

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux

Sujet : Bilan de conception et dimensionnement d'un biodigesteur en briques de ciment pour une vulgarisation chez les populations

Présenté par

Omar Kata **FAYE**

Sous la direction de

Dr Lat Grand **NDIAYE**

Soutenu publiquement le **25 mars 2017** devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Établissement
Diouma KOBOR	Maître de conférences	Président de jury	UASZ/ST
Abdoulaye GASSAMA	Maître de conférences	Rapporteur	UASZ/ST
Diouma NDOUR	Maître de conférences	Examineur	UASZ/SES
Samo DIATTA	Maître-Assistant	Examineur	UASZ/ST
Moustapha THIAME	Maître-Assistant	Examineur	UASZ/ST
Lat Grand NDIAYE	Maître-Assistant	Directeur de mémoire	UASZ/ST

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A ma mère,

A ma grande sœur,

A toute ma famille,

A mon directeur de mémoire.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de mémoire Dr Lat Grand NDIAYE Enseignant-chercheur au Département de Physique à l'UASZ, pour m'avoir initié ce sujet de recherche, de m'avoir dirigé en me faisant profiter de sa compétence par ses discussions critiques, sa contribution, ses encouragements et ses conseils assez utiles et fructueux, qu'il n'a pas hésité à m'accorder.

Je remercie aussi Dr Diouma KOBOR pour avoir accepté de présider le jury de mémoire de ma soutenance.

Mes remerciements vont aussi à l'égard du Dr Abdoulaye GASSAMA pour avoir consenti de rapporter mon mémoire.

Je remercie très sincèrement Dr Diouma NDOUR, Dr Samo DIATTA et Dr Moustapha THIAME pour leur disponibilité et d'avoir accepté d'examiner mon travail de mémoire.

Je remercie également les autres professeurs de la filière MPCII et de tous les enseignants de l'UASZ.

Je tiens également à remercier aussi tous les doctorants du Département de Physique, pour les prés soutenances qu'ils nous accordaient et Mr Dioncounda YOCC, technicien de laboratoire au Département Physique.

Je tiens aussi à remercier tous mes camarades de promotion pour les échanges fructueux durant la formation et en particulier pour les travaux d'équipe, tel que Abraham SAMBOU, Abdourahmane DIALLO et Moussa CAMARRA. Par leurs conseils et leurs aides ont contribué au bon déroulement de mon travail.

Je ne saurais terminer sans remercier par la grâce du Dominateur Interne Externe et Unique (DIEU) mes parents pour leur soutien inconditionnel, je m'adresse particulièrement à ma maman Odette BASSENE, à ma sœur Bousso FAYE et son mari Dr Sékou GUEYE ainsi que toute ma famille qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de mes études.

Résumé

L'objet de notre sujet « bilan de conception et dimensionnement d'un biodigesteur en briques de ciment pour une vulgarisation chez les populations », porte sur une analyse technico-économique et permettra de vérifier l'intérêt pour les familles de produire leur propre biogaz. Un ménage de 4 membres a été retenu comme échantillon pour cette étude de dimensionnement. Des analyses tirées de la littérature ont permis d'appréhender davantage le processus de la méthanisation. Après avoir évalué les besoins en biogaz du ménage échantillon, le modèle mathématique de Hashimoto nous a permis de dimensionner un gazomètre de $1,22m^3$ de volume. Le volume utile du digesteur a été dimensionné à $2,717m^3$ pour une quantité de substrat nécessaire pour son alimentation au quotidien de 35 kg, un volume total de $4m^3$, pour des conditions expérimentales de température de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ et le temps de rétention hydraulique (TRH) 40 jours et un ratio de mélange substrat – eau de 1:1.

Ce travail nous a ainsi permis de dimensionner différents types de digesteurs de taille allant de 4 à $18\text{ }m^3$ pour une meilleure comparaison avec les données du PNB (Programme National de Biogaz) basées sur un modèle empirique.

Aussi, pour la partie expérimentale, nous disposons d'un biodigesteur de $10\text{ }m^3$ capable de venir à bout des besoins d'une famille de 11 personnes qui sera mis à contribution pour faire un bilan et aussi valider le modèle utilisé.

Après avoir listé les différentes dépenses effectuées pour les matériaux et matériels ayant servi à la construction du digesteur de $10\text{ }m^3$, nous avons obtenu pour les dépenses de matériels et matériaux une somme de 339 800 Fcfa et une somme de 399 732 Fcfa pour la main d'œuvre des ouvriers.

