

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculte des Sciences et de la Technologie
et des Sciences de la Matière
Département Génie Des Procèdes



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie Des Procèdes

Spécialité : Raffinage et technologies des hydrocarbures

Presenté par : **HARCHAOUI MOHAMED EL AMINE**

Thème

Etude de Bio-Méthanisation des Déchets d'abattoire
et Contribution Expérimentale

Soutenu publiquement

Le : 22/06/2013

Devant le jury

| | | | | |
|----|--------------------|--------|-----------|-------------|
| M. | Guéri messaoud | MA (A) | Président | UKM Ouargla |
| M. | Sibouker Hicham | MA (B) | Examineur | UKM Ouargla |
| M. | Boublal med Rachid | // | Invité | BIC |
| M. | Babi Yousef | MA (A) | Encadreur | UKM Ouargla |

Année universitaire : 2012-2013

Remerciements

*Ce Travail à été réalisé, au laboratoire de génie de procédé
de l'université Kasdi Merbah.*

*En Premier lien, j'exprime mon profond remerciement à
mon encadreur Mr. Babi Youcef et aussi a tous mes
enseignants pendant mon cycle d'étude au sein de
l'Université Kasdi Merbah, sans oublier les responsables
de laboratoire de génie de procédé.*

DEDICACE

Je dédie ce travail à mes très chers parents

Soutien tout au long de mes études

A mes frères que dieu les bénisse

A mes enseignants de toute année d'étude

A tous mes collègues et amis

A toute ma grande famille

A tous ceux que j'aime

HARCHAOU MOHAMMED EL-AMINE

ABREVIATIONS

AGV : les acides gras volatils

TAC : titre alcalimétrique

PCI : pouvoir calorifique inférieur

PCS : pouvoir calorifique supérieur

pH : potentiel d'hydrogène

UV : radiations ultra-violettes

EGSB : Expanded Granular sludge Bed

UASB : Upflow Anaérobic Sludge Blanket

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : schéma global du bilan de la méthanisation..... | 03 |
| Figure I.2 : les différentes étapes de la méthanisation..... | 05 |
| Figure I.3 : intensité de la fermentation en fonction de la température..... | 08 |
| Figure I.4 : production de biogaz en fonction de la température et du temps de | 09 |
| Figure I.5 : schéma du procédé de digestion en batch..... | 11 |
| Figure I.6 : schéma de digestion en continu infiniment mélangé..... | 12 |
| Figure II.1 : équivalent énergétique d'un mètre cube de biogaz (contenant 70% de méthane et 30 % de gaz carbonique)..... | 16 |
| Figure II.2 : les différentes voies de valorisation du biogaz..... | 17 |
| Figure III.1 : le substrat brut..... | 22 |
| Figure III.2 : digesteur utilisé..... | 23 |
| Figure III.3 : schéma simplifié du dispositif expérimental..... | 24 |
| Figure III.4 : l'œtve utilisée pour la détermination de la matière sèche..... | 25 |
| Figure III.5 : le four à moufle utilisé pour la détermination de la MO..... | 26 |
| Figure III.6 : le pH-mètre utilisé..... | 27 |
| Figure IV.1 : L'œvolution du pH dans le digesteur (I)..... | 31 |
| Figure IV.2 : L'œvolution du pH dans le digesteur (II)..... | 32 |
| Figure IV.3 : L'œvolution du pH dans le digesteur (III)..... | 32 |
| Figure IV.4 : L'œvolution des AGV dans le digesteur (I)..... | 34 |
| Figure IV.5 : L'œvolution des AGV dans le digesteur (II)..... | 34 |
| Figure IV.6 : L'œvolution des AGV dans le digesteur (III)..... | 35 |
| Figure IV.7 : L'œvolution du TAC dans le digesteur (I)..... | 36 |
| Figure IV.8 : L'œvolution du TAC dans le digesteur (II)..... | 36 |
| Figure IV.9 : L'œvolution du TAC dans le digesteur (III)..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.10 : le rapport AGV/TAC dans le digesteur (I)..... | 38 |
| Figure IV.11 : le rapport AGV/TAC dans le digesteur (II)..... | 38 |
| Figure IV.12 : le rapport AGV/TAC dans le digesteur (III)..... | 39 |
| Figure IV.13 : la production journalière du biogaz dans le digesteur (I)..... | 39 |
| Figure IV.14 : la production journalière du biogaz dans le digesteur (II)..... | 40 |
| Figure IV.15 : La production journalière du biogaz dans le digesteur (III)..... | 40 |
| Figure IV.16 : la production cumulée du biogaz dans le digesteur (I)..... | 41 |
| Figure IV.17 : la production cumulée du biogaz dans le digesteur (II)..... | 41 |
| Figure IV.18 : la production cumulée du biogaz dans le digesteur (III)..... | 42 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : Potentialités de production du biogaz des différents types des déchets agro-alimentaires | 06 |
| Tableau I.2 : La biodégradabilité théorique des lisiers | 07 |
| Tableau I.3 : proportion de H ₂ S selon le type de substrat | 07 |
| Tableau II.1 : composition du biogaz selon origines | 14 |
| Tableau II.2 : les caractéristiques du biogaz et du méthane déterminées à 0°C et 1 atm..... | 15 |
| Tableau II.3 : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane..... | 15 |
| Tableau II.4 : flotte de véhicules équipés au méthane dans le monde..... | 18 |
| Tableau II.5 : solubilité des gaz dans l'eau..... | 20 |
| Tableau IV.1 : caractéristiques du substrat..... | 31 |
| Tableau IV.2 : le suivi d'inflammabilité du biogaz..... | 43 |

Chapitre IV : Résultats et discussions

| | | |
|--------|--|----|
| IV.1 | Caractérisation du substrat utilisé | 31 |
| IV.2 | Evolution des paramètres de fonctionnement | 31 |
| IV.2.1 | Evolution du pH | 31 |
| IV.2.2 | Evolution des acides gras volatils (AGV) | 33 |
| IV.2.3 | Evolution du TAC | 35 |
| IV.2.4 | Variation du rapport AGV/TAC | 37 |
| IV.2.5 | Production du biogaz | 39 |
| IV.2.6 | L' inflammabilité du biogaz | 42 |
| | Discussion | 44 |
| | Conclusion générale | 45 |
| | Références | |
| | Annexes | |
| | Résumé | |

Introduction Générale :

La croissance démographique qu'a connue le monde dans le courant du siècle dernier, ainsi que le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation, ont été accompagnés d'une demande accrue en énergie, surtout le pétrole, qui est considéré comme la première source d'énergie. Face à cette demande en hausse, les réserves en combustibles fossiles ne dureront pas éternellement, la pénurie du pétrole va progressivement s'installer.

Par ailleurs, la croissance des activités humaines génère une production de plus en plus de déchets de différentes sortes : déchets industriels, ordures ménagères, déchets agricoles, eaux usées urbaines etc. Tous ces déchets ont bien sur des impacts très néfastes sur l'environnement ainsi que sur la santé humaine.

Dans le souci d'une neutralisation biologique des déchets raison pathogénique d'une part et d'une valorisation énergétique d'autre part, nous avons muni cette étude théorique et expérimentaux qui à eu lieu au laboratoire de génie des procédés de l'université de Ouargla.

Cette étude est présentée de la façon suivante :

- Dans le chapitre (I) il était question d'entamer une brève aperçu sur la méthanisation, ainsi que les étapes amenant à la production du biogaz.
- la définition, la composition, ainsi que son équivalence énergétique sont détaillé dans le chapitre (II) ; par ailleurs, et afin d'entamer la partie expérimentale, il était important de présenté les dispositifs expérimentaux, ainsi que les modes opératoires du déroulement de l'expérience ; le chapitre (III) contenant cette importance.
- enfin le suivi des paramètres du fonctionnement (pH, AGV,í ..etc.) des trois digesteurs sont présentées dans le chapitre (IV).
- les conditions opératoires de déroulement des expériences ont été choisies comme suit :
 - Expérience (I) : substrat aux conditions naturelles.
 - Expérience (II) et (III) : température fixée et pH ajusté.

Chapitre I

La méthanisation

I : Généralités sur La méthanisation :

I.1 Historique :

Il y a plus de deux siècles Volta découvrait que les gaz émis par les terres marécageuses étaient combustibles, le gaz des marais contient du méthane (65%) qui s'enflamme facilement, du gaz carbonique et des autres gaz. Cette observation allait mener à la théorie et à la pratique actuelle de récupération de l'énergie des gaz produits par la décomposition des matières organiques [1].

En 1804-1810, Dalton, Henry et Davy découvrirent la composition chimique du méthane, et confirmèrent que le gaz de charbon était très peu différent du gaz de marais cité par Volta. Ils montrèrent que le méthane était produit à partir des résidus animaux en décomposition. La France est reconnue pour avoir apporté une des premières contributions significatives dans le domaine de traitement anaérobie des matières solides en suspension dans un liquide [2].

En 1884, Gayon, étudiant disciple de Pasteur, fermenta du fumier à une température de 35°C et obtint 100 litres de méthane par m³ du substrat. Il a démontré la capacité du gaz à produire de la chaleur et de la lumière. Ce n'est que vers la fin du 19^{ème} siècle que le processus de méthanogènes fut identifié et relié à une activité microbienne. En 1868, Bechamp dénomma « organisme » le responsable de la production de méthane à partir de l'éthanol. Cet organisme était apparemment constitué d'une population mixte du fait que Bechamp fut capable de démontrer que les produits de fermentation pouvaient varier en fonction du type de substrat. En 1876, Herter rapporta que l'acétate contenu dans les boues d'épuration se transformait, en proportions stœchiométriques, en part égales de méthane et de gaz carbonique.

I.2 définition de La méthanisation :

La méthanisation (ou appelée « digestion anaérobie ») est la transformation de la matière organique en un biogaz composé principalement de méthane et de gaz carbonique. C'est une transformation naturelle qui se réalise dans tous les milieux où l'on trouve la matière organique en absence d'oxygène et où les conditions physico-chimiques sont compatibles avec celles du vivant [3].

Elle est l'une des technologies permettant efficacement le traitement de la matière organique des déchets et de transformer les polluants de l'environnement en sources de richesse.

Grace à ce procédé, il est possible de stabiliser les déchets, de réduire leurs volumes et enfin de produire un combustible de haute valeur énergétique.

Cette transformation des déchets organiques en biogaz n'est pas simple, il s'agit en fait d'une série de réactions successives qui sont dues à diverses catégories de bactéries. Ces bactéries ont des conditions bien définies et des exigences particulières pour se développer à savoir l'absence d'oxygène, un pH proche de la neutralité, et une gamme de température bien déterminée.

I.3 Matières organiques biodégradables :

La méthanisation s'applique à la plupart des déchets organiques, d'origine municipale, industrielle ou agricole, d'une nature solides ou liquides.

I.4 La conversion de la matière organique :

La mise en œuvre de la méthanisation dans un réacteur a pour but de convertir cette matière, quelle soit sous forme soluble ou particulièrement solide en biogaz. En entrée du procédé, cette matière est un des composants d'une matrice, quelle soit liquide (effluent) ou solide (déchet). Les autres composants de la matrice sont l'eau et les matières minérales.

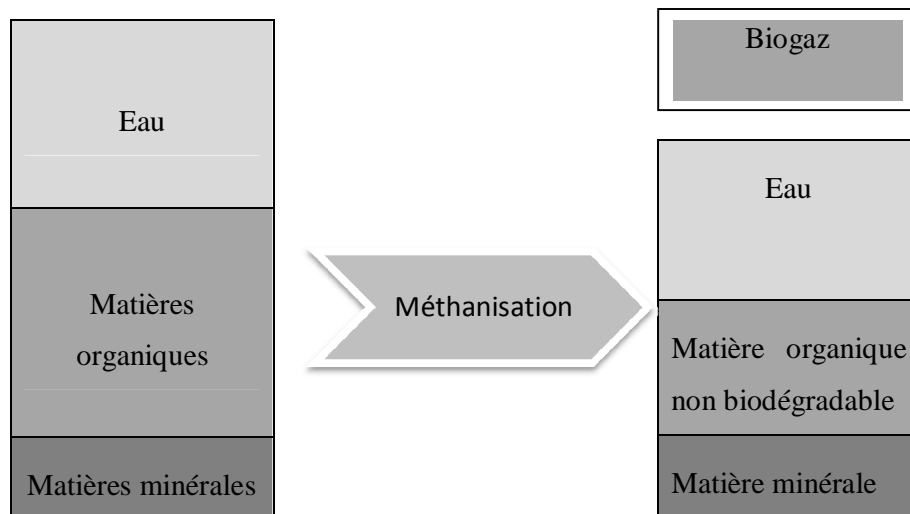


Figure I.1 : Schéma global du bilan de la méthanisation [3]

I.5 Les étapes microbiologiques et biochimiques de la méthanisation :

La méthanisation des matières organiques se effectue en quatre étapes principales [4] sous l'action de différents groupes de micro-organismes, il s'agit donc de :

I.5.1 L'hydrolyse :

Où les macromolécules (les polymères) qui composent la matière organique se dégradent en petites molécules solubles (monomères). Les lipides se dégradent en acides gras et glycérols, les protéines se dégradent en acides aminés, en peptides et en chaînes courtes, les polysaccharides se dégradent en monosaccharides et disaccharides, la cellulose enfin se transforme en glucose et en cellobiose [5].

I.5.2 L'acidogénèse :

C'est la transformation des monomères en gaz carbonique, hydrogène et acides organique [2]. Il apparaît alors des acétates, des alcools tels l'éthanol, de l'ammoniaque et des acides gras volatiles (AGV) comportant de 2 à 5 atomes de carbone.

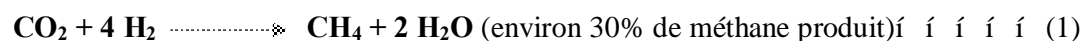
I.5.3 L'acétogénèse :

A ce niveau, les micro-organismes transforment les acides gras volatils et les alcools de l'étape précédente en hydrogène, gaz carbonique et acétates. Sulfure d'hydrogène se forme également lors de cette phase de transformation [5].

I.5.4 La méthanogénèse :

Représente la dernière étape de la méthanisation ou le méthane apparait. Les bactéries méthanogènes interviennent pour élaborer le méthane à partir de l'hydrogène, du gaz carbonique et des acétates suivants les deux réactions suivantes [5].

1- De réduction du CO₂



2- De décarboxylation de l'acide acétique :



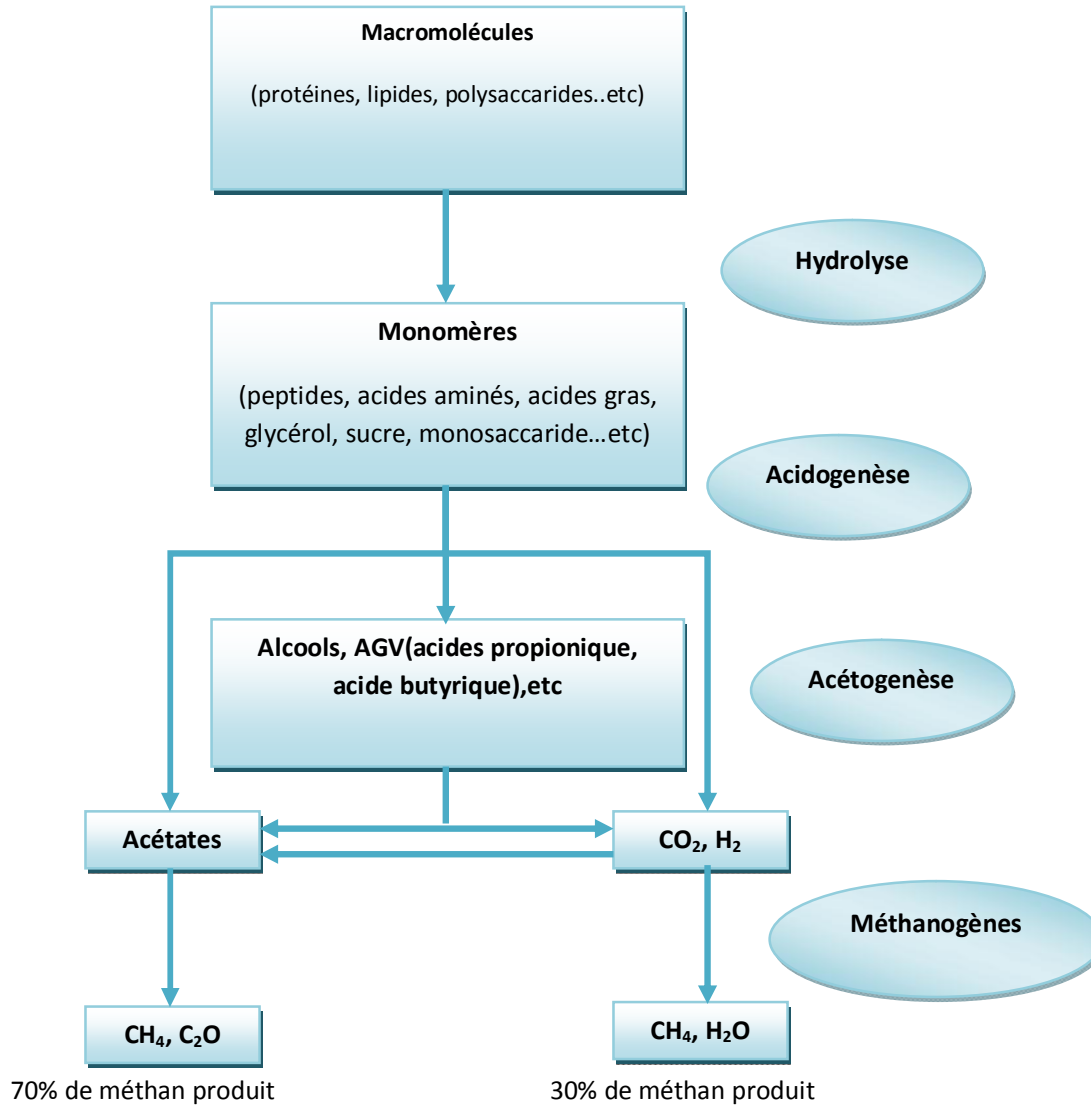


Figure I.2 : les différentes étapes de la méthanisation [6]

I.6 Les déchets des industries agro-alimentaires et de la pâte à papier :

La charge organique constitutive des eaux résiduelles de l'industrie agro-alimentaire et certains autres types d'industries rend ces effluents polluants et impose un traitement, avant leur évacuation, conformément aux normes de rejet.

