 10 000 mg d' O_2/L .
- Solutions étalons de 800, 500, 300, 100 mg d' O_2/L .

ANNEXE 2: Matériel

- Etuve de marque MEMMERT
- pH-mètre de marque FISHERbrand, Hydrus 100.
- Agitateur vortex de marque FISHER Bibllock Scientific TOP-Mix 11118.
- balance analytique
- Verrerie courante de laboratoire
- DCO mètre de marque WTW CR 2200.
- Burette graduée de précision de capacité 25ml
- tubes pour DCO.
- Spectrophotomètre

ANNEXE 3: Méthodologie paramétrique

Détermination du pH :

La détermination du pH a été faite grâce à un pH-mètre par la méthode potentiométrique (Rodier, 2008).

Mesure de la DCO :

- Préparation de la solution de digestion :

Dissoudre 10,2 g de $K_2Cr_2O_7$, préalablement séché à 105 °C pendant 2 heures, dans environ 500 ml d'eau. Ajouter doucement 167 ml de H_2SO_4 et 33,3g de $HgSO_4$. Agiter jusqu'à dissolution complète, laisser refroidir et compléter à 1 000 ml avec de l'eau.

- Préparation du réactif acide:

Verser 23,4 g de Ag_2SO_4 dans une bouteille de 4,25 kg de H_2SO_4 (2,5 L). Laisser reposer 1 à 2 jours afin que l' Ag_2SO_4 soit complètement dissous. La solution peut également être préparée dans une quantité moindre d'acide sulfurique. Cependant, la quantité de Ag_2SO_4 ajoutée doit représenter 5,5 g de Ag_2SO_4 par kg d'acide sulfurique. Inverser la bouteille 3 fois avant la première utilisation, afin de s'assurer que la concentration de sulfate d'argent soit la même dans toute la bouteille.

La solution doit être conservée à l'obscurité

- Préparation de la courbe d'étalonnage:

- Préparation de la solution d'acide sulfurique 9 N:

Diluer 250 ml de H_2SO_4 dans environ 600 ml d'eau. Laisser refroidir et compléter à 1 000 ml avec de l'eau.

- Préparation de la solution étalon de 10 000 mg d' O_2 /l :

Sécher le Biphthalate de potassium au four à 120 °C pendant 2 heures et laisser refroidir au dessiccateur.

Dissoudre 2,125 g de Biphthalate de potassium dans environ 200 ml d'eau et compléter à 250 ml avec de l'eau.

Cette solution se conserve 2 ans à environ 4 °C.

- préparation des Solutions étalons :

Préparer une série de solutions étalons aux concentrations suivantes :

Solution étalon	Concentration (mg/l O ₂)
1	100
2	300
3	500
4	800

Ces solutions se conservent 6 mois à température ambiante.

Voici un exemple pour la préparation de ces solutions étalons :

- Solutions étalons de 800, 500, 300 et 100 mg d'O₂/l

Dans une série de fioles jaugées de 100 ml, introduire à l'aide de pipettes 8, 5, 3 et 1 ml de la solution étalon de 10 000 mg d' O₂/l dans environ 80 ml d'eau. Ajouter 0,5 ml de H₂SO₄ 9 N et compléter au trait de jauge avec de l'eau.

- **PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON**

Les solutions étalons et les échantillons sont traités de la même façon.

- Homogénéiser l'échantillon.
 - Prélever à l'aide d'une pipette 2,5 ml d'échantillon et l'introduire dans une éprouvette.
 - Ajouter lentement 1,5 ml de la solution de digestion à l'aide d'une burette dans chaque tube.
- NOTE : La solution de digestion et l'acide sulfurique étant très oxydants et corrosifs, il faut manipuler ces solutions avec précaution et éviter tout contact avec la peau. Utiliser des gants et des lunettes de sécurité.
- Ajouter lentement 3,5 ml du réactif acide, visser fermement le bouchon. Par la suite mélanger à l'agitateur. Lors du mélange, la chaleur dégagée est très grande. Inverser le tube lentement afin de s'assurer qu'il n'ait pas de fuite.
 - Porter à reflux dans un bloc chauffant à une température de 150 °C ± 2 °C pendant une période de 2 heures.
 - Laisser refroidir à la température ambiante.