En définitive pour la conception d'un biodigesteur de $10\text{ }m^3$ de volume total, capable de satisfaire les besoins de 11 personnes, il faut dépenser une somme de 739 532 Fcfa pour son acquisition. Par ailleurs, cette famille de 11 personnes peut via le biofertilisant produit par son biodigesteur utilisable pour ses cultures amortir dès la première année d'exploitation son coût d'investissement avec des bénéfices net de 441 908 Fcfa.

Mots clés : Biogaz ; biométhanisation ; digesteur ; bilan ; conception ; dimensionnement ; substrat.

Abstract:

The subject of our subject "Assessment of design and dimensioning of a biodigester in cement bricks for popularization in populations", deals with a technical-economic analysis and will verify the interest for families to produce their own biogas. A household of 4 members was selected as a sample for this design study.

Analyses drawn from the literature have made it possible to better understand the methanization process. After assessing the biogas requirements of the sample household, Hashimoto's mathematical model allowed us to size a gasometer of 1.22 m³ volume. The working volume of the digester was sized at a quantity of substrate necessary for its daily supply of 35 kg, a total volume of 4 m³, for experimental conditions of temperature of 30 ° C. and the hydraulic retention time (TRH) 40 days and a substrate / water mix ratio of 1: 1.

This work allowed us to dimension different types of digesters ranging from 4 to 18 m³ for a better comparison with the data of the National Biogas Program based on an empirical model. For the experimental part, we have a biodigester of 10 m³ able to overcome the needs of a family of 11 people who will be used to make a balance sheet and also validate the model used. After listing the various expenses incurred for the materials and materials used in the construction of the 10 m³ digester, we obtained for materials and materials expenses a sum of 339,800 CFA francs and a sum of 399,732 CFAF for the work of the workers.

Ultimately for the design of a bio digester of 10 m³ of total volume, capable of meeting the needs of 11 people, it is necessary to spend a sum of 739 532 Fcfa for its acquisition. Moreover, this family of 11 people can, via the bio fertilizer produced by its biodigester that can be used for its crops, amortize its investment cost in the first year of operation with net profits of 441 908 FCFA.

Key words: Biogas; bio methanation; digester; balance sheet; design; sizing; substratum.

Sommaire

Chapitre 1 : Étude bibliographique	3
Introduction	4
Contexte général	4
1.1 : Les boues	5
1.1.1 Les boues primaires	5
1.1.2 : Les boues secondaires(ou boues activées)	5
1.1.3 : Les boues mixtes	5
1.1.4 : Les boues physico-chimiques	5
1.2 : Les déchets	5
1.2.1 : Déchets urbains	5
1.2.2 : Déchets industriels	5
1.2.3 : Déchets agricoles	6
1.3 : Procédés de traitement des boues et des déchets	6
1.3.1 : Procédé de digestion anaérobie des boues	6
• Historique de la digestion anaérobie	6
1.3.2 : Principes généraux de la digestion anaérobie	7
1.3.3 : Les différentes étapes de la digestion anaérobie	8
1.4 : Conditions physico-chimiques nécessaires à la digestion anaérobie	11
1.5 : Les facteurs affectant la stabilité du processus de biogaz	12
1.6 : Avantages et inconvénients de la digestion anaérobie	14
Conclusion	14
Chapitre 2 : Dimensionnement du biodigesteur	15
Introduction	16
2.1 : Présentation des différentes voies de méthanisation	16
2.1 : La biomasse	17
2.2 : Paramètres opérationnels du digesteur	19
2.2.1 : Charge organique	19
2.2.2 : Température	19
2.2.3 : Paramètre opérationnel : temps de séjours hydraulique (TRH)	20
2.2.4 : Le pH	21
2.2.5 : Le rapport carbone/azote (C/N)	22
2.2.6 : L'agitation	23
2.2.7 : L'humidité	23
2.3 : Dimensionnement du digesteur	23

2.3.1 : Equation de dimensionnement du gazomètre.....	23
2.3.2 Equation de dimensionnement du réservoir	24
2.3.3 : Evaluation des besoins en biogaz et dimensionnement du digesteur correspondant..	25
Vérification et validation de l'équation de dimensionnement	25
2.3.4 : Evaluation des besoins d'un ménage	29
Conclusion.....	32
Chapitre 3 : Bilan de conception d'un biodigesteur en briques de ciment.....	33
Introduction	34
3.1 : Choix du site et de l'emplacement	34
3.1.1 : Choix du site	34
3.1.2 : Choix de l'emplacement	34
3.2 : Guide de conception d'un digesteur	34
3.2.1 : Matériels et matériaux pour un biodigesteur	36
3.2.1.1 : Les équipements périphériques.....	36
3.2.1.2 : Les équipements d'utilisation du biogaz.....	38
3.3 : Bilan de la conception ou évaluation du coût d'un biodigesteur de 10 m ³	39
Conclusion.....	46