La digestion anaérobie peut contribuer la réduction de la charge organique de ces effluents. On arrive à mettre au point des dispositifs de rétention des bactéries dans les fermenteurs (recyclage, supports fixes ou en suspension, etc.), adaptés à des faibles concentrations en matières sèches. Les principales industries productrices de ces effluents

polluants sont les industries laitières, les conserveries de légumes ou de fruits, les papiers. Le tableau suivant montre les potentialités de production de biogaz à partir des différents types d'agro-industriels.

| Types de déchets | m ³ biogaz/kg matières organiques |
|---|--|
| Industrie laitière | 0.60 |
| Production et transformation de légumes | 0.60 |
| Abadons | 0.45 |
| Transformation de la viande | 0.50 |
| Préparation de potages | 0.40 |
| Industrie sucrière | 0.65 |
| Moulins à céréales | 0.40 |
| Elaboration du café et du thé | 0.40 |
| Industrie vinicole | 0.55 |
| Production et transformation de fruits | 0.50 |
| Brasseries | 0.35 |
| Industrie papetière | 0.60 |
| Production de champignons | 0.40 |
| Aliments divers (levuresí) | |

Tableau I.1 : potentialités de production de biogaz des différents types de déchets agro-industriels.

I.7 Les paramètres influencent la méthanisation :

Il y a plusieurs conditions et paramètres qui peuvent conduire à une production optimales de biogaz ;

I.7.1 Le substrat :

Le type et la composition du substrat influencent directement le rendement et la composition de biogaz. Un produit organique ne pourra donc fournir plus que sa composition ne le permette.

La biodégradabilité diffère d'un substrat à un autre, et influence directement le potentiel de production de gaz.

| Substrat | Biodégradabilité % de MO | Volume (CH ₄) m ³ kg de MO |
|-----------------|--------------------------|---|
| Lisier de porc | 90 | 0.45 |
| Lisier volaille | 80 | 0.40 |
| Lisier de bovin | 70 | 0.35 |

Tableau I.2 : la biodégradabilité théorique des lisiers [2].

Par ailleurs, selon la qualité du substrat, le gaz obtenu sera plus ou moins riche en sulfure hydrogène (H₂S), mélangé à l'eau et au dioxyde de carbone, rend le biogaz beaucoup plus corrosif, nécessitant pour certaines utilisations un système de traitement et de dépurification du gaz [7].

| Type de substrat | Proportion de H ₂ S dans le biogaz |
|---------------------|---|
| Fumier de bovin | Moins de 0.3% |
| Fientes de volaille | Proche de 1% |
| Lisier de porc | De l'ordre de 0.7% |

Tableau I.3 : proportion de H₂S selon le type de substrat.

I.7.2 La température :

Le métabolisme et les taux de croissance tendent à augmenter pour des températures acceptables pour les micro-organismes. Une température trop élevée peut cependant causer la chute du métabolisme due à la dégradation des enzymes, néfaste à la vie de la cellule. Les micro-organismes montrent une croissance optimale et des taux élevés de métabolisme pour une gamme bien définie de températures, propre à chaque espèce, en raison de la thermo-stabilité des protéines synthétisés par chaque type d'organisme. Les bactéries méthanogènes sont plus sensibles aux changements de températures que les autres organismes présents dans les digesteurs [8].

Cela est dû au taux de croissance très rapide des autres groupes, comme les acétogènes, qui peuvent garantir un catabolisme significatif même à des températures très basses. Toutes les populations bactériennes dans les digesteurs sont assez résistantes à des augmentations de température de courte durée, (de l'ordre de 2 heures), et reviennent rapidement à la production

normale de gaz lorsque la température est restaurée. Les effets de la température sont liés, significativement à la concentration en matière sèche lors de la fermentation [8].

La fermentation méthanique anaérobie peut se dérouler à l'intérieur de trois gammes différentes de température, selon les préférences d'écologie de température des flores anaérobiques [2].

Toutefois, l'intensité de l'activité des micro-organismes, dépend de la production de méthane, est en fonction de la température du milieu [2]. Dans la plage de température comprise entre 23 °C et 40 °C, on considère généralement que la production augmente de 5% lorsque la température croît de 1 °C [7].

Deux plages thermiques distinctes conditionnant la digestion ont été identifiées : la digestion optimale intervient autour de 25 °C (mésophile) et 55°C (thermophile) [8].

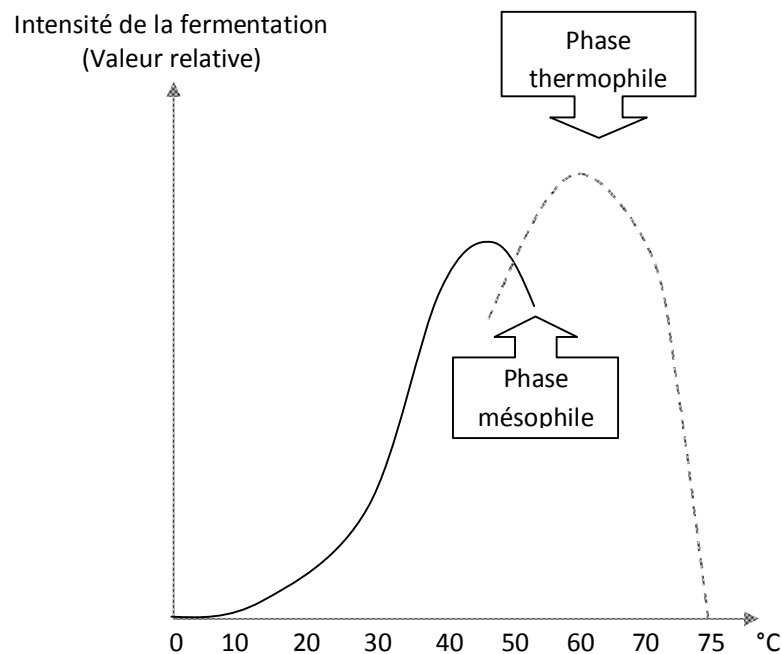


Figure I.3 : intensité de la fermentation en fonction de la température [9].

Cette sensibilité à la température peut être due aux effets sur les bactéries méthanogènes, qui ont montré leur similitude d'adaptation pour ces deux gammes [8].

L'activité microbienne étant plus intense à certaines températures, donc on comprend que pour la même masse à digérer, la durée sera d'autant plus courte que la fermentation sera intense. La figure suivante présente la cinétique de production de gaz en fonction de la température [7].

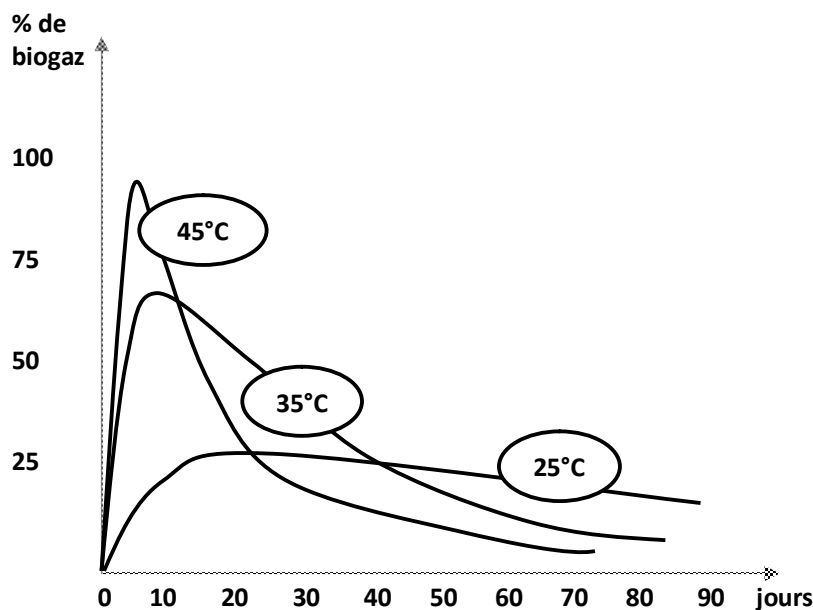


Figure I.4 : production de biogaz en fonction de la température et du temps de séjour [7].

Un avantage de la digestion thermophile est une productivité doublée par rapport à la mésophile, de telle sorte que le volume des réacteurs peut être divisé par le facteur 2 tout en traitant la même quantité de déchets solides pour une même production du gaz [8].

Les avantages d'un fonctionnement en zone thermophile sont [10] :

- Une productivité accrue en méthane ;
- Une meilleure qualité des déchets digérés ;
- Une réduction du volume des digesteurs ;
- Un temps de rétention plus court ;
- Cette thermophile ne peut compenser économiquement les dépenses énergétiques de maintien en température du digesteur (chauffage).

Le succès de la digestion à basse température est susceptible de changer l'attitude de beaucoup d'agriculteurs et industriels vis-à-vis de la mise en œuvre de la digestion anaérobie dans les pays froids. Les systèmes de digestion anaérobie (ESGB et USAB) peuvent fonctionner à des températures inférieures à 8°C avec des effluents liquides peu chargés [8].

I.7.3 Le rapport C/N :

Les composants du stock nutritionnel sont utilisés sélectivement par différentes bactéries présentes dans le digesteur. Cela est spécialement vrai pour différents rapports entre

matière organique et azotée. Les bactéries ont besoin d'un rapport C/N convenable pour leur métabolisme. Un rapport C/N de 30 est fréquemment cité comme optimal. Les rapports C/N supérieurs à 23/1 ont été identifiés comme inadaptés pour une digestion optimale ; et des rapports inférieurs à 10/1 se sont révélés inhibiteurs selon des études portant sur la digestion anaérobie thermophile des déchets de volailles, de fèces bovines, mélanges de papier et fumier, et d'autres substrats cellulosiques [8].

I.7.4 L'humidité :

Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité minimale doit être de 60 % à 70 %, eau liée ou libre. Dans le cas de produits plus secs, litière de volaille, par exemple, une humidification plus ou moins importante, doit être effectuée selon la nature du produit, [7].

I.8 Les systèmes de digesteurs :

Le digesteur, où se réalise la méthanisation, est aussi appelé fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Le digesteur est une simple cuve fermée, étanche et isolée thermiquement, dans laquelle différents micro-organismes dégradent chimiquement et biologiquement les déchets et les effluents organiques et produisent en stade final du biogaz. Il peut être équipé d'un système de chauffage, d'un système d'agitation, d'un système de prélèvement, un système de mesure de teneur en gaz et de dispositifs permettant le contrôle de différents paramètres : la température, le pH, la pression etc. le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application projetée. Le cycle de méthanisation peut être discontinu ou continu.

I.8.1 le procédé discontinu (batch) :

Le système Batch est le plus simple et le plus ancienne procédé utilisé. C'est un système à digestion discontinue utilisé le plus souvent pour les déchets solides (fumiers, biomasse aquatique, etc.). Ce déchet à traiter est placé dans une enceinte close pendant une durée comprise entre 8 semaines et 5 mois avec ou sans système d'agitation. La production de biogaz est irrégulière (rapide au début de la fermentation, beaucoup plus lente à la fin). Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et à laisser digérer. Le temps de rétention étant fonction de la température ainsi que d'autres facteurs. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer comme l'illustre la figure I.5.

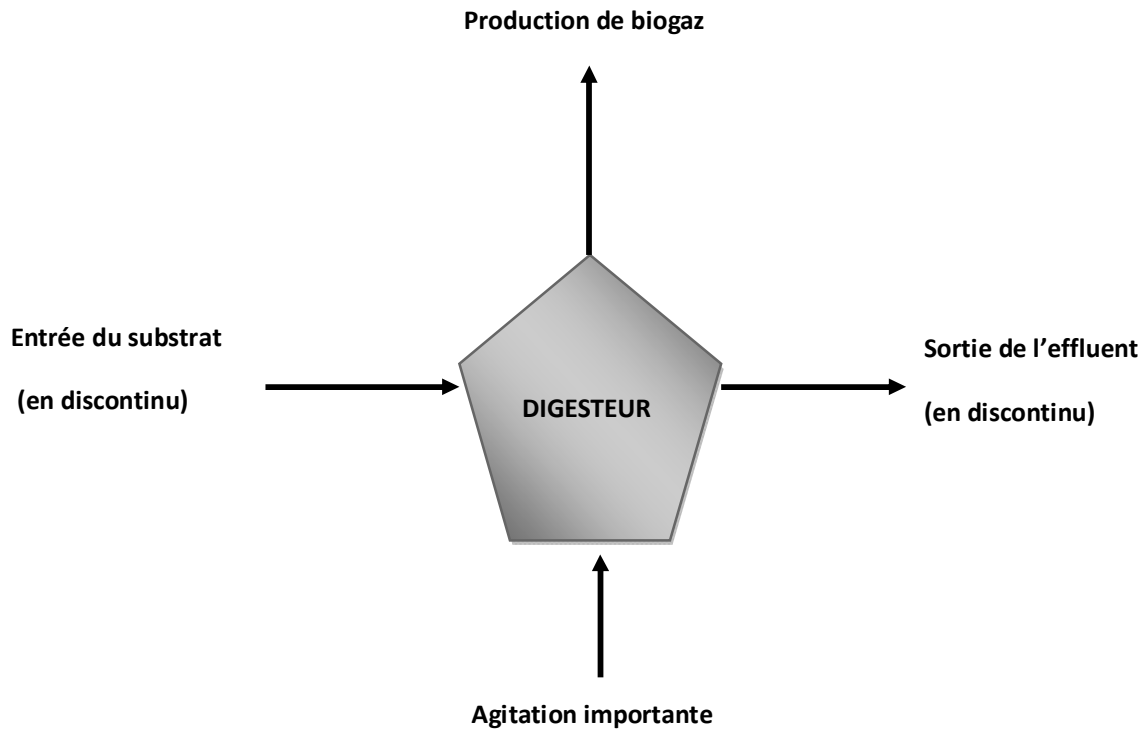


Figure I.5 : schéma du procédé de digestion en batch.

Ce système, rustique et d'une grande simplicité technique, est avantageux pour traiter les déchets solides tels que les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière ; au début du cycle, la fermentation du substrat commence, la production de biogaz est lente. Elle s'accélère et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute en fin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur. Ce système nécessite d'autre part beaucoup de main d'œuvre pour le transport de la biomasse et d'entretien (d'où l'avantage de l'agitation) [7].

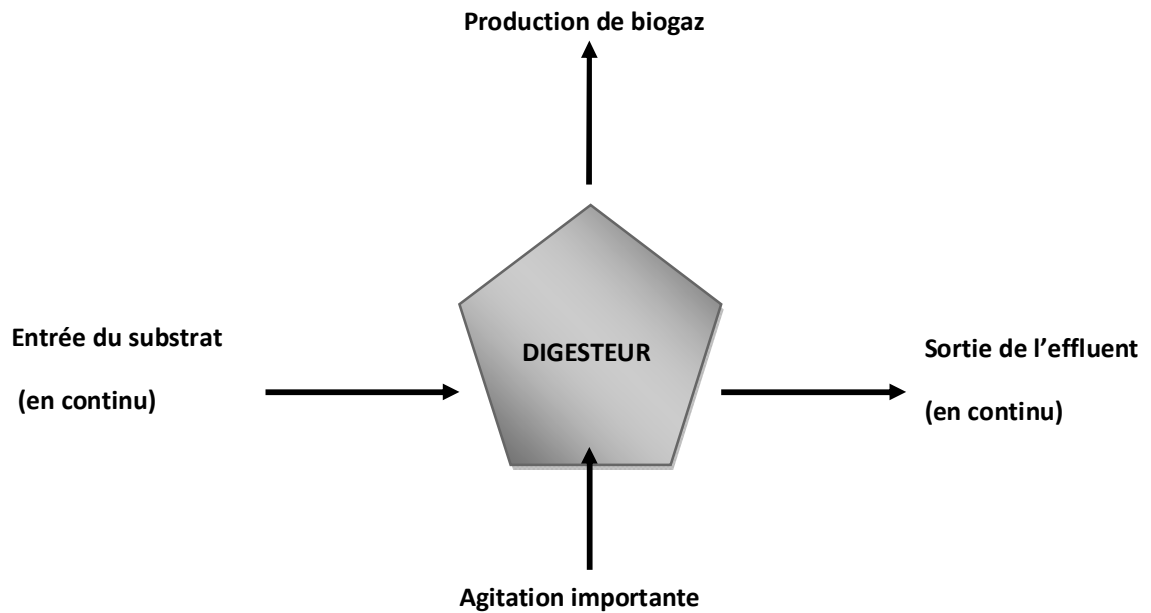
I.8. 2 Le système de digestion en continu infiniment mélangé [7] :

Ce système est le plus utilisé, son agitation importante permet de conserver une vitesse de production de gaz permanente. La biomasse fraîche est apportée en continu et le résidu liquide de la digestion est régulièrement éliminé.