- DOSAGE

- Ajuster la longueur d'onde du spectrophotomètre à 600 nm.
- Essuyer l'extérieur des cellules avant de faire les lectures de transmittance.
- Ajuster le 100 % de transmittance avec la solution témoin. Tourner le tube de façon à obtenir la transmittance maximale.
- Noter la lecture de la transmittance des solutions étalons et des échantillons. Tourner le tube de façon à obtenir la transmittance maximale.

Aucun soin autre que le lavage et le séchage de la verrerie n'est nécessaire pour la détermination de la DCO.

- CALCUL ET EXPRESSION DES RÉSULTATS

Les résultats d'analyse sont obtenus à l'aide d'un système informatisé de traitement de données qui convertit les mesures de transmittance en absorbance. Une courbe d'étalonnage est tracée à partir des mesures d'absorbance et de la concentration des solutions étalons.

La concentration de la demande chimique en oxygène est exprimée en mg d'O₂/l selon l'équation suivante :

$$C = A \times F$$

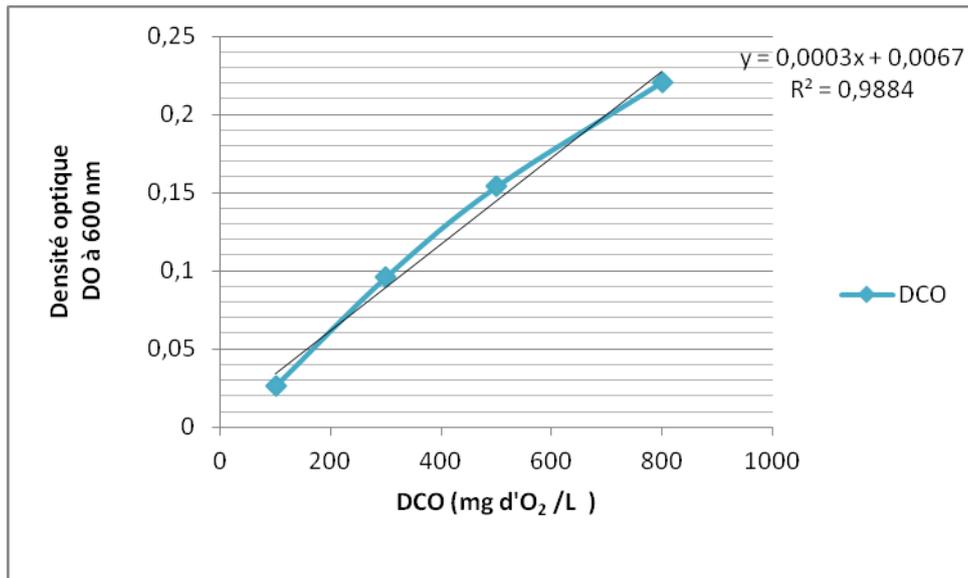
où

C : concentration de la demande chimique en oxygène dans l'échantillon (mg/l O₂);

A : concentration de la demande chimique en oxygène dans la solution dosée (mgd'O₂/l)

F : facteur de dilution, si nécessaire.

Courbe d'étalonnage pour la mesure de la DCO:



Mesure de la teneur en acides gras volatiles :

Méthode des kits:

On procède d'abord à une centrifugation de l'échantillon à analyser à 6000 tr/min pendant 10 min, récupérer le surnageant.

Prélever 0.4 ml, mettez le dans une cuve, puis ajouter 0.4 ml de la solution A, chauffer le mélange à 100 °C pendant 10 min, laisser refroidir, ajouter 0.4 ml de la solution B puis 0.4 ml de la solution C. ajouter 2 ml de la solution D, attendre 3 min. Effectuer la lecture de la densité optique sur un spectrophotomètre à 600 nm.

ANNEXE 4: Tableaux de résultats

Tableau 1: Tableau donnant les valeurs obtenues pour le suivi du pH pour les trois digesteurs.