Abréviations

TSH :	Temps de Rétention Hydraulique (j)
AGV :	Acides Gras Volatils (mg DCO/l)
ATEE :	Association Technique Energie Environnement
ADEME :	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AGLC :	Acide gras à long chaîne (mg DCO /l)
CSTR :	Réacteur complètement agité
OHPA :	Obligé l'hydrogène en produire l'acétate
ΔG^0 :	Enthalpie libre (kJ)
DCO :	Demande Chimique en Oxygène (mg/l)
AGLC :	Acide Gras à Longue Chaîne (mg DCO /l)
CSTR :	Réacteur Complètement agité
MO :	Matière Organique (g/l)
P_v :	Production volumique ($m^3/m^3 \cdot j$)
S :	Charge volumique (kg/m^3)
B_o :	Potentiel de production de méthane ($m^3/kgMO$)
K :	Constante d'inhibition
μ_m :	Coefficient cinétique (j^{-1})
T :	Température ($^{\circ}C$)
V :	Volume utile du fermenteur (m^3)
G :	volume de Biogaz produit par jour (m^3/j)
V_D :	Volume total du digesteur (m^3)
Q :	Débit volumique (m^3/j)
ρ_e :	Masse volumique de l'eau ($\frac{kg}{m^3}$)
C :	Constante de la matière organique dans le substrat (%)

Liste des figures

Figure 1. 1: Une vue générale d'un type de digesteur chinois produisant du biogaz pour la cuisson et l'éclairage [2].....	7
Figure 1. 2: Etapes de la digestion anaérobie [3].....	8
Figure 2. 1: Schéma du fonctionnement type d'une installation de méthanisation (ATEE)...	16
Figure 2. 2: Potentiels de production de méthane en fonction des matières brutes (fiche ADEME, 2006).....	18
Figure 2. 3 : Evolution de la température du digesteur en fonction des jours.....	20
Figure 2. 4: Evolution de la production du biogaz pour diverses températures en fonction du temps de rétention hydraulique [8].....	21
Figure 2. 5: Plage de neutralité ou optimum du pH [9].....	21
Figure 2. 6: Autre représentation de la plage de neutralité [10].....	22
Figure 2. 7: Représentation du pH des bouses de vaches en fonction des jours	22
Figure 2. 8: Détermination graphique du volume de biogaz produit par kg de bouse fraîche de vache [15].....	27
Figure 2. 9: Configuration d'un digesteur de 8m ³ de volume total	29
Figure 2. 10: Chronogramme d'utilisation des appareils	30
Figure 3. 1: Photo de la conception d'un bio digesteur	35
Figure 3. 2: Schéma récapitulatif de conduites de biogaz et accessoires	36
Figure 3. 3: Schéma d'un piège à eau	37
Figure 3. 4: Les types de manomètres.....	37
Figure 3. 5: Brûleur a biogaz fabriqué localement.....	38
Figure 3. 6: Les types de lampes à biogaz	39
Figure 3. 7: Le méthane comparé aux autres sources d'énergies: selon l'ABC de la méthanisation agricole	46

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Exemples de la fermentation du glucose [5]	9
Tableau 1. 2: Réactions reliées aux méthanogènes [2].....	11
Tableau 2. 1 : Production de biogaz selon les matières entrants (EDEN, 2007).....	17
Tableau 2. 2: Température d'opération pour chaque type de digesteurs selon les auteurs[7].	20
Tableau 2. 3: Définitions et unités des paramètres utilisés dans les équations [14].....	24
Tableau 2. 4: Dimensionnement de quelques digesteurs à partir de nos mesures expérimentales	32
Tableau 2. 5: Etude comparative de nos résultats avec celui du PNB.....	32
Tableau 3. 1: Bilan des matériaux de construction et du matériel	40
Tableau 3. 2: Budget des mains d'œuvre	40
Tableau 3. 3: Budget total de l'installation y compris la maintenance	41

Tableau 3. 4: Investissement pour un biodigesteur de 10m ³ en brique de ciment	42
Tableau 3. 5: Investissement pour un biodigesteur en briques de ciment de 10 m ³ avec achat de 8 vaches	42
Tableau 3. 6: Investissement pour un biodigesteur en briques d'argile cuite de 10m ³ (sans achat de vaches)	43
Tableau 3. 7: Investissement pour un biodigesteur en briques d'argile cuite de 10 m ³ (avec achat de 8 vaches).....	43
Tableau 3. 8: Coût d'investissement et revenus sur l'agriculture en maraichage des sols fertilisés	44
Tableau 3. 9: Tableau récapitulatif des dépenses de conception et des revenus agricoles autour du biodigesteur.....	44
Tableau 3. 10: Enquête sur la consommation des énergies fossiles pour la famille de 11 membres.....	45