Ce système est néanmoins soumis à quelques contraintes. En effet il ne peut accepter des substrats dont la matière sèche est supérieure à 100 kg par kg de biomasse apportée car au-

delà de cette limite, les déchets ne sont plus pompables. Ce type système correspond parfaitement aux lisiers de porcs.

D'autre part, ce système ne permet pas le maintien de la biomasse active car la grande majorité de celle-ci est évacuée à chaque élimination du résidu. Cette limitation de l'activité bactérienne a une influence sur le rendement de production de biogaz. Elle est généralement constante mais jamais optimale. Une amélioration à ce système peut être apportée en pratiquant une agitation partielle (système continu partiellement mélangé).



Chapitre II

Le biogaz

II Généralités sur Le biogaz :

II.1 définition :

Le biogaz issu de la dégradation anaérobie de matières organiques (les eaux usées, les ordures ménagères, etc.) est un gaz combustible, constitué essentiellement de deux composés en proportion variable selon le substrat traité ;

- Le méthane (CH_4) ;
- Le gaz carbonique (CO_2).

Ainsi que quelques traces d'hydrogène, d'hydrogène sulfuré, d'ammoniac, d'azote, d'oxyde de carbone, de différents hydrocarbures et d'eau.

A titre d'exemple : pour produire du biogaz à partir de déchets végétaux, nous enfermons des déchets végétaux dans un flacon en verre, après quelques semaines nous voyons des bulles se dégager ; c'est du biogaz (ou méthane).

II.2 la composition du biogaz :

La composition du biogaz et particulièrement la proportion en méthane et en dioxyde de carbone, dépend de la qualité du substrat traité.

| Composant | Décharge d'ordures ménagères (OM à 80%) production naturelle sans aspiration | Décharge d'ordures ménagères (OM à 80%) production forcée avec aspiration | Décharge d'ordures ménagères et de déchets industriels (50%-50%) production forcée avec aspiration | Ordures ménagères triées en digesteurs | Boues de stations d'épuration | Lisier de bovins ou d'ovins en fermenteurs | Distillerie |
|---|--|---|--|--|-------------------------------|--|-------------|
| CH₄ en % | 50-58 | 30-55 | 25-54- | 50-60 | 60-75- | 60-75- | 68 |
| CO₂ en % | 25-34 | 22-33 | 14-29 | 38-34 | 33-19 | 33-19 | 26 |
| N₂ en % | 18-2 | 26-6 | 49-17 | 5-0 | 1-0 | 1-0 | - |
| O₂ en % | 1-0 | 8-2 | 8-5 | 1-0 | < 0.5 | < 0.5 | - |
| H₂O en % | 4 (à30°C) | 4 (à30°C) | 4 (à30°C) | 6 (à30°C) | 6 (à30°C) | 6 (à30°C) | 8 (à30°C) |
| Total en % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| H₂S mg/m ³ | 20-50 | 5-20 | 100-900 | 100-900 | 1000-4000 | 2000-10000 | 400 |
| NH₃ mg/m ³ | - | - | - | - | - | 50-100 | - |
| Aromatique mg/m ³ | 2 | 1 | 0-200 | 0-200 | - | - | - |
| Organochlorés ou organofluorés mg/m ³ | 0-200 | 0-100 | 100-800 | 100-800 | - | - | - |

Tableau II.1 : composition du biogaz selon origines [11].

II.3 les caractéristiques du biogaz :

| Caractéristiques | Méthane (100% CH ₄) | Biogaz (70%) |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------|
| PCI (kWh) | 9.94 | 6.96 |
| Densité/air | 0.55 | 0.85 |
| Vitesse de déflagration (m/s) | 0.38 | 0.21 |
| Limites d'inflammation (%) | 5 à 15 | 6 à 18 |
| Potentiel de combustion | 54.55 | 24.71 |

Tableau II.2 : les caractéristiques du biogaz et du méthane déterminées à 0°C et 1 atm [2].

Il est évident que le pouvoir calorifique du biogaz est également proportionnel à sa teneur en méthane comme l'indique le tableau suivant ;

| Proportion en CH ₄ (%) | PCS (KWh / m ³) | PCI (kWh / m ³) |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 50 | 4.8 | 4.3 |
| 60 | 5.7 | 5.1 |
| 70 | 6.7 | 6.0 |
| 80 | 7.6 | 6.9 |
| 90 | 8.6 | 7.8 |
| 100 | 9.5 | 8.6 |

Tableau II.3 : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane [2].

A titre indicatif, le pouvoir calorifique d'1 m³ de biogaz (contenant 70% de méthane et 30% de gaz carbonique), peut être comparé à celui d'autres combustibles ou d'autres sources énergétiques [10].

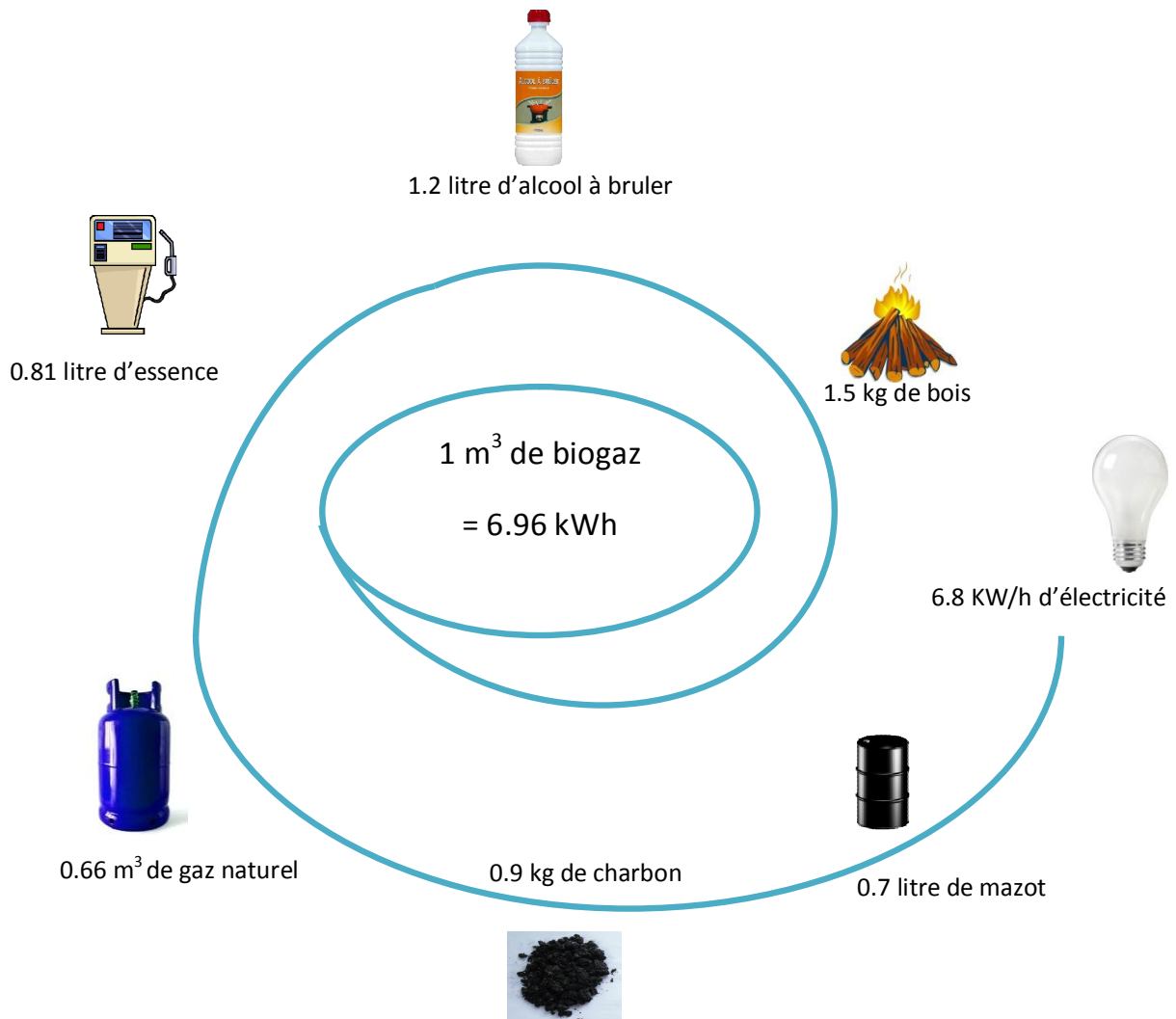


Figure II.1 : équivalent énergétique d'un mètre cube de biogaz (contenant 70% de méthane et 30 % de gaz carbonique) [10].

II.4 Le stockage du biogaz [10] :

A l'échelle de la ferme, le biogaz peut être stocké dans des gazomètres à basse pression, soit à l'eau (type cloche), soit sec (type ballon gonflable).

A l'échelle industrielle, le méthane peut être liquéfié et transporté en l'état (méthanier) ou mis en réserve dans des poches souterraines, tout comme le gaz naturel.

II.5 La valorisation du biogaz :

Le biogaz, est une énergie renouvelable riche en méthane. De ce fait, elle peut se valoriser, soit dans des utilisations domestiques, soit dans des utilisations industrielles.

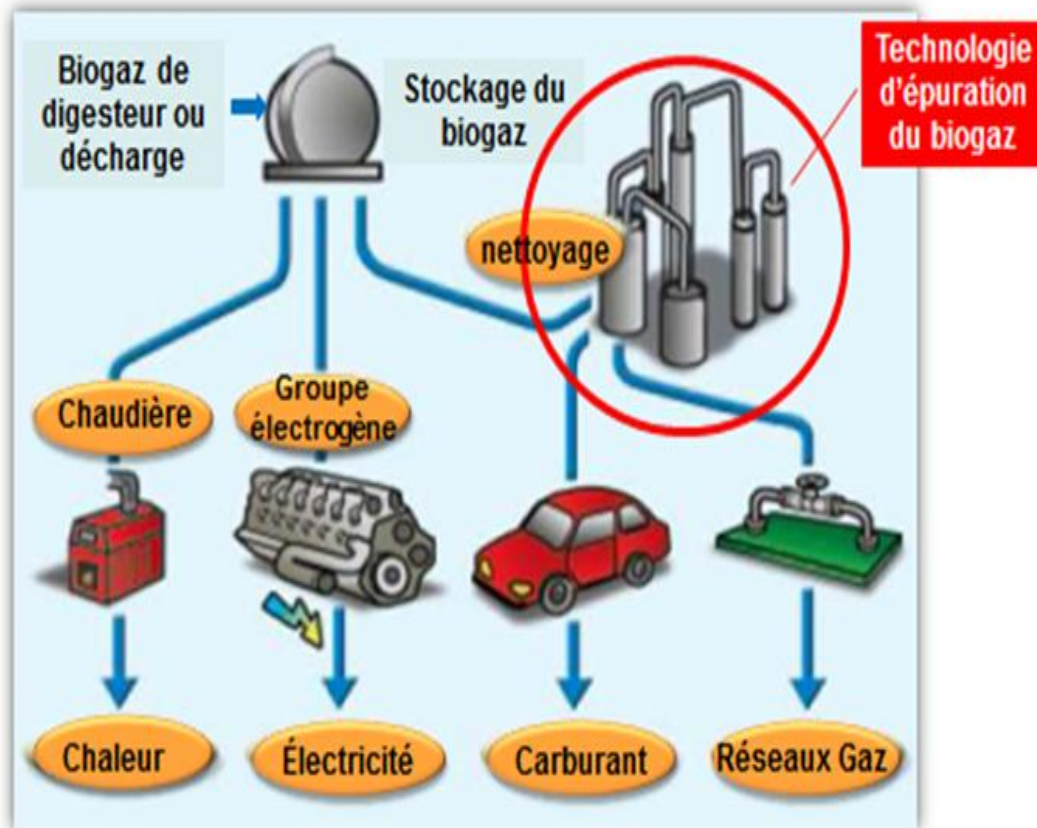


Figure II.2 : les différentes voies de valorisation du biogaz.

- **Les utilisations domestiques :**

Les premières utilisations domestiques du biogaz, sont des utilisations plus classiques ; Le biogaz est brûlé pour tirer de la chaleur qui sera ensuite utilisé, pour la cuisson, le chauffage, et l'éclairage. L'éclairage peut être obtenu en utilisant un manchon à gaz ou par production d'électricité [8].

- **Les utilisations industrielles :**

Le biogaz peut être valorisé industriellement par plusieurs voies ;

- Le biogaz peut être valorisé industriellement soit, dans les moteurs à poste fixe ou mobile, soit, dans les turbines à gaz, pour assurer la production d'énergie motrice, le pompage de l'eau, l'alimentation de machines (batteuse, moulins), ou la production d'électricité [8] ; [12].
- La transformation par voie chimique en méthanol ou d'autres hydrocarbures comme le propane ou le butane.
- Le séchage, le chauffage d'eau, et la production totale, mélangé ou non avec le gaz naturel fossile, pour une utilisation ultérieure.

- Un carburant pour les véhicules. Il faut souligner le fait qu'un car roulant avec du biogaz a les mêmes performances qu'un autre roulant avec du diesel [2].

| Pays | Véhicule |
|------------------|----------|
| Russie | 315 000 |
| Italie | 245 000 |
| Argentine | 75 000 |
| Nouvelle-Zélande | 49 000 |
| Etats unis | 30 000 |
| Canada | 25 000 |
| Chine | 4 000 |
| France | - |
| Autres | 1 500 |
| Total | 745 000 |

Tableau II.4 : flotte de véhicules équipés au méthane dans le monde en 2002 [2].

II.6 L'épuration du biogaz :

A la sortie du digesteur, le biogaz renferme, outre le méthane, des quantités appréciables de gaz carbonique et d'hydrogène, des traces d'azote, d'oxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, d'ammoniac ainsi que hydrocarbures et de l'eau.

L'épuration du biogaz permet de [13] :

- Améliorer le calorifique ;
- Diminuer le volume stockage.
- Supprimer l'effet corrosif dû à la présence de H_2S , CO_2 et H_2O ;
- Supprimer les mauvaises odeurs dus à la présence de H_2S (ôuf pourri).

L'épuration consiste en l'élimination principalement de trois composées [10] :

- Le gaz carbonique ;

- Le sulfure d'hydrogène;
- L'eau.

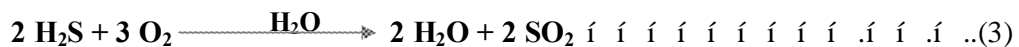
Il y a plusieurs façons de purifier le biogaz. Parmi les procédés de traitement du biogaz, la plus poussée est celle qui consiste à épurer de façon à atteindre les normes du gaz naturel. L'épuration du biogaz pour atteindre les normes du gaz Natural peut s'effectuer de différentes manières : absorption dans un liquide ; adsorption sur un solide, etc.

II.6.1 L'épuration de sulfure d'hydrogène :

Le sulfure d'hydrogène est un gaz incolore très toxique même à petites concentrations, il a une odeur caractéristique « d'œuf pourri » [8].

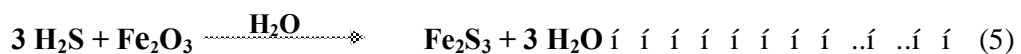
Le sulfure d'hydrogène provient, dans les installations de biogaz, de la transformation des protéines contenant du soufre, issues elles même des plantes ou des déchets alimentaires. Le soufre minérale, particulièrement les sulfates, peut même être aussi converti biochimiquement en sulfure d'hydrogène dans le réacteur de fermentation. Les déchets riches en protéines (par exemple les mélasses, etc.) peuvent produire de grandes quantités de sulfure d'hydrogène (plus 3% en volume). Les sulfates minéraux (provenant d'eaux de rinçage ou de dilution) produisent également des quantités non négligeables de H₂S [8].

La présence de H₂S dans le biogaz le rend corrosif pour les métaux. La combustion de l'hydrogène sulfure produit de l'acide sulfurique, composé très corrosif pour les appareils de chauffage, les cuisinières, les moteurs, etc.[10].

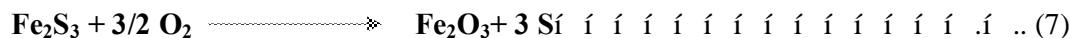
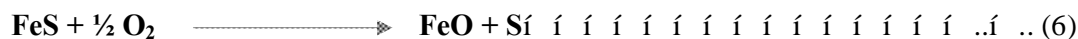


L'épuration de sulfure d'hydrogène peut se faire par un passage sur de la limaille de fer, cette technique est simple à mettre en œuvre : il s'agit de faire circuler le gaz à travers une masse épurante d'oxyde de fer. La régénération du produit est possible mais délicate à réaliser.