Temps (J)	pH		
	Digesteur I	Digesteur II	Digesteur III
1	6,44	6,57	6,57
2	5,62	5,52	5,44
3	4,2	5,65	5,59
4	3,6	5,85	5,75
5	3,3	5,92	5,89
6	3,3	6,19	5,94
7	3,3	6,31	6,2
8	3,3	6,44	6,28
9	3,3	6,5	6,63
10	3,3	6,56	6,82
11	3,3	6,73	6,9
12	3,3	7,26	7,1
13	3,3	7,31	7,19
14	3,3	7,49	7,31
15	3,2	7,52	7,36
16	3,2	7,53	7,4
17	3,2	7,59	7,43
18	3,2	7,41	7,32
19	3,1	7,33	7,26
20	3,1	7,29	7,18
21	3,1	7,22	7,56
22	3,1	7,19	7,52
23	3	7,15	7,47
24	3	7,11	7,44
25	3	7,08	7,36

Tableau 2: Tableau représentant les valeurs obtenues pour la mesure de la DCO dans les trois digesteurs.

Temps (J)	DCO (mg d'O ₂ /l)		
	Digesteur I	Digesteur II	Digesteur III
1	10100	40 000	40 000
2	9766,66	39433,33	39766,66
3	9100	38433,33	38766,66
5	8766,66	37100	36766,66
7	8433,33	36100	36100
9	8100	34433,33	34100
10	7766,66	33433,33	33766,66
12	7766,66	32766,66	32766,66
15	7433,33	31433,33	31100
17	7433,33	30766,66	30766,66
20	7433,33	29433,33	26433,33
22	7100	28766,66	25100
25	7100	28000	22766,66

Tableau 3: Tableau représentant les différents volumes de biogaz obtenus lors de la fermentation dans le digesteur I.

Temps (J)	V (ml)
	Digesteur I
1	0
2	1
4	2
8	0.5
10	0
13	0.5
15	0
17	1
20	0
22	0
25	0

Tableau 4: Tableau représentant les différents volumes de biogaz obtenus lors de la fermentation dans les deux digesteurs II et III.

Temps (J)	Digesteur II	Digesteur III
0	0	0
2	8	7
4	13	10
7	25	25
8	22	19
10	13	10
12	7	5
15	3	3
16	1	2
20	0	0.5
22	0	23
23	0	16
25	0	7

ملخص

يعتبر التخمر الميثاني واحدة من الأساليب التي يمكن بواسطتها الحصول على الغاز الحيوي البيوغاز , والمتكون أساسا من غاز ثاني أكسيد الكربون والميثان , وهذا الأخير له عدة استعمالات نذكر منها : إنتاج الحرارة و الكهرباء ويستعمل كوقود.

قمنا في هذا البحث بإنتاج الغاز الحيوي بواسطة مصل اللبن الناتج عن: O.R.L.A.C Boudouaou وذلك باستعمال مخمر يعمل تحت شروط لاهوائية ودرجة حرارة 35°م

الكلمات المفتاحية : تخمر ميثاني , تخمر لاهوائي , غاز حيوي, مصل الحليب.

RESUME

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

Dans notre étude nous avons contribué à l'étude de la production du biogaz produit à partir du lactosérum issu de l'O.R.L.A.C Boudouaou. En utilisant un digesteur travaillant en aérobiose à T=35°C.

MOTS CLES: Lactosérum, Fermentation méthanique, Bio-méthanisation, Digestion anaérobie, Biogaz, Digesteur.

SUMMARY

The mechanic fermentation or the bio-methanisation is one of the methods for the valorization of the biomass, thus the production of biogas, which is constituted essentially of carbon dioxide and methane. The latest may be valued by different ways: heat and electricity production, utilization as a fuel, or a direct injection in raid system of natural gas.

In our study we focus on the production of biogas from cheese whey obtained from O.R.L.A.C Boudouaou. Using a digester operating in anaérobie conditions with T=35°C.

Key words: Cheese whey, methanic fermentation, bio-methanisation, anaerobic digestion, biogas, digester,