Introduction générale

Face à l'épuisement programmé des ressources énergétiques d'origine fossiles et compte tenu du contexte actuel de lutte contre les changements climatiques, les énergies renouvelables représentent un enjeu de plus en plus croissant. De toutes ces énergies, celles résultant de la bio-méthanisation de la biomasse procurent désormais une opportunité dans le monde des agriculteurs et des éleveurs, où le traitement des sous-produits agro-pastoraux par digestion anaérobie fait l'objet d'un regain d'intérêt depuis quelques années, et ceci grâce notamment à la production d'énergie issue du biogaz sans oublier la production des fertilisants à partir des effluents expulsés des digesteurs. Cette méthode de transformation offre de nombreux intérêts environnementaux, sociaux, agricoles et économiques. En effet, le biogaz obtenu à partir de la matière organique permet ainsi entre autre, de cuisiner, d'éclairer des maisons, de produire de l'électricité ou de la chaleur renouvelables. Ce mode de valorisation des sous-produits et des déjections animales, principalement de ces dernières, réduit les impacts environnementaux négatifs au niveau des exploitations agro-pastorales en amoindrissant les odeurs et les émissions des gaz à effet de serre. Par ailleurs, la réduction du recours aux engrais chimiques et la production de cette forme d'énergie est une source de revenus pour l'agriculteur et l'éleveur. Pour toutes ces raisons, le développement de solutions permettant de diversifier l'offre énergétique adaptée au contexte local et à la portée des populations est urgent. Les installations de biogaz domestique constituent une opportunité pour améliorer les conditions de vie des familles les plus pauvres, tout en préservant l'environnement.

Ainsi pour ce faire, notre étude permettra de dresser le bilan de conception et effectuer le dimensionnement d'un biodigester en briques de ciment pour une meilleure vulgarisation auprès des populations.

Le manuscrit de mémoire se base sur des articles scientifiques et des mesures expérimentales effectuées sur le site de l'université. Afin de rendre la lecture plus facile, le manuscrit débute d'abord par un résumé et une partie introductive et est divisé en trois chapitres et dans chaque chapitre possède une mise en page quasi-identique et rappelle le contexte du chapitre concerné. Le chapitre 1 constitue une synthèse bibliographique, rappelant le principe de la digestion anaérobie, ainsi que l'origine et la composition des bouses et boues. Ce chapitre dresse aussi une présentation du modèle de digestion utilisé et une synthèse des méthodes.

Le chapitre 2 présente le dimensionnement du réacteur qui est fonction du procédé de fermentation employé dont les éléments de base du dimensionnement sont : la charge organique, le temps de séjour hydraulique (TRH), la Température. Par ailleurs ce chapitre présente les équations issues du modèle mathématique de Hashimoto ayant permis la détermination du volume du gazomètre (dôme), du volume utile (volume d'stockage), du ratio (matière organique eau), l'évaluation des besoins en biogaz des ménages pour enfin donner le volume total du digester correspondant suivi d'exemples. Le chapitre 3 s'intéresse au bilan de la conception de notre bio-digester. La performance, la résistance, la fiabilité, la durée de vie d'une unité de bio-méthanisation dépendent principalement des matériaux et matériels de conception convenable, après avoir présenté les conditions nécessaires pour l'installation de notre bio digester suivie d'une présentation des matériaux et matériels de l'installation, nous avons listé sur des tableaux les différentes dépenses effectuées, le coût des matériels et matériaux utilisés pour l'installation de notre bio-digester. L'ensemble du manuscrit se termine par une conclusion générale et des perspectives suivies de références bibliographiques.

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Introduction

La crise énergétique des années 70 a fait apparaître combien il est urgent de trouver de nouvelles sources d'énergie, et un plus grand degré d'autonomie dans le domaine énergétique. Plusieurs pays ont pris conscience des problèmes de fond de la situation énergétique et ont progressivement mis en œuvre des politiques visant à mieux utiliser l'énergie et à recourir à toutes les sources d'énergies susceptibles de se substituer au pétrole. Parmi ces sources, la technologie du biogaz est apparue comme l'une des plus intéressantes, parce qu'elle est en principe renouvelable, non polluante et peut s'appliquer aussi bien dans l'exploitation agricole que dans l'industrie agro-alimentaire ou encore dans les décharges municipales. Depuis lors, un nombre considérable d'installations de biogaz de différents types et de différentes tailles a été construit un peu partout dans le monde.