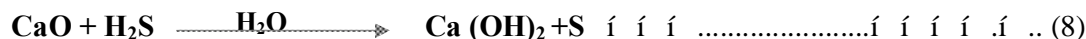
Epuration :



Regeneration:



On peut également faire l'épuration de l'H₂S en le piégeant dans l'eau et de la chaux ;



On peut aussi éliminer le sulfure d'hydrogène et même le gaz carbonique par lavage à l'eau. Le CO₂ et l'H₂S sont très solubles, dans l'eau, le CH₄ est peu soluble. La solubilité des gaz dans l'eau croît lorsque la pression augmente et quand la température diminue. Un laveur est généralement constitué de deux étages, un pour l'épuration de gaz, et l'autre pour la régénération de l'eau par aération. La mise au point de ces appareils est assez délicate ; car il faut déterminer les débits de gaz ; d'eau ; le volume du laveur et la qualité du garnissage utilisé. Il est préférable que la pompe de recyclage de l'eau de lavage soit en acier inoxydable sous peine d'être très rapidement corrodée [2].

| Gaz | g/100g eau | Litre/litre d'eau |
|------------------|------------|-------------------|
| CO ₂ | 0.170 | 1.050 |
| H ₂ S | 0.440 | 2.950 |
| O ₂ | 0.005 | 0.034 |
| N ₂ | 0.002 | 0.017 |
| CH ₄ | / | 0.035 |

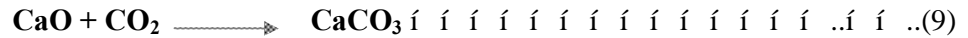
Tableau II.5 : solubilité des gaz dans l'eau.

II.6.2 L'épuration du gaz carbonique :

Pour les véhicules, la présence de CO₂ est préjudiciable pour de multiples raisons. Elle diminue la puissance du moteur, prend de la place dans les bouteilles de stockage (réduisant d'autant le rang du véhicule) et peut poser des problèmes de congélation aux vannes et points de mesure ou le gaz se décompresse pendant le fonctionnement, le remplissage des réservoirs, ou encore lors de la procédure de compression et de stockage. Tout ou la plus utilisation comme carburant pour les véhicules et ceci avant la compression du gaz dans des bouteilles haute pression, qui seront transportées par le véhicule. Le CO₂ et l'H₂S en solution forment des condensats acides qui attaquent plus tard les métaux.

Le procédé le plus simple pour abaisser la teneur en gaz carbonique est le lavage à l'eau, car ce gaz est très soluble dans l'eau.

Le gaz carbonique peut être également piégé par l'eau et de la chaux ou une solution alcoolique de monoéthanolamine ou de diéthylamine [10].



Quant à la liquéfaction différentielle, elle permet une très bonne séparation du gaz carbonique et du méthane mais le procédé reste coûteux et difficile à mettre en œuvre, donc réservé à des industries voulant commercialiser ces deux gaz à l'état purifié.

II.6.3 L'épuration de l'eau :

L'eau est éliminée par condensation, c'est au niveau du gazomètre de stockage qu'elle peut intervenir. Mais on peut faire cette déshydratation par passage du gaz dans une colonne sèche remplie de chlorure de calcium ou de chaux vive.

Chapitre III

**Dispositifs Expérimentales
et Modes Opératoires**

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des dispositifs expérimentaux et toutes les méthodes d'analyses utilisées, ainsi que l'origine du substrat utilisé pour l'alimentation des digesteurs.

III.1 Origine et caractérisation du substrat utilisé :

Le substrat utilisé dans cette étude pour l'alimentation des digesteurs, est constitué principalement d'un déchet d'abattoir.

Les digesteurs utilisés sont alimentés de déchet afin d'obtenir une concentration de l'ordre de 42 g MS. l⁻¹.

❖ Ce travail comporte trois parties :

- Dans la première partie (expérience I) on a étudié une digestion naturelle anaérobie du notre échantillon
- Dans la deuxième partie (expérience II) et afin d'étudier l'effet de la température sur la digestion anaérobie, on a utilisé un bain marie pour maintenir la température constante au cours de l'expérience (37°C).
- Dans la troisième partie (expérience III) et afin d'étudier l'effet de le pH sur la digestion, on a ajusté le pH par une solution de bicarbonate de sodium, et maintenir la température de processus par un bain marie.



Figure III.1 : le substrat brut

III.2 Description du digesteur et du dispositif utilisé :

Les essais ont été réalisés dans des réacteurs de type discontinu. Ces réacteurs sont de modèle des laboratoires, en verre, très simple, permettant d'assurer l'anaérobie de milieu de culture.

Ces réacteurs sont munis de trois sorties, la première pour le prélèvement des échantillons liquides à l'aide d'une seringue, et l'autre pour assurer l'échappement du gaz pour la mesure du volume de biogaz produit, et la troisième pour placer une burette de dilution par l'eau et aussi pour l'ajustement de pH. Le volume utile des réacteurs est de 2 L. Nous avons laissé un volume de gaz au-dessus du niveau de liquide pour protéger la sortie de gaz.



Figure III.2 : le digesteur utilisé

Les réacteurs des expériences (II et III) sont maintenus en condition mésophile (37 °C) dans un bain marie chauffé et réglé par un thermostat. Les réacteurs sont agités manuellement en les secouant une à deux fois par jours.

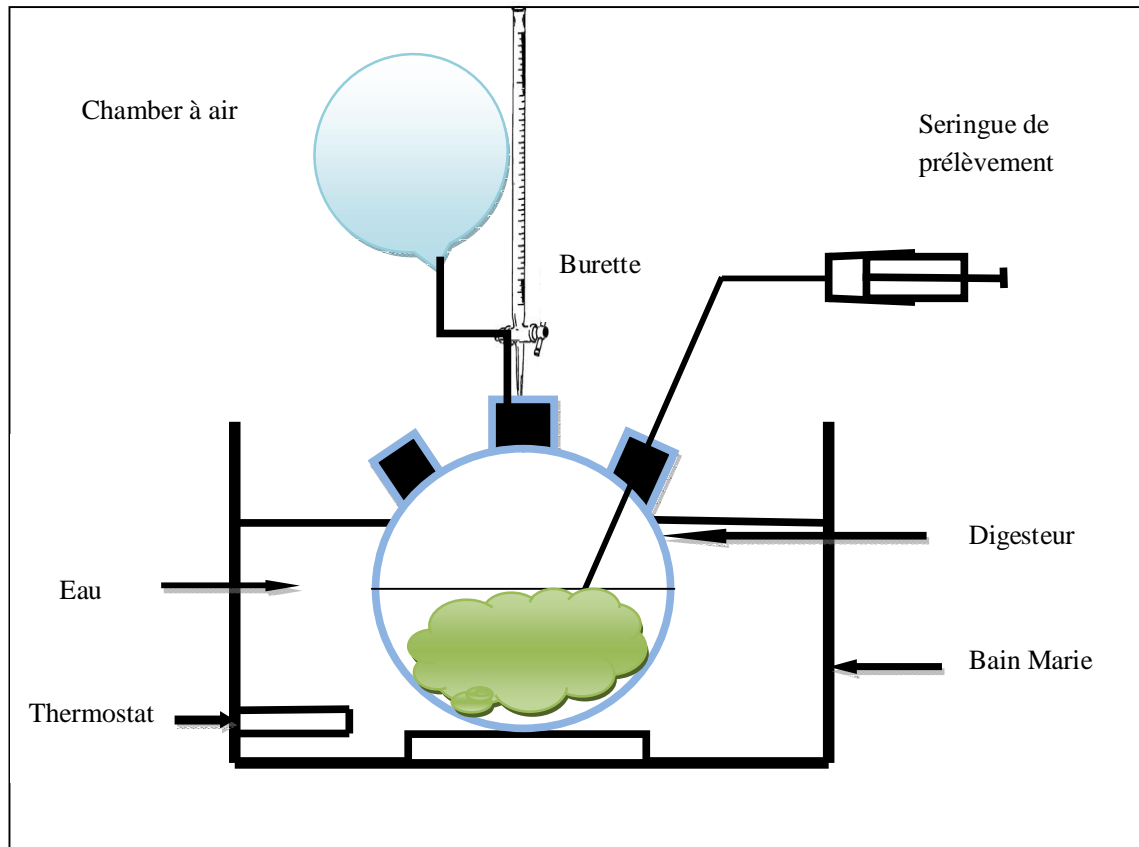


Figure III.3 : schéma simplifié du dispositif expérimental.

III.3 Méthodes d'analyses :

III.3.1 Détermination de la matière sèche (MS) [14] :

a) Matériels utilisés :

- Etuve réglée à 105 °C
- Capsule
- Dessiccateur
- balance

b) Méthode :

La matière sèche est déterminée par dessiccation dans une étuve maintenue à 105 °C jusqu'à ce que le poids devienne constant. La différence de poids correspond à la perte d'humidité et le résidu représente la teneur en matière sèche de l'échantillon.

Pour déterminer la matière sèche, une prise d'échantillon d'une masse de 50 g, soit M_1 , est versée dans une capsule de masse connue soit M préalablement nettoyée et séchée, ensuite

l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La capsule est pesée après refroidissement dans un dessiccateur et la matière sèche est calculée selon l'expression suivante :

$$\% \text{MS} = \frac{M - M_2}{M - M_1} \times 100$$

Avec :

M : masse de la capsule (43g)

M1 : masse de l'échantillon avant dessiccation (50g)

M2 : masse de l'échantillon après dessiccation (7g)

Le taux d'humidité est calculé à partir de la formule suivante :

$$\% \text{ d'humidité} = 100 - \% \text{MS}$$



Figure III.4 : étuve utilisée pour la détermination de la matière sèche

III.3.2 Détermination de la teneur en matière organique (MO) [14] :

a) Matériels Utilisés :

- four à moufle
- capsule

- balance de précision
- dessiccateur

b) Méthode :

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

Pour déterminer la teneur en matière organique, une masse de 7g de l'échantillon après dessiccation, soit M1, est introduite dans une capsule préalablement nettoyée et séchée ayant une masse M, l'ensemble est placé dans un four à moufle pour une calcination à 550°C, pendant 12-18 heures. après refroidissement la capsule contenant la matière minérale est pesée encore une fois. La masse de la matière organique est obtenue par différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale.

$$\% \text{ MO} = \frac{M - M_2}{M_1} \times 100$$

Avec :

M : masse de la capsule

M1 : masse de l'échantillon après dessiccation

M2 : masse de l'échantillon après calcination



Figure III.5 : le four à moufle utilisé pour la détermination de la MO

III.4 Les paramètres suivis :

III.4.1 Le pH :

Le pH est un facteur facilement mesurable et le plus important pour le processus de méthanisation, il donne une idée sur l'acidité ou l'alcalinité du milieu, en outre, les microorganismes ne peuvent se développer (fonctionner) que dans une plage spécifique de pH.

a) Matériels :

- pH-mètre
- bécher

b) Méthode :

Toutes les valeurs de pH dans cette étude sont obtenues à l'aide d'un pH-mètre de type (HANNA pH 213) Muni d'une électrode en verre.

La première étape avant l'utilisation est l'étalonnage du pH-mètre, qui est effectué à l'aide de deux solutions tampons de pH=4 et pH=7, la précision de la mesure donnée par le constructeur est de 0.1 unité de pH.

Après l'étalonnage, on émerge l'électrode dans notre échantillon et on lit directement la valeur de pH affiché sur l'écran.



Figure

III.6 : le pH-mètre utilisé

III.4.2 Le volume de biogaz :

A l'aide d'une seringue de grande capacité raccordée en discontinu au moyen d'une vanne au ballon ; le volume mesuré du biogaz récupéré fait flotter le piston de seringue jusqu'à la graduation indiquant le volume obtenu.

a) Matériels :

- ballon en plastique
- seringue de 50 ml
- vannes de contrôle

b) Méthode :

Le volume de biogaz est mesuré après sa collection dans le ballon, par remplissage de Seringue une ou plusieurs fois dépendant de volume du gaz récupéré. Les mesures ont été faites quotidiennement sauf les jours de week-end.

III.4.3 La détermination du titre alcalimétrique complet (TAC) [15] :

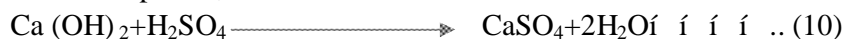
Le titre alcalimétrique complet permet de connaître les doses de carbonates d'hydroxydes et d'hydrogencarbonates alcalins ou alcalino-terreux, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils. Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides.

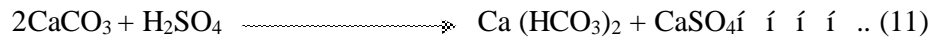
a) Matériels :

- pH-mètre
- centrifugeuse
- Agitateur et un barreau magnétique
- Burette
- bécher

b) Méthode :

Pour déterminer le TAC, l'échantillon prélevé est centrifugé pendant 15 minutes. après centrifugation, on prend un volume de notre échantillon (soit 6ml) et on le met dans un bécher. On mesure le pH initial, et à l'aide d'une burette, on ajoute de l'acide sulfurique (H_2SO_4) 0.1 N jusqu'à une valeur de pH =4, selon les réactions suivantes :





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

$$\text{TAC} = \frac{V \times N \times 1000}{V_0} \left(\frac{1}{f} \right)$$

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

$$\text{TAC} = V \times 16.666 \times 12 \text{ (mg/l)}$$

III.4.4 La détermination des acides gras volatils (AGV) [16] :

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

a) Matériels utilisés :

- pH-mètre
- centrifugeuse
- agitateur et barreau magnétique
- plaque chauffante
- Burette
- bécher

b) méthode :

Pour déterminer la concentration totale en acides gras volatils, on continue d'ajouter de l'acide sulfurique à l'échantillon jusqu'à une valeur de $\text{pH} = 3.5$, après on fait bouillir le liquide pendant 3 minutes, de manière à dégazer le dioxyde de carbone.

La solution est ensuite refroidie à la température ambiante ; après le refroidissement et à l'aide d'une burette, on ajoute de la soude (NaOH) 0.01 N jusqu'à une valeur de pH = 4 et on marque le volume obtenu, soit V₂. On continue d'ajouter la soude jusqu'à une valeur de pH = 7, on marque le volume soit V₃.

L'AGV s'exprime comme suit :

$$AGV = \frac{(V_2 - V_1) \cdot N \cdot V_0}{V} \left(\frac{V_3}{V} \right)$$

Ou :

$$AGV = V_2 - V_1 - V_2 \cdot N \cdot V_0 \left(\frac{V_3}{V} \right)$$

III.4.5 L'inflammabilité du gaz :

Le test d'inflammabilité de biogaz, donne une idée sur le rendement énergétique de l'échantillon utilisé.

Chaque fois, après la mesure de volume de biogaz, on passe à un test d'inflammabilité de ce dernier. Le biogaz est retiré à l'aide d'une seringue et est soumis à une flamme discontinue d'un briquet.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Caractérisation du substrat utilisé :

Les principales caractéristiques physico-chimique du substrat utilisé dans cette étude, sont présentées dans le tableau suivant :

| Paramètre | valeur |
|-----------------------|--------|
| pH | 6.20 |
| Matière organique (%) | 85 |
| Matière sèche (%) | 14 |

Tableau IV.1 : caractéristiques du substrat

IV.2 Evolution des paramètres de fonctionnement :

IV.2.1 Evolution du PH :

Les procédés anaérobies sont fortement influencés par le pH. La digestion anaérobie se déroule de façon optimale au voisinage de la neutralité (pH=7). Le pH est un indicateur très important dans la stabilité et le bon déroulement de phénomène. En plus, le suivi de l'évolution du pH permet de situer les différentes étapes de la dégradation de la matière organique.

Pour les trois digesteurs, on peut remarquer que le pH varie au cours de la méthanisation. La variation du pH dans ce type de réactions biologiques peut être associée à différents facteurs (les AGV, l'alcalinité). En effet, Toutes les valeurs de pH mesurées sont comprises dans l'intervalle situe entre 5.1 et 7.2.