Contexte général

La digestion anaérobie ou méthanisation est un processus de dégradation de la matière organique, réalisé par la syntrophie d'un système microbien complexe en l'absence d'oxygène. Une large variété de substrats organiques peut être convertie sous forme de méthane, (CH_4) et de dioxyde de carbone, (CO_2). C'est un mécanisme naturel se produisant dans des milieux tels que le système gastro-intestinal des animaux pluricellulaires, les zones humides et marécageuses, les sources hydrothermales et les sources chaudes en région volcanique.

La découverte de la méthanisation remonte à 1776 lorsque Alessandro Volta durant une de ses promenades observa que du gaz se libérait d'un marais. Après avoir étudié ce phénomène et fait plusieurs expériences, il mit en évidence que le "gaz des marais" était inflammable. Un peu plus tard (1787), Antoine Laurent Lavoisier lui donne le nom de "gaz hydrogenium carbonatrum" mais le terme de "méthane" fut proposé en 1865 et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique. Pendant ce temps, la présence de ce gaz est mise en évidence dans d'autres milieux (dont le fumier) et son origine est attribuée à l'activité microbienne. Au début du XX^{ème} siècle, la première installation aérobique produisant du méthane voit le jour à Exeter en Grande-Bretagne, elle permet l'éclairage des rues de la ville. Dans les années 1920, l'allemand Karl Imhoff met au point un système de digestion continu, qui équipe quelques années plus tard plusieurs villes allemandes. Les premiers systèmes fonctionnels discontinus de bio méthanisation ont été développés en Algérie dès 1939, puis en France par Marcel Isman et Gilbert Du cellier. Durant les années de croissance qui suivirent, ces techniques ont été oubliées avant d'être redécouvertes dans les années soixante-dix, lorsque les chocs pétroliers ont montré la nécessité de rechercher des sources d'énergies alternatives. De nouveaux procédés ont vu le jour tels que les systèmes semi-continus, avec ou sans fixation de biomasse qui permettent la méthanisation de substrats divers : effluents industriels dont la charge polluante est élevée, boues d'épuration, déchets ménagers et lisiers.

Ainsi, le procédé de méthanisation appliqué aux boues d'épuration comme procédé de dépollution présente des intérêts majeurs qui sont :

- un degré de réduction intéressant de la matière organique est atteint à partir d'une faible augmentation de la biomasse anaérobie contrairement aux procédés de digestion ;
- la production du biogaz peut être utilisée comme sources d'énergies renouvelables pour générer trois types d'énergie (chaleur, électricité ou biocarburant) ;
- de faibles impacts environnementaux (stabilisation de la matière organique, réduction des nuisances olfactives, réduction des émissions de gaz à effet de serre). A l'échelle industrielle, la digestion anaérobie des boues d'épuration est réalisée à un taux de matières sèches d'environ

5 %, ce qui nécessite une étape préalable d'épaississement. Ainsi, le type de réacteur infiniment mélangé s'est imposé comme l'unique technologie pour traiter ce déchet. Le produit est continuellement brassé dans le digesteur avec en général, une recirculation du biogaz [1].

Les différents types de déchets utilisables sont donnés ci-contre.

1.1 : Les boues

Les boues des stations d'épuration sont classées en quatre grands groupes [2].

1.1.1 Les boues primaires

Elles sont issues du traitement primaire et sont produites par simple décantation, en tête de station d'épuration. Ces boues sont fraîches, c'est-à-dire non stabilisées (forte teneur en matière organique) et fortement fermentescibles. De par la nature des nouvelles installations, elles tendent à disparaître.

1.1.2 : Les boues secondaires(ou boues activées)

Elles sont issues du traitement secondaire. Elles sont essentiellement composées de biomasse présente en excès dans le système et par la matière réfractaire à l'épuration biologique. Elles sont récupérées après le décanteur secondaire (clarificateur). Ce sont des boues fraîches biologiques, essentiellement sous forme de floccs de bactéries. Leur pouvoir fermentescible dépend du temps de séjour dans le système bassin d'aération – décanteur secondaire (aussi appelé âge des boues).

1.1.3 : Les boues mixtes

Le mélange de boues primaires et secondaires conduit à l'obtention des boues mixtes, leur composition est dépendante de la quantité de boues primaires et secondaires produites. Très fermentescibles, ces boues subissent un traitement de stabilisation.

1.1.4 : Les boues physico-chimiques

Ces boues sont issues d'un traitement utilisant des flocculants minéraux (sel de fer ou d'aluminium). Le traitement physico-chimique est principalement utilisé sur des boues industrielles où l'élimination du phosphore est faite en complément au traitement biologique.

1.2 : Les déchets

Les déchets, peuvent être classés selon leurs sources en quatre types.

1.2.1 : Déchets urbains

Dans ce type, on peut distinguer trois composantes principales :

- la fraction directement biodégradable constituée de matières organiques, principalement les déchets ménagers, les cartons et les herbes. Les déchets ménagers constituent une première catégorie de ressources convertibles en énergie par bio méthanisation ; il y a alors récupération du biogaz tout en stabilisant les résidus, ce qui évite des problèmes futurs d'enfouissement ;
- la fraction combustible comprend les matières organiques solides et très lentement biodégradables (copeaux de bois, plastiques et autres matières synthétiques) ;
- la fraction inerte qui inclut les cailloux, le sable et des métaux.

1.2.2 : Déchets industriels

Les effluents industriels sont essentiellement constitués d'eaux résiduelles des procédés de fabrication. Leur traitement anaérobie tend à devenir une technique standard et permet de réduire considérablement la taille et le coût des installations classiques de traitement aérobie. Pour les entreprises dont la production de déchets est importante en fraction organique, la

digestion anaérobie permet une stabilisation et une réduction du volume de déchets à mettre en décharge et la production de sous-produits.

1.2.3 : Déchets agricoles

L'agriculture produit beaucoup de résidus, comme exemple la culture des bananes, du blé, des pommes de cajou, des mangues, olive etc. La digestion anaérobie se présente comme un traitement efficace pour réduire le volume de ces sous-produits et de leur valorisation énergétique. Dans ce cadre, à titre d'exemple, la digestion anaérobie des feuilles de bananiers a un rendement élevé en biogaz alors que leurs troncs ont un rendement un peu plus faible.

1.3 : Procédés de traitement des boues et des déchets

En matière de procédés de traitement des différents types de déchets organiques, il existe plusieurs processus : les procédés thermiques, les procédés physicochimiques, les procédés biologiques et même des systèmes couplés entre les procédés biologiques et les procédés physico-chimiques.

Dans cette étude on s'est intéressé à la valorisation et au traitement par procédés biologiques, et plus spécialement au procédé de la digestion anaérobie en phase mésophile et thermophile. Ce dernier sera présenté avec plus de détails dans la partie qui suit.

1.3.1 : Procédé de digestion anaérobie des boues

- **Historique de la digestion anaérobie**

L'utilisation de la digestion anaérobie pour le traitement des eaux usées et la stabilisation des déchets solides ne sont pas nouvelles du tout; elles sont utilisées depuis le 19^{ème} siècle. Dans les régions rurales de la Chine et de l'Inde, des constructions simples de réacteur (voir figure 1.1) ont été longtemps employées pour traiter les déchets animaux et agricoles dans le but principal de récupérer l'énergie pour faire cuire et allumer. La digestion anaérobie des boues des stations d'épuration, à grande échelle, employant une technologie de pointe a été présentée dans les années 1860 en France. Cependant, ce n'était qu'aux années 70 que le traitement anaérobie a attiré plus d'attention en termes de recherche et développement de technologies. Cet intérêt a augmenté, à la suite de la prise de conscience environnementale accrue de la population. En outre, à la fin des années 80, la co-digestion traite un mélange de différents types de déchets, y compris les déchets d'animaux, les déchets alimentaires et les déchets organiques ménagers, ont été présentés dans plusieurs pays. Aujourd'hui, un nombre important de systèmes technologiques de digestion anaérobie est en service pour le traitement de différents types de substrats et le développement est encore en marche [2].