IV.2.1.1 L'évolution du pH dans le digesteur (I) (cas naturel) :

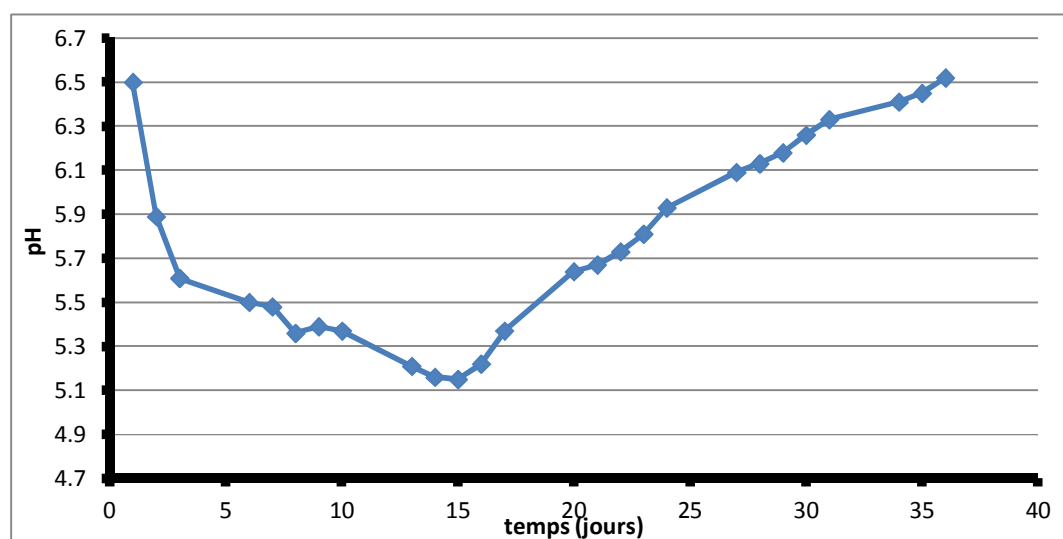


Figure IV.1 : L'évolution du pH dans le digesteur (I)

IV.2.1.2 L'évolution du pH dans le digesteur (II) (cas de température fixée) :

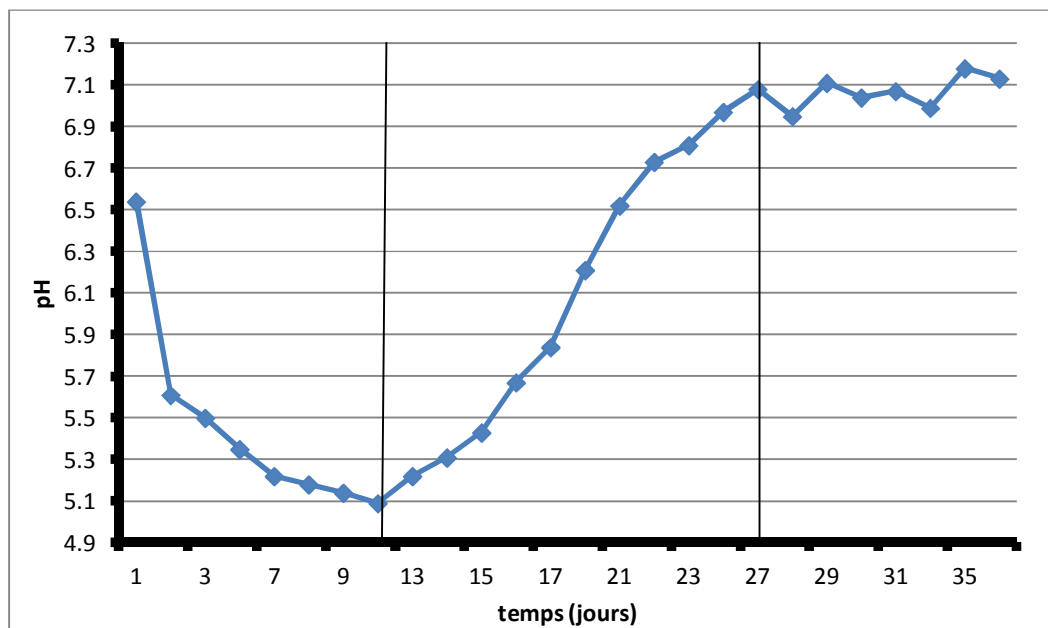


Figure IV.2 : l'évolution du pH dans le digesteur (II)

IV.2.1.3 L'évolution du pH dans le digesteur (III) (cas de température fixée et pH ajusté)

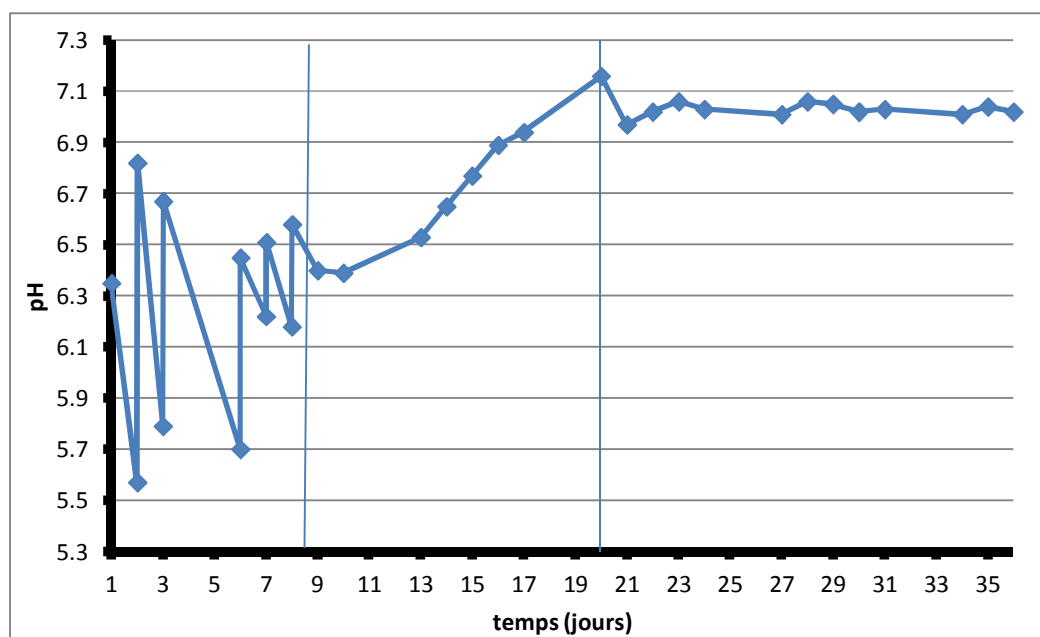


Figure IV.3 : l'évolution du pH dans le digesteur (III)

Les résultats présentés dans les figures (IV.1, IV.2 et IV.3) montrent que les courbes d'évolutions de pH des digesteurs (I), (II), et (III) peut être subdivisée en parties :

- **Dans la partie (1) :**

On peut observer une chute relativement rapide du pH vers des valeurs acides, cette chute signifie une acidification du milieu. L'acidification peut s'expliquer par la décomposition de la matière organique en acides gras accumulés dans le digesteur.

Ce phénomène se déclenche depuis le 1^{er} jour jusqu'au 15^{ème} jour pour le digesteur (I), la valeur du pH chute de 6.5 jusqu'à 5.15 ; du 1^{er} jour jusqu'au 10^{ème} dans le digesteur d'expérience (II) (de 6.54 jusqu'à 5.09), et du 1^{er} jour jusqu'au 8^{ème} pour le digesteur d'expérience (III) (les valeurs de pH est comprise dans l'intervalle de [5,57 - 6,82]).

- **Dans la partie (2) :**

Dans cette partie on remarque que les valeurs de pH commencent à augmenter, donc c'est l'alcalinisation qui commence à s'installer. Ceci est observé à partir du 16^{ème} jour et se poursuit jusqu'à la fin de l'opération dans l'expérience (I) ; cette augmentation est observé également depuis le 13^{ème} et le 9^{ème} jour successivement pour les digesteurs (II) et (III) (voire figures 1).

Les valeurs du pH fluctuent entre les valeurs (de 5.22 jusqu'à 7.08) pour l'expérience (II), et entre (de 6.58 jusqu'à 7.16) pour l'expérience (III).

La répartition des phases de phénomène de biodégradation selon l'évolution du pH pourrait éventuellement présentée dans les figures (I, II et III) (hachurées).

Ce phénomène s'expliquer par début de la consommation des acides gras par autres type des bactéries, (début de l'alcalinisation) (voire chapitre I).

- **Dans la partie (3) :**

Dans cette partie, on peut remarquer qu'il y a une stabilisation des valeurs de pH dans les digesteurs (II et III) voire figures (IV.2 et IV.3). Ceci est observé à partir du 28^{ème} jour jusqu'au 36^{ème} jour pour l'expérience (II) (de 6.95 jusqu'à 7.13) ; et du 21^{ème} jour jusqu'au 36^{ème} pour l'expérience (III) (6.97 et 7.06).

IV.2.2 Evolution des acides gras volatils (AGV) :

La concentration en acides gras volatils (AGV) est un paramètre caractéristique des premières phases de la méthanisation et le suivi de son évolution permet d'estimer l'état de dégradation du substrat, et la variation de leur concentration dans le milieu affecte directement l'alcalinité et la valeur du pH du milieu.

IV.2.2.1 L'évolution des AGV dans le digesteur N°1 :

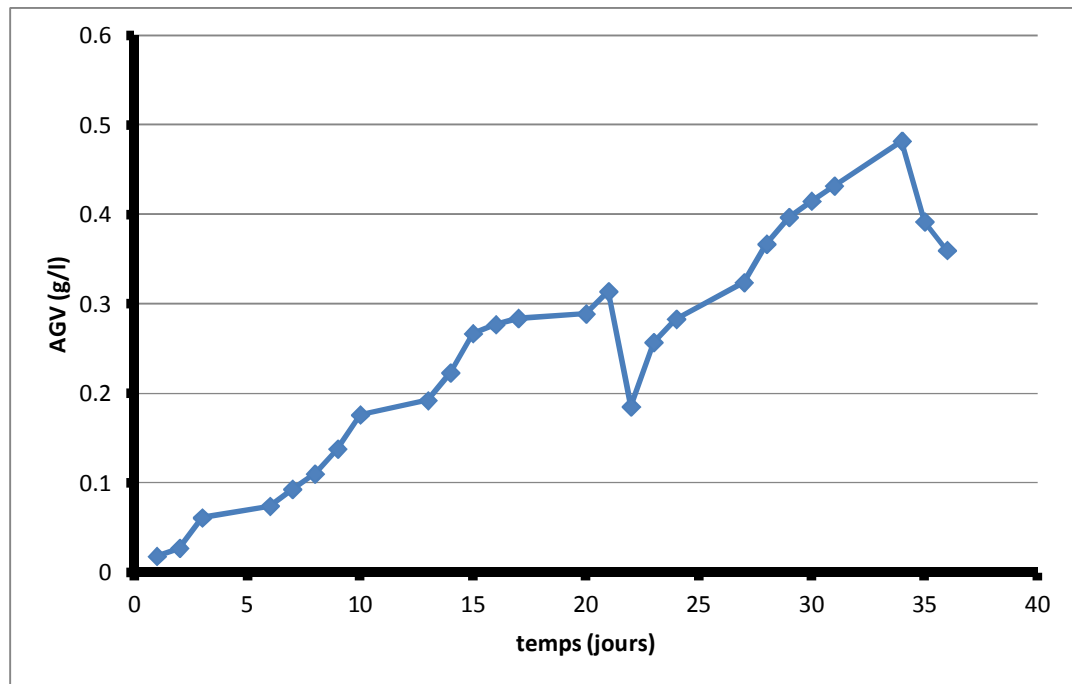


Figure IV.4 : l'évolution des AGV dans le digesteur (I)

IV.2.2.2 L'évolution des AGV dans le digesteur (II)

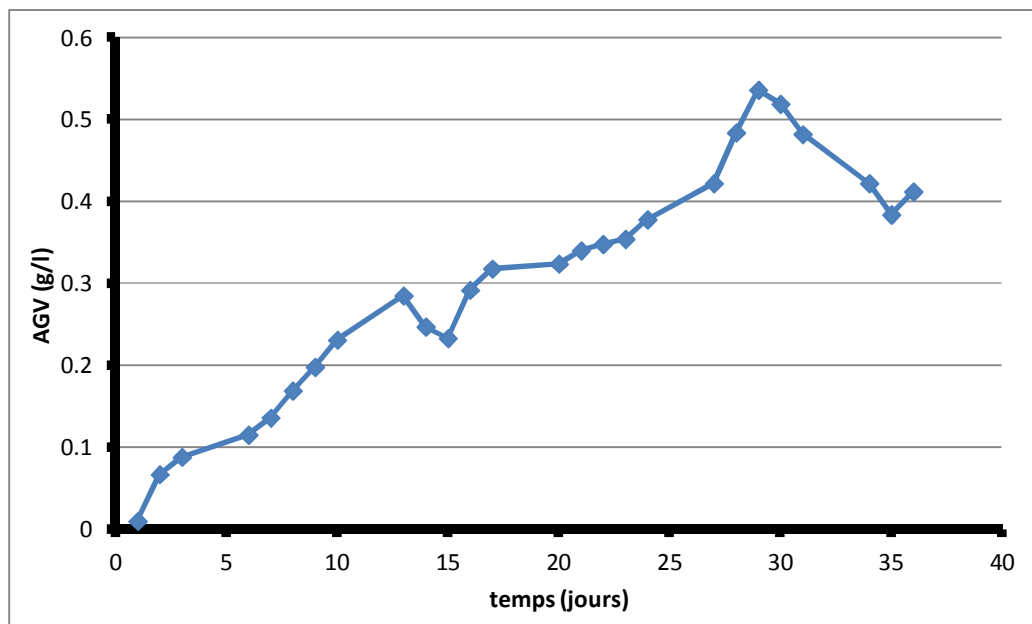


Figure IV.5 : l'évolution des AGV dans le digesteur (II)

IV.2.2.3 L'évolution des AGV dans le digesteur (III)

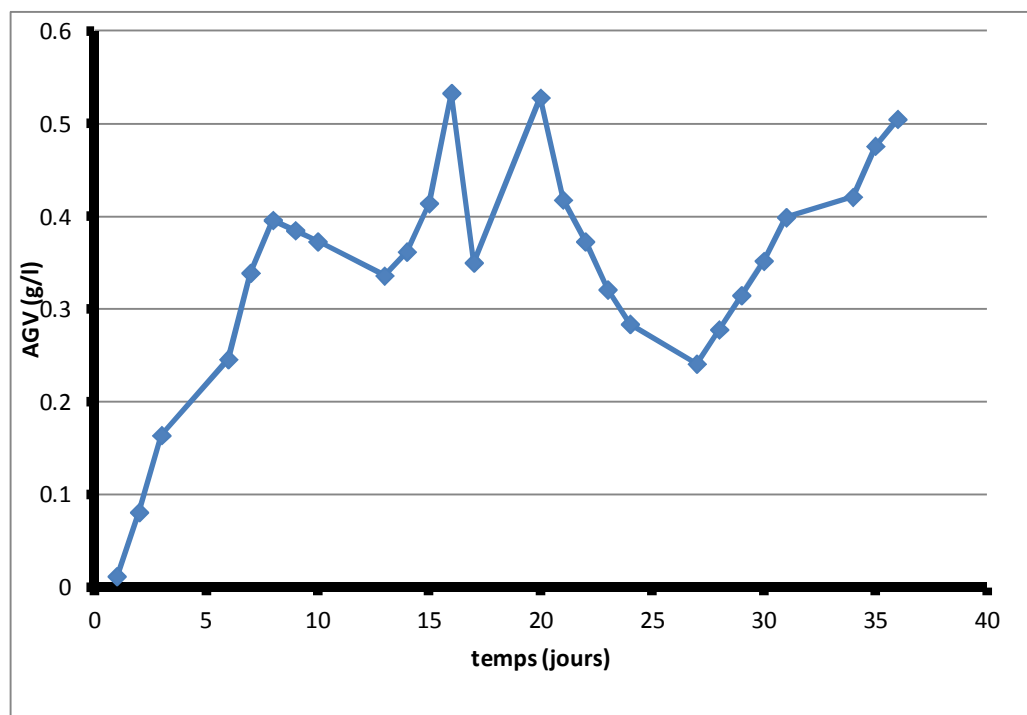


Figure IV.6 : l'évolution des AGV dans le digesteur (III)

Les résultats présentés dans les figures (IV.4, IV.5 et IV.6) montrent qu'il y a une variation permanente de la concentration des acides gras volatils.

Une augmentation de la concentration en AGV est observée dans le milieu à partir du 1^{er} jour jusqu'au 21^{ème} jour dans le digesteur (I), du 1^{er} jour jusqu'au 13^{ème} jour pour le digesteur (II), et à partir du 1^{er} jour jusqu'au 8^{ème} jour pour le digesteur (III).

Pour la deuxième partie, une augmentation puis une diminution des concentrations des AGV dans le milieu ; ceci est observé à partir du 21^{ème} jour jusqu'au 36^{ème} jour pour le digesteur (I), pour le digesteur (II) cette variation est observée à partir du 13^{ème} jour jusqu'au 36^{ème} jour, et à partir du 8^{ème} jour jusqu'au 36^{ème} jour pour le digesteur (III).

IV.2.3 Evolution du TAC :

Le titre alcalimétrique présente l'alcalinité du milieu. Cette alcalinité est la capacité à neutraliser les acides en solution.

À cause de la présence de différents types de substances dissoutes dans la phase liquide des procédés anaérobies (OH^- , HCO_3^- , HS^- etc.) un système complexe peut être formé [17].

IV.2.3.1 L'évolution du TAC dans le digesteur (I)

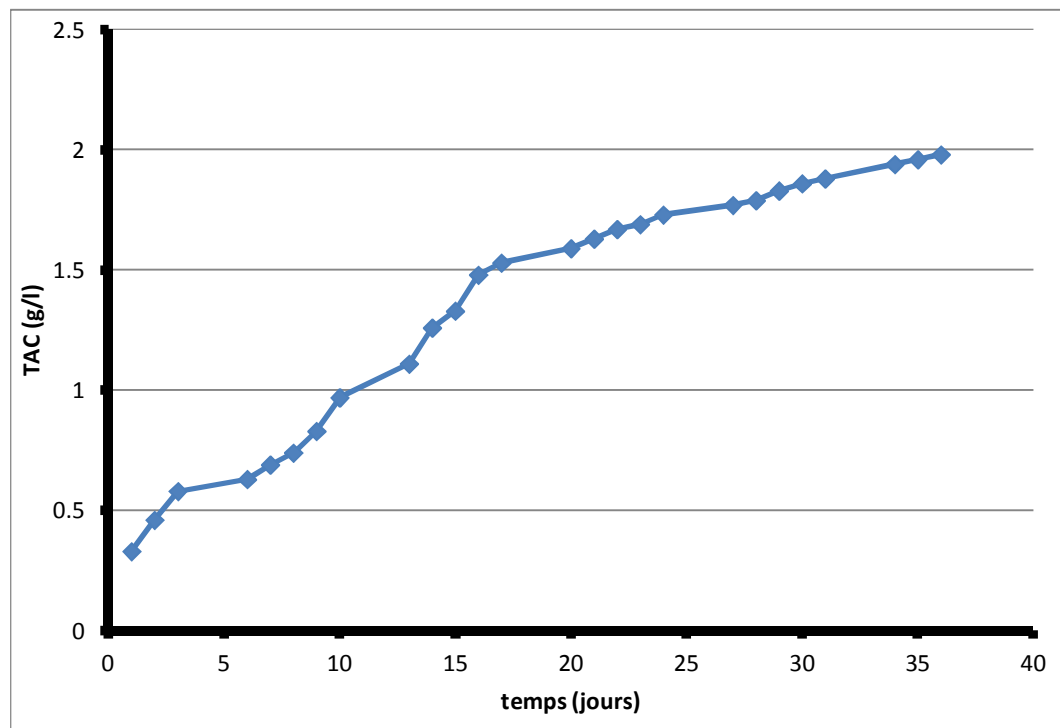
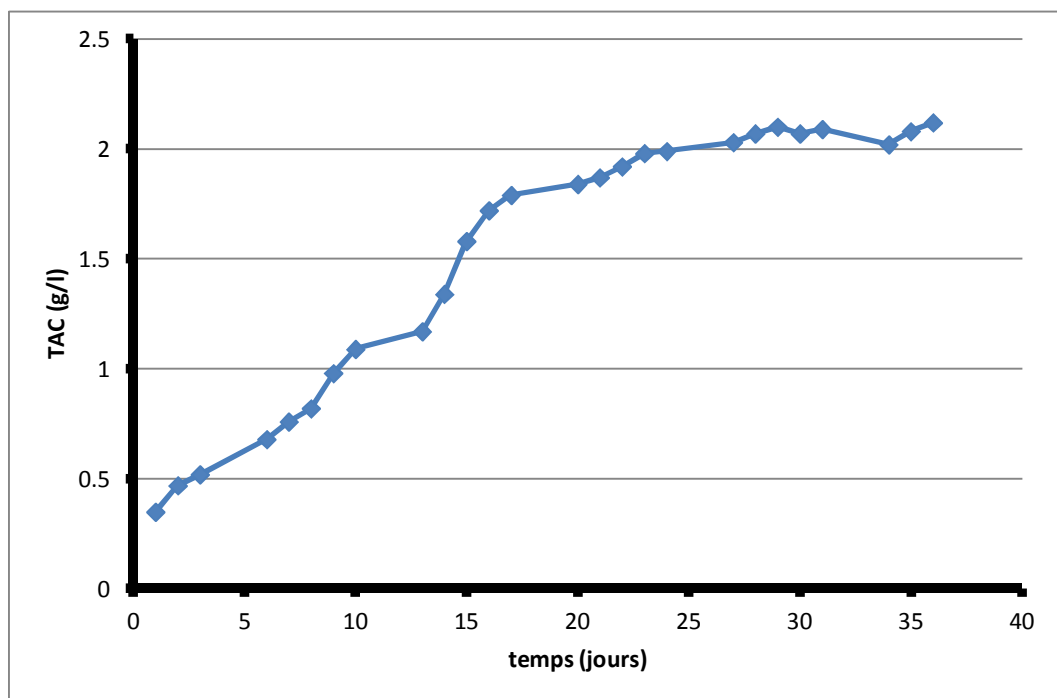


Figure IV.7 : l'évolution du TAC dans le digesteur (I)

IV.2.3.2 L'évolution du TAC dans le digesteur (II)



IV.8 : l'évolution du TAC dans le digesteur (II)

Figure

IV.2.3.3 L'évolution du TAC dans le digesteur (III)

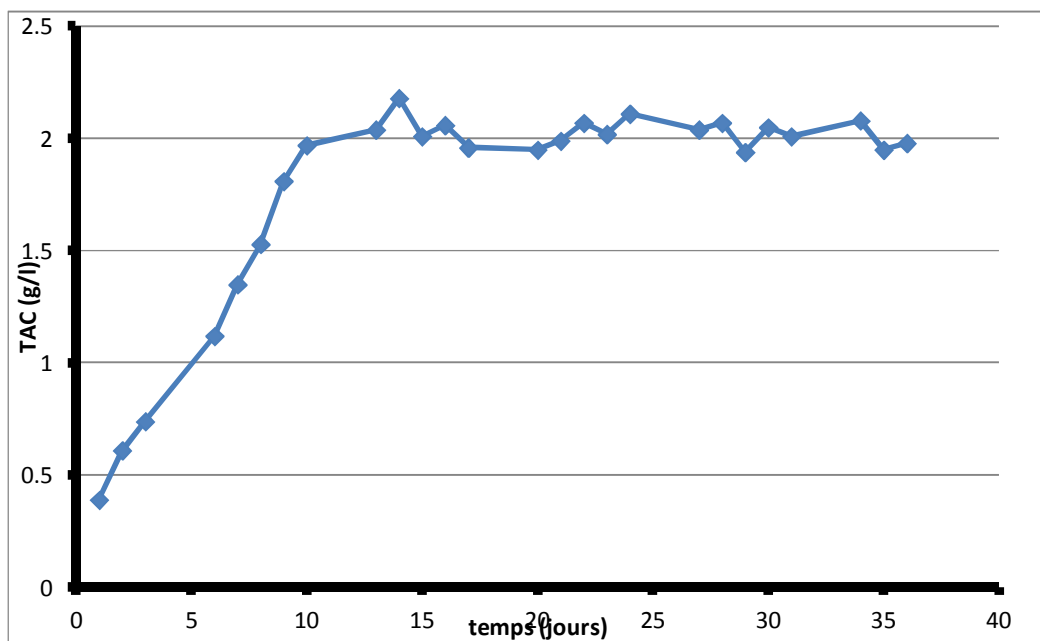


Figure IV.9 : l'évolution du TAC dans le digesteur (III)

Les courbes indiquent l'évolution des TAC pour les trois digesteurs montrant qu'une auto alcalinisation des milieux apparaît en s'augmentant jusqu'à une tendance de stabilisation.

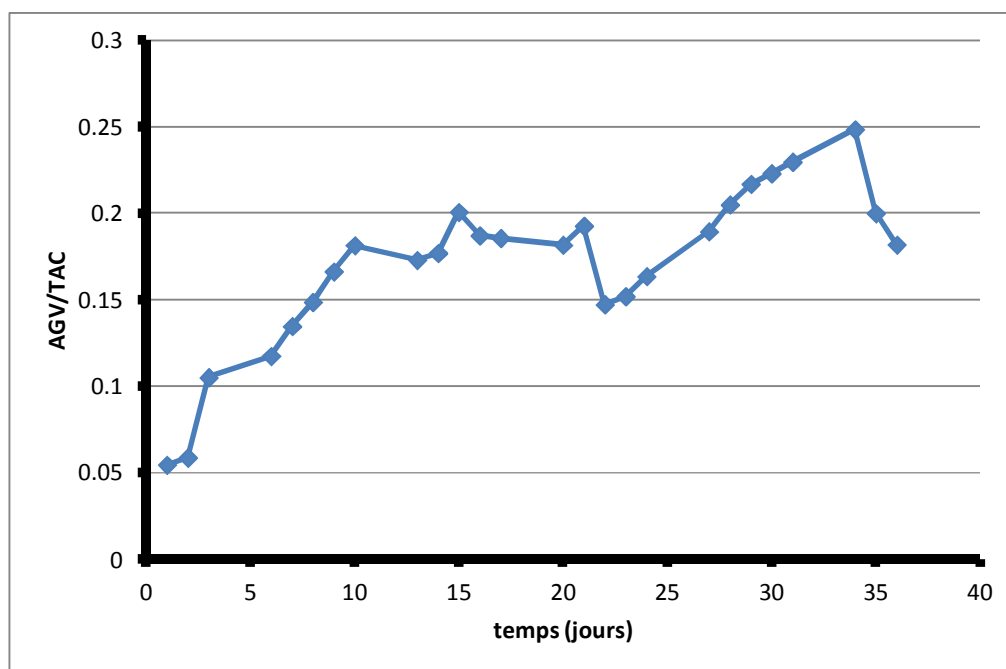
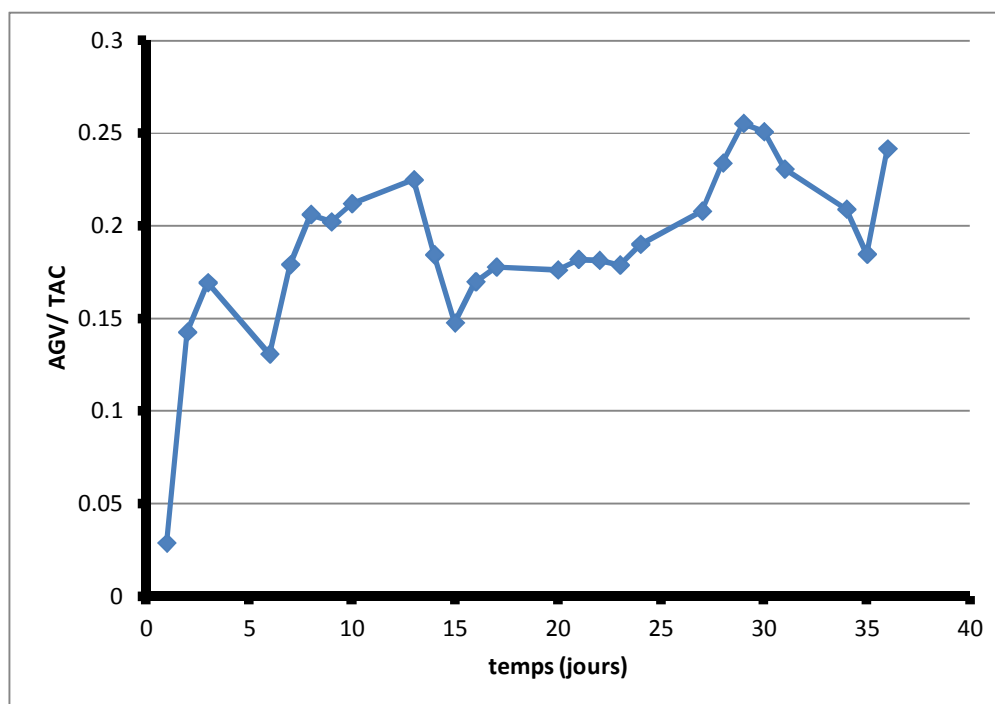
En ce qui concerne le digesteur (III), cette stabilisation est précoce.

IV.2.4 Variation du rapport AGV/TAC :

Ce rapport entre les AGV et le titre alcalimétrique (TAC) à été reporté comme étant un paramètre important pour le contrôle de la stabilité des systèmes.

Il existe trois valeurs pour le rapport AGV/TAC [17] :

- 0.1 : fonctionnement normal
- 0.5 : début de dysfonctionnement
- 1 : blocage du système

IV.2.4.1 La variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur (I) :**Figure IV.10 :** le rapport AGV/TAC dans le digesteur (I)**IV.2.4.2 La variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur (II) :****Figure IV.11:** le rapport AGV/TAC dans le digesteur (II)

IV.2.4.3 La variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur (III) :

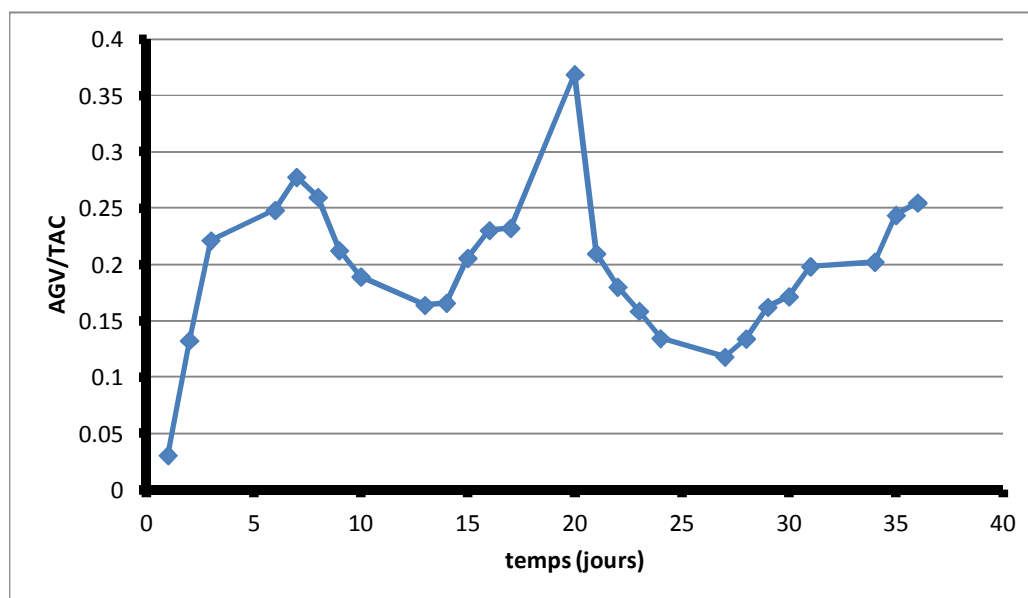


Figure IV.12: le rapport AGV/TAC dans le digesteur (III)

Le paramètre indicateur du fonctionnement de la digestion anaérobie, qui est le rapport AGV/TAC, apparait que ce rapport était inférieur à 0,5 (pas plus de 0,37 pour les 3 digesteurs), cette Valeur est favorable pour un bon fonctionnement.

IV.2.5 Production du biogaz :

IV.2.5.1 La production journalière du biogaz dans le digesteur (I) :

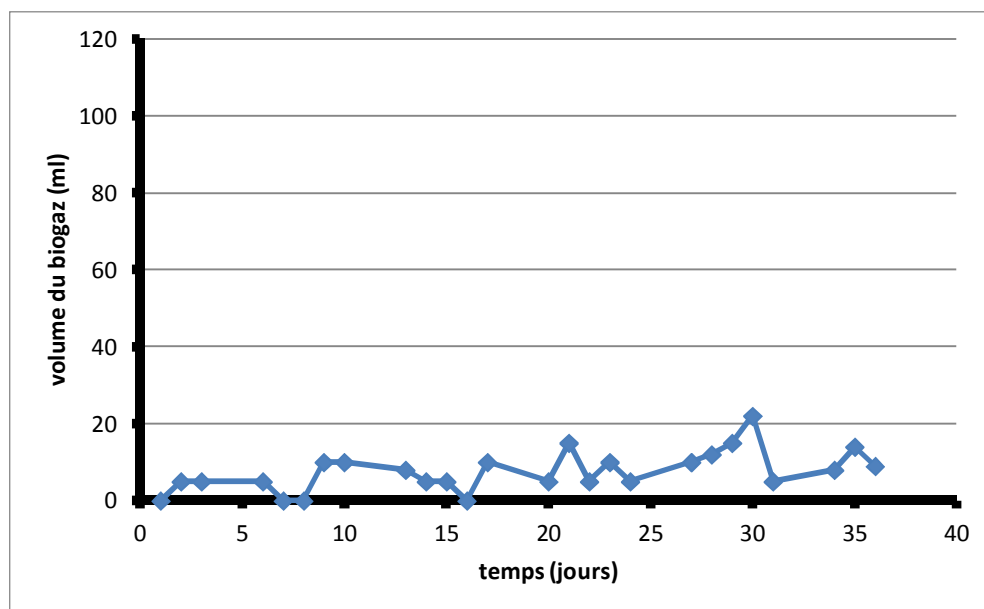
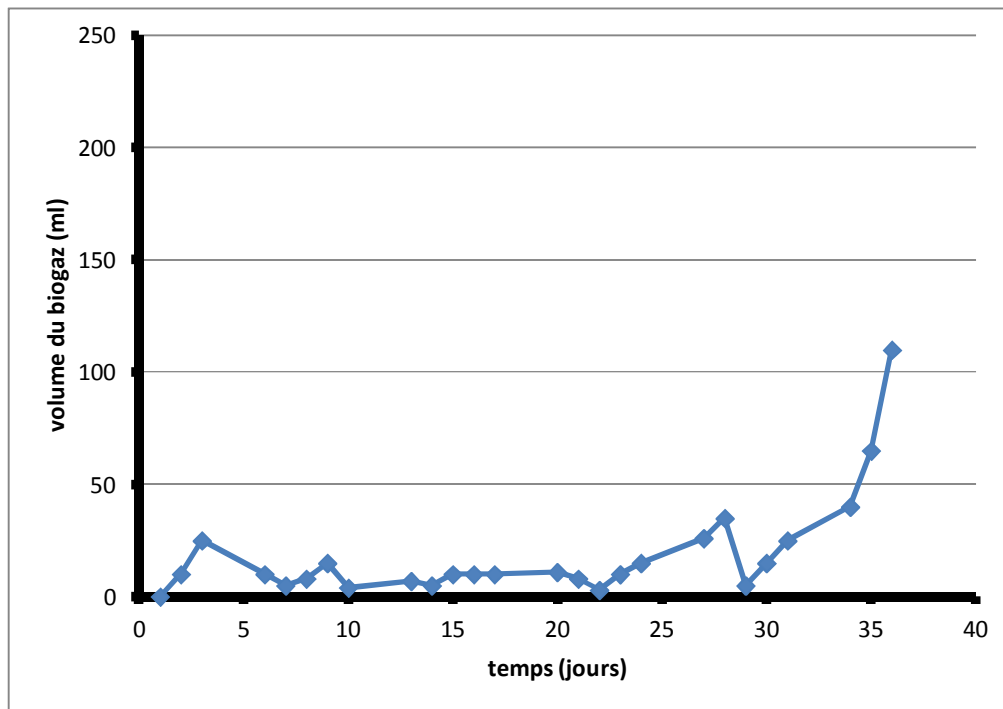
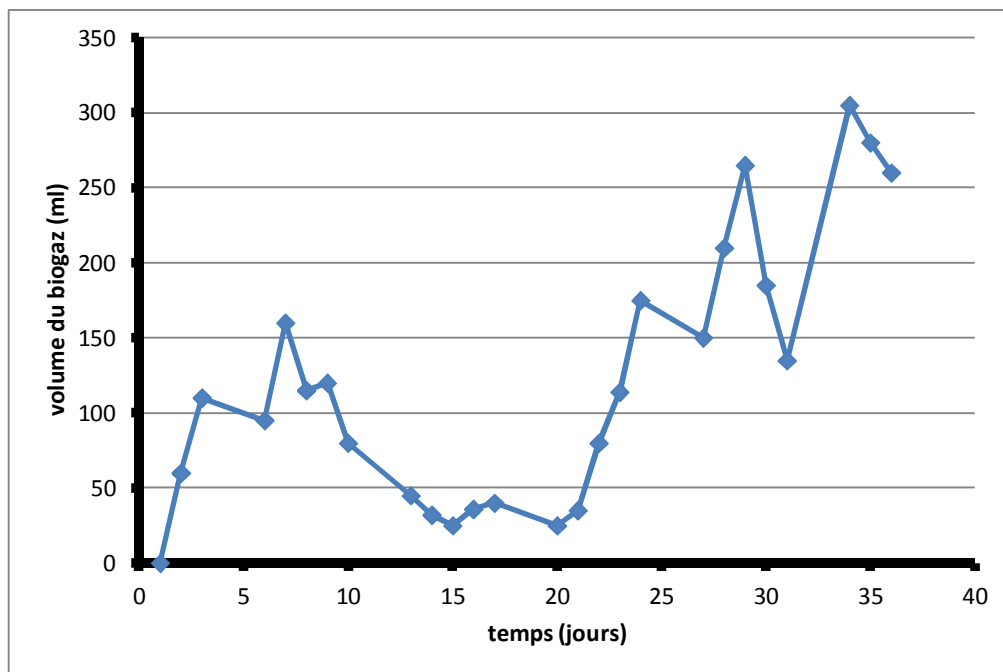