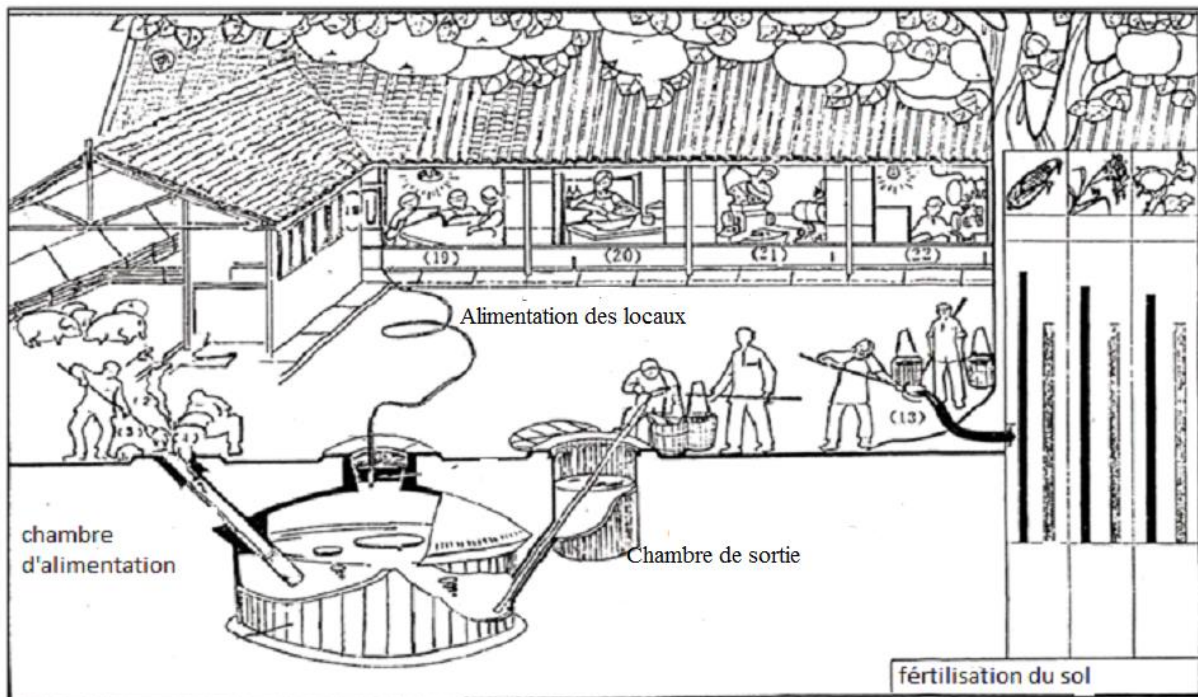


Figure 1. 1: Une vue générale d'un type de digesteur chinois produisant du biogaz pour la cuisson et l'éclairage [2]

1.3.2 : Principes généraux de la digestion anaérobie

Parmi les différentes techniques de stabilisation, la digestion anaérobie, ou méthanisation, est la plus intéressante. En effet, d'après Suh et Roussaux (2002), c'est la filière de traitement, accompagnée d'une valorisation agricole, la moins agressive vis-à-vis de l'environnement. Les micro-organismes anaérobiques utilisent la pollution organique (matières organiques biodégradables) comme substrat pour produire du biogaz qui peut être valorisable selon plusieurs formes.

Ainsi, la digestion anaérobie permet une réduction de la matière sèche d'environ 50 % et la production d'un biogaz, composé principalement de méthane (55-70 %) et de dioxyde de carbone (25-40 %), avec des traces d'hydrogène et de H₂S. Le méthane peut être valorisé sous forme d'énergie (chaudière produisant de la chaleur ou de l'électricité). En même temps les micro-organismes anaérobiques consomment peu d'énergie, ce qui entraîne une production de boues limitée (3 à 20 fois inférieure à un traitement aérobie). En effet, les micro-organismes n'utilisent qu'environ 10 à 15 % de l'énergie du substrat pour leur croissance, le reste étant utilisé pour la production du biogaz. Enfin, la digestion anaérobie permet une réduction des micro-organismes pathogènes. La digestion anaérobie consiste en une fermentation des boues, souvent épaissies, sous condition anaérobie stricte. Elle est composée de quatre étapes : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Pour mener à bien une digestion anaérobie, il est nécessaire d'avoir des vitesses de réactions équilibrées pour ne pas inhiber une des étapes. Le schéma de principe de la digestion anaérobie est présenté sur la figure 1.2.