Figure IV.13 : la production journalière du biogaz dans le digesteur (I)

IV.2.5.2 La production journalière du biogaz dans le digesteur (II) :**Figure IV.14 :** la production journalière du biogaz dans le digesteur (II)**IV.2.5.3 La production journalière du gaz dans le digesteur (III) :****Figure IV.15 :** La production journalière du biogaz dans le digesteur (III)

IV.2.5.4 La production cumulée du biogaz dans le digesteur (I) :

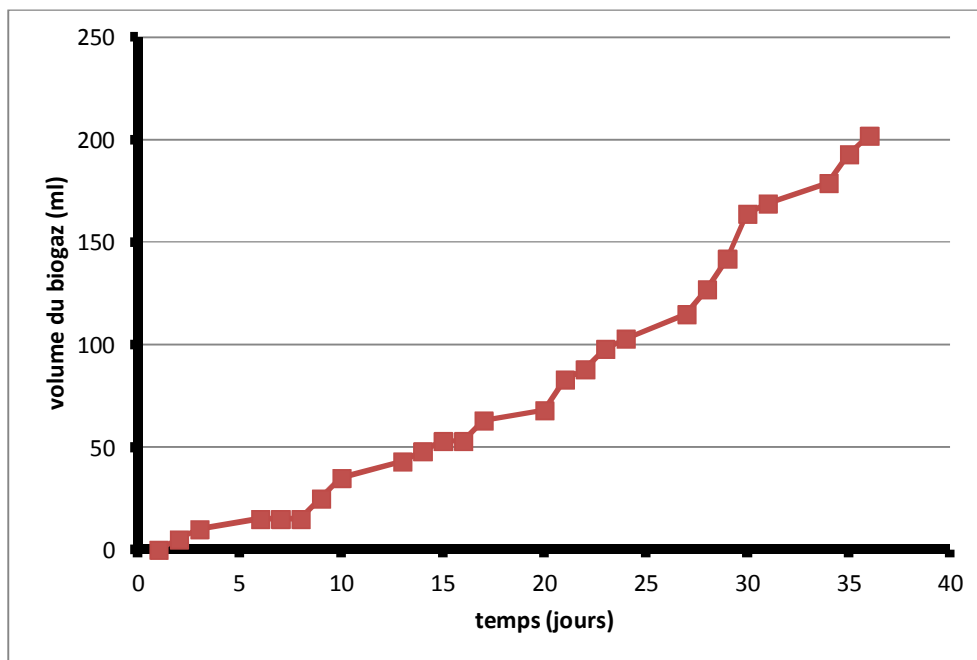


Figure IV.16 : la production cumulée du biogaz dans le digesteur (I)

IV.2.5.5 La production cumulée du biogaz dans le digesteur (II) :

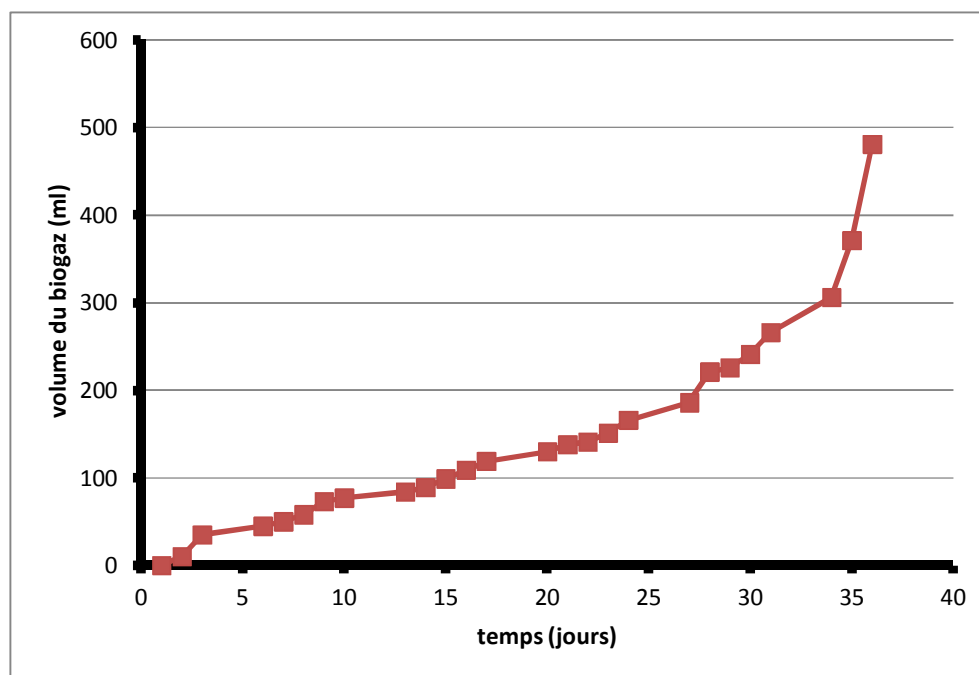


Figure IV.17 : la production cumulée du biogaz dans le digesteur (II)

IV.2.5.6 La production cumulée du biogaz dans le digesteur (III) :

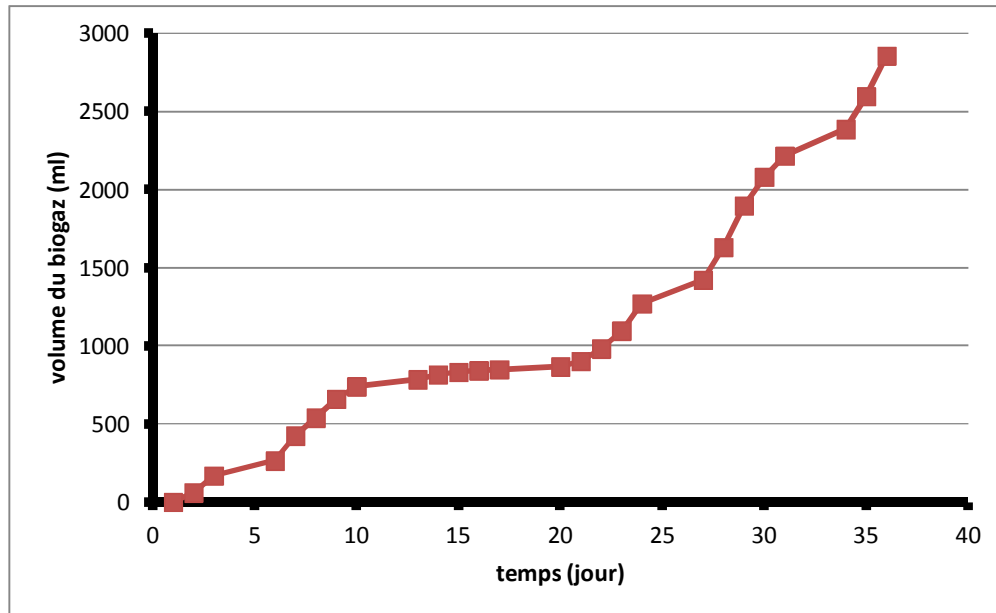


Figure IV.18 : la production cumulée du biogaz dans le digesteur (III)

Une production du volume du biogaz obtenu qui est présenté dans les graphes (IV.13, IV.14 et IV.15), nous incite à marquer des pics de production dans la 2^{ème} et la 4^{ème} semaine.

On remarque également que dans le digesteur (III) présente une production importante vis à vis du digesteur (I). Ceci peut être justifiée par le rétrécissement de la phase acidogénèse.

Dans le digesteur (II), une production améliorée est remarquée, chose qui justifié la fixation de la température favorable biologiquement.

IV.2.6 L'inflammabilité du biogaz :

C'est vrai que la production du biogaz est l'objectif principal de la méthanisation, mais la qualité de ce biogaz joue aussi un rôle très important pour la valorisation de ce biogaz, plus tard.

Dans notre étude, la détermination de la qualité du biogaz produit est faite de manière traditionnelle, le gaz est tout simplement enflammé. Si le biogaz est inflammable ça veut dire que le biogaz est arrivé aux limites d'inflammabilité qui sont entre 6 et 18 pour un biogaz de 70% de CH₄ [2].

| Temps | L'inflammabilité du biogaz | | |
|-------|----------------------------|----------------|-----------------|
| | Digesteur (I) | Digesteur (II) | Digesteur (III) |
| 1 | / | / | / |
| 2 | / | Négative | Négative |
| 3 | / | Négative | Négative |
| 6 | / | / | Négative |
| 7 | / | / | Négative |
| 8 | / | / | Négative |
| 9 | / | Négative | Négative |
| 10 | / | Négative | Négative |
| 13 | / | Négative | Négative |
| 14 | / | / | Négative |
| 15 | / | / | Négative |
| 16 | / | / | Négative |
| 17 | Négative | Négative | / |
| 20 | / | Négative | Négative |
| 21 | Négative | / | Négative |
| 22 | / | / | Négative |
| 23 | Négative | Négative | Négative |
| 24 | / | Négative | Négative |
| 27 | Négative | Négative | Positif |
| 28 | Négative | Négative | Positif |
| 29 | Négative | / | Positif |
| 30 | Négative | Négative | Négative |
| 31 | / | Positif | Positif |
| 34 | / | Positif | Positif |
| 35 | Négative | Positif | Positif |
| 36 | Négative | Positif | Positif |

Tableau IV.2 : le suivi d'inflammabilité du biogaz

Discussion :

D'après les résultats que nous avons obtenus expérimentalement, nous permettent de constater les points suivants :

L'évolution du pH était un paramètre déterminant afin de suivre les différentes étapes de biométhanisation.

Ceci est remarqué depuis son évolution dans le substrat (I) jusqu'au dernier ; en fait, la phase d'acidogénèse est représentée par un pH assez bas durant une durée relativement longue pour les deux premiers cas.

L'ajustement volontaire du pH dont le but de réduire cette phase et de déclencher la phase suivante est bien indiqué dans la figure (IV.3)

Un pH relativement stabilisé a été remarqué dans les trois cas (au voisinage de 7) ; cette constatation nous indique un fonctionnement stabilisé des micro-organismes, ce qui nous incite à la caractériser par une phase (dernière phase).

Le début de la production des AGV et leurs accumulations dans le milieu provoque une acidification, c'est-à-dire l'évolution du pH vers des valeurs acides et aussi une production du biogaz presque nulle.

Dans une deuxième phase, on peut remarquer une augmentation puis une diminution de la concentration des AGV, c'est-à-dire leurs productions par les bactéries hydrolytiques et acidogènes d'une part, et leur consommations par les autres bactéries acidogènes et méthanogènes d'autre part, ce qui influe sur les valeurs de pH. La production du biogaz dans cette phase est importante.

La détermination de rapport AGV/TAC pour les trois cas et qui est présenté dans les figures (IV.10, IV.11 et IV.12), nous permet de juger qu'un fonctionnement assez optimal du processus de biodégradation.

Dans le 3^{ème} cas figure (IV.12), l'amplitude de ce rapport est assez large par rapport aux deux premiers. Ceci peut s'interpréter par l'ajustement discontinu du pH.

Il est aussi important de constater que la production optimale pour les trois cas, ce phénomène est justifié par la réduction de la phase acidogénèse et pousser les réactions suivantes aboutissant à la production du méthane.

Conclusion générales :

L'effet de la température influant au processus de fermentation anaérobie apparaît favorable pour l'amélioration de la production.

Nous pouvons conclure enfin que le substrat utilisé peut devenir énergétiquement intéressant si on l'additionne à des produits alcalins.

D'après cette étude expérimentale nous pouvons conclure que les déchets utilisés mélangés à des ordures ménagères issus d'une décharge urbaine peuvent être utilisés comme une matière première pour un projet industriel de la production de biométhane.

Bibliographie

- [1] R.D Schmid, -Biotechnologie et de génie génétiqueø Edition Flammarion Médecine - Science, 2005, 172p.
- [2]B.D La Farge,øLe Biogaz, Procédé de fermentation méthaniqueø Edition Masson, 1995,237p.
- [3]René Molleta,øLa méthanisationø Edition Tec & Doc, 2009, pp3-4.
- [4]J.L Bobine, E. Huffer et H. Nifenecker,øL'énergie de demain : «technique environnement économie», édition EDP Sciences, 2005, pp304-305.
- [5]A. Damien,øGuide Du traitement des déchetsø 4^{ème} Edition, Dunod, 2006,520 p.
- [6]Uwe Gorisch,øLa Production de Biogazø Edition Eugen Ulmer, 2008,p21.
- [7]D. Kherbouche,øValorisation énergétique de la biomasse : Production et Purification du biogaz obtenu à partir de la méthanisation sur sites algériensø Thèse de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2005.
- [8]U. Marchaim, -Les Procédés de production de biogaz pour le développement de technologies durables (bulletin des services agricoles de la FAO N° 95)ø FAO,1994,221.
- [9]T. chaslerie, -Techniques de bioconversion ; La bio-méthanisationø Rapport, IUT, 2002.
- [10]A, Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy et J. Perrier,øLa Conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologiesø Edition Tec & Doc, 1980, pp. 213-215.
- [11]A. Damien,øGuide du traitement des déchetsø 3^{ème} Edition, Dunod, 2004, 448 p.
- [12]G. Bertolini,øEconomie des déchetsø Edition Technip, 2005 pp.61-63.
- [13]A.Touzi, S. Igoud, S. Kehal, I. Tou, M. Bennouna et M. Slaim, -Installation d'unité de production de biogaz à partir des déchets animaux : impact sur le développement de l'agriculture de montagneø Troisième Journées Scientifiques de l'INRAA, Bejaia, 2011.
- [14]A. Serine,øEtude des prétraitements microbiologiques des résidus agro-alimentaires lignocellulosiques en vue de leur valorisation en alimentation animaleø Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [15]A. Sow,øContribution à la conduite de la méthanisation dans des bioréacteurs a filmmix fonctionnant à forts taux de chargeø Thèse de Doctorat, Ecole Centrale, Paris, 1990.
- [16]C. Berthe,øEtude de la matière organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilésø Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Limoges, 2006.
- [17]M.S Rodriguez Susa, -Etude d'un Bioréacteur Anaérobie à membranes Immergées pour le traitement des eaux résiduairesø Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences.

Annexes

Annexes

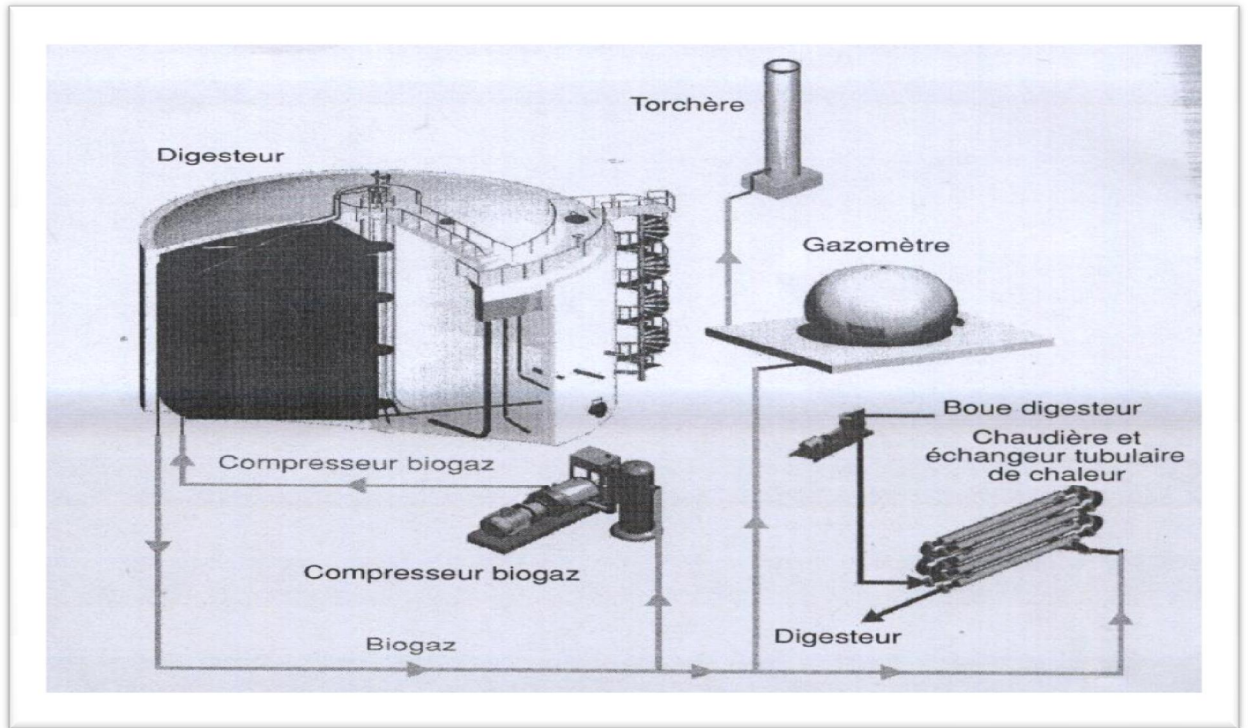
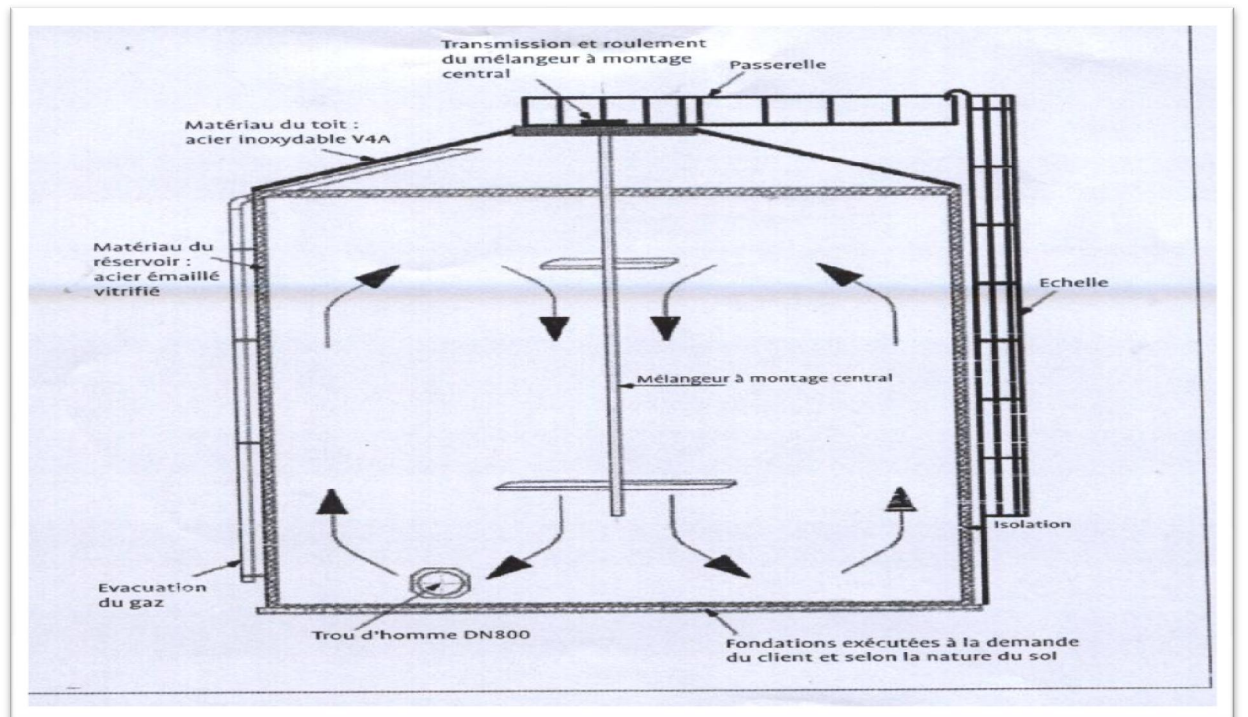
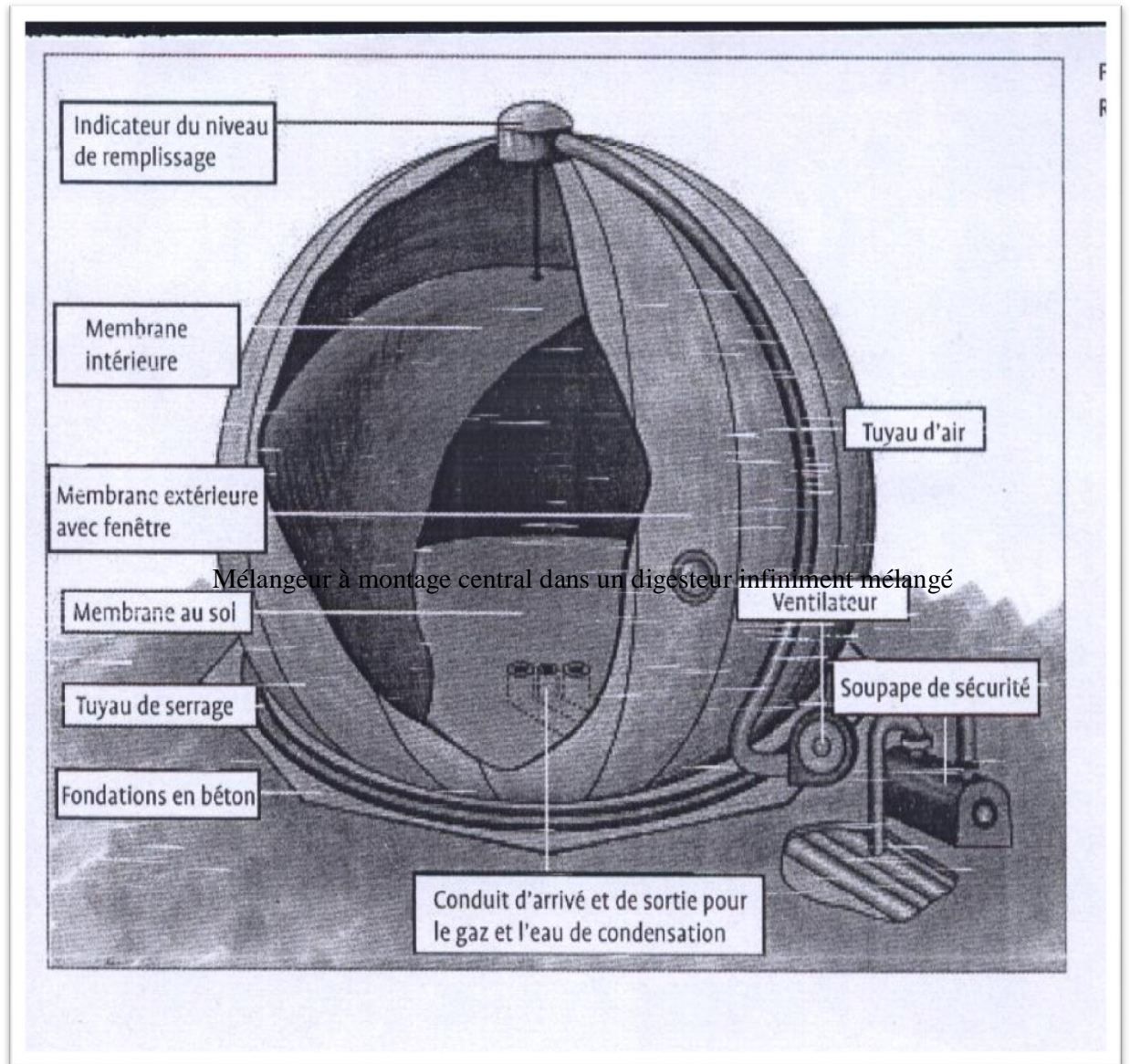
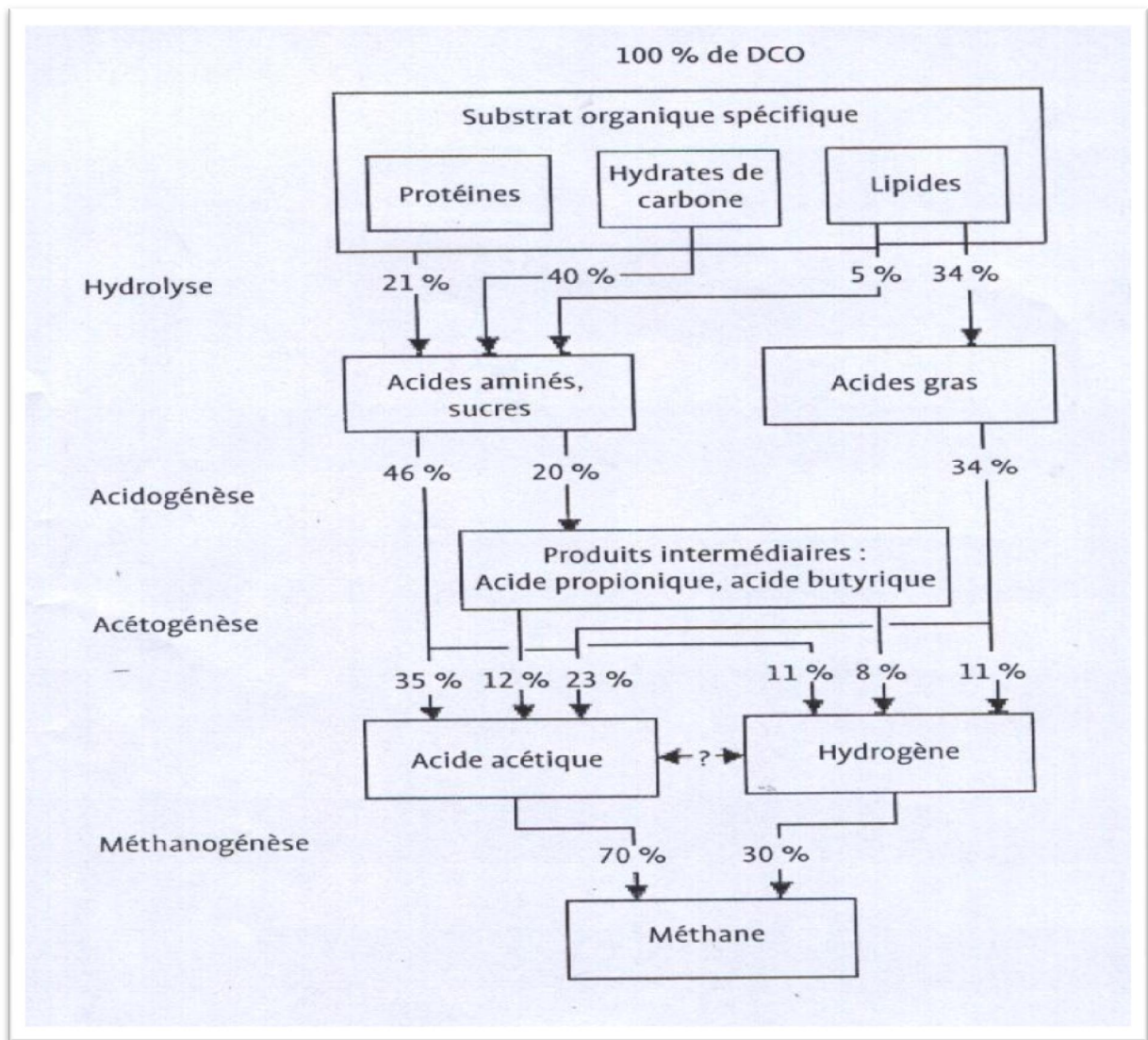


Schéma simplifié du circuit de brassage au biogaz et de chauffage des digesteurs (Mémento Degrémont, 2005)





Réservoir à Gaz



Les quatre étapes du processus de génération de biogaz

| Composants | Gaz brut | Objectif du traitement pour le biométhane* |
|------------------|---|--|
| CH ₄ | 50-75 % vol. | compris entre 94 % et 97 % du volume pour une injection dans le réseau (hypothétique pour l'instant en France) 96 % vol. dans le cas d'un carburant |
| CO ₂ | 25-30 % vol. | complète la part de CH ₄ |
| H ₂ S | 0-5 000 ppmv | ≤ 3 ppmV (≤ 5 mg/m ³) |
| NH ₃ | 0-500 ppmV | libre techniquement |
| Vapeur d'eau | 1-5 % vol. | déchet de condensation selon les températures et pressions |
| Poussière | > 5 µm | pour injection, techniquement libre pour le carburant < 1 µm |
| Siloxanes | 0-50 mg/m ³ | techniquement libre |
| CH ₄ | Composants combustibles du biogaz | |
| CO ₂ | <ul style="list-style-type: none"> - réduit le pouvoir calorifique - améliore l'indice de méthane et donc moins de cliquetis des moteurs - provoque la corrosion (acide carboxylique faible) si le gaz est également humide - dommageable pour la pile à combustible alcaline | |
| H ₂ S | <ul style="list-style-type: none"> - corrosif dans les équipements et les conduits (fissuration par corrosion sous tension) - émissions de SO₂ après combustion et émissions de SO₂ après combustion incomplète - empoisonnement des catalyseurs | |
| NH ₃ | <ul style="list-style-type: none"> - émission de NOx après combustion - dommageable pour les piles à combustible - accroît le cliquetis des moteurs | |
| Vapeur d'eau | <ul style="list-style-type: none"> - contribue à la corrosion dans les équipements et les conduits - le condensat endommage les instruments et les équipements - danger de gel des conduits et des injecteurs | |
| Poussière | <ul style="list-style-type: none"> - colmate les injecteurs et endommage les piles à combustible | |
| Siloxanes | <ul style="list-style-type: none"> - forment un quartz agissant comme un abrasif et endommagent les moteurs | |

* Données indicatives dépendant des conditions particulières à chaque cas.

Exigences du traitement du biogaz pour la génération d'un gaz similaire au gaz naturel.

Résumé:

Ce travail porte sur l'étude de la méthanisation des déchets d'origine organique dont le but est de les valoriser (déchets) sous forme de biogaz.

Le substrat utilisé soumis aux conditions ajustées et indépendantes l'un de l'autre.

Les digesteurs utilisés sont alimentés par des déchets d'abattoir principalement.

Notre étude expérimentale met en évidence trois modes opératoires :

- Dans la première, on a étudié une simple digestion anaérobie mise en conditions naturelles (température, pH).
- Dans la deuxième, et afin d'étudier l'effet de température, le digesteur plongé dans un bain marie pour atteindre une température fixe de 37°C.
- Pour la troisième partie, le paramètre de pH était ajusté en ajoutant une solution basique de bicarbonate de sodium en parallèle avec un ajustement de température dans le même intervalle de la deuxième expérience (37°C).

Les valeurs des paramètres de stabilité tels que le pH, les AGV, l'alcalinité. Indiquent qu'il y a un bon déroulement du processus. Un volume de 200 ml était récupéré de la première partie, d'autre part un volume de 480 ml était récupéré dans la deuxième, à cause de la fixation de température dans l'intervalle de préférence de digestion, alors qu'un volume de 2800 ml était récupérable dans la troisième à cause de l'influence de pH et température.

Mots clés : Déchets Organiques, Digestion Anaérobie, Biogaz, Bio-Méthane, Digesteurs.

المخلص:

- أجري هذا العمل لهدف دراسة عملية التحلل اللاهوائي للفضلات من أصل عضوي في ظروف عمل ثابتة و معزولة من أجل ترميمها على شكل غاز حيوي.

- المادة التي استعملت من أجل تغذية الهاضمات و تتكون من فضلات المذبح و هذا العمل يحتوي على ثلاثة أقسام:

* في القسم الأول تمت دراسة عملية عادية للتحلل اللاهوائي في شروط درجة حموضة و حرارة عاديتين.

* في القسم الثاني و من أجل دراسة تأثير درجة الحرارة غمر الهاضم في حمام مائي بدرجة حرارة 37°.

* في القسم الثالث عامل درجة الحموضة تم عزله عن طرق إضاعة محلول ذو طبيعة قاعدية و هو بركونات الصوديوم توازياً مع تثبيت درجة حرارة الهاضم في نفس درجة حرارة الهاضم الثاني و هي 37°.

- قسم عوامل الاستقرار من درجة الحموضة و الأحماض الدسمة المتطايرة و القلوية و غيرها من العوامل تشير إلى أن هناك سيراً حسناً لهذه العملية ، حيث كان حجم الغاز المسترجع من الهاضم الأول حوالي 200 مل و الهاضم الثاني 580 مل نتيجة الحرارة المثالية و أما الهاضم الثالث فقد كان حجم الغاز الحيوي المسترجع 2800 مل نتيجة تأثير درجة الحرارة و الحموضة المثلى.

كلمات مفتاحية : الفضلات العضوية ، التحلل اللاهوائي ، الغاز العضوي ، الميثان الحيوي ، الهاضمات.