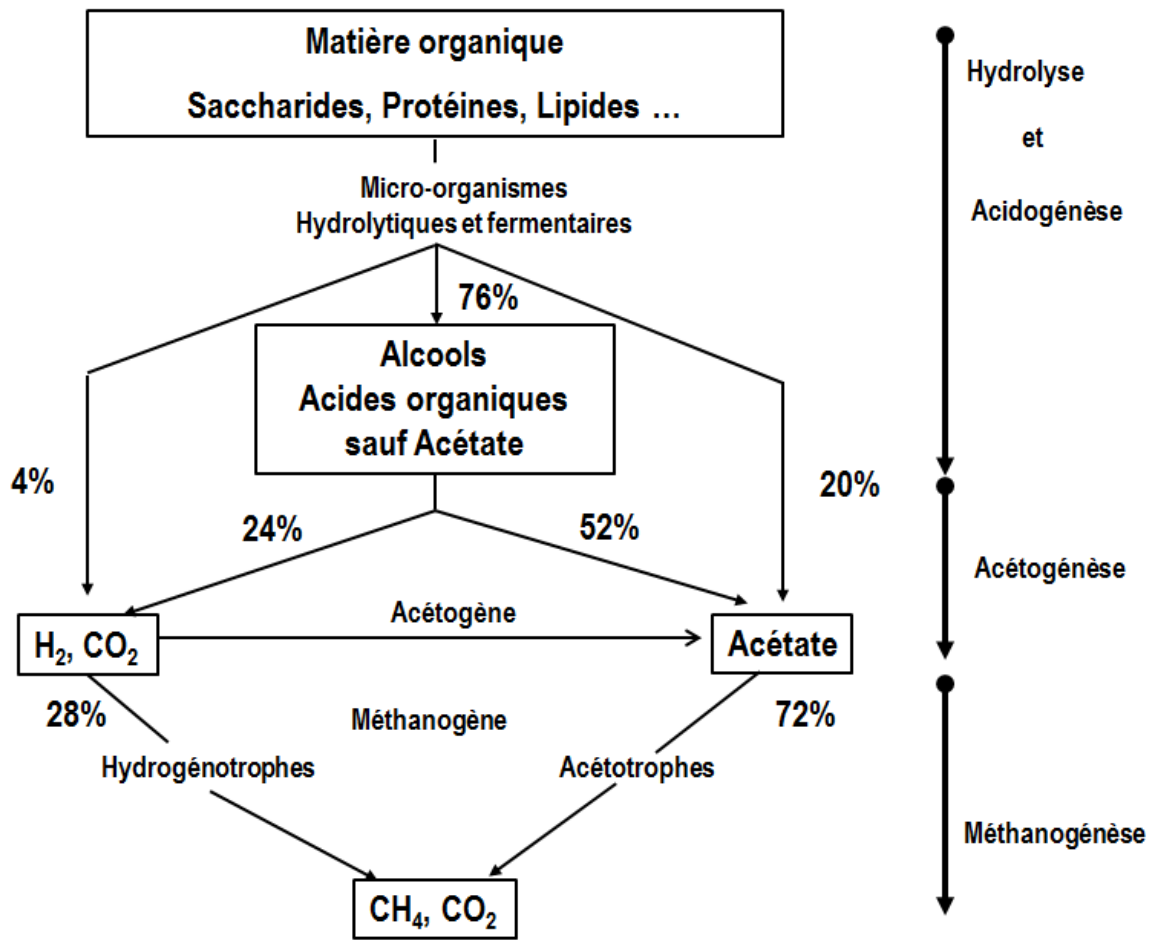


Figure 1. 2: Etapes de la digestion anaérobie [3]

1.3.3 : Les différentes étapes de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie est un procédé biologique, qui sert au traitement et valorisation des déchets organiques. Elle contient généralement quatre étapes selon les auteurs, qui sont l'hydrolyse, l'acidogène, l'acétogène et la méthanogène. Dans le cas de la co-digestion, des déchets solides biodégradables sont ajoutés en tête du procédé. Une étape préliminaire de désintégration du substrat, qui est en générale une étape non biologique et sert à la transformation du substrat complexe en polysaccharides, lipides et protéines est considérée.

○ L'hydrolyse

L'hydrolyse est un processus extracellulaire dans lequel des substances organiques particulières complexes (protéines, polysaccharides, lipides, cellulose,...etc.) sont décomposés en composés simples, solubles (acides aminés, sucres simples, acides gras, glycérol,...etc.). C'est une étape importante avant le procédé de fermentation, car les bactéries fermentatives ne peuvent pas absorber les polymères organiques complexes directement dans leurs cellules. Les enzymes hydrolytiques incluent la cellulase, la cellobiase, le xylanase et l'amylase pour la dégradation des polysaccharides en sucres, la protéase pour la dégradation des protéines en acides aminés, et la lipase pour la dégradation des lipides en glycérol et les acides gras à longue chaîne. Le procédé d'hydrolyse lui-même implique plusieurs étapes, y compris la production d'enzymes, la diffusion, l'adsorption, la réaction et l'étape de désactivation. Le taux global d'hydrolyse

dépend de la taille de la matière organique, de la forme, de la surface, de la concentration de la biomasse, de la production d'enzymes et de l'adsorption. En plus, l'adsorption concurrentielle de l'enzyme sur le substrat inerte comme la lignine peut également diminuer l'efficacité de l'hydrolyse. Ce processus compliqué a été décrit par plusieurs modèles cinétiques, par exemple, le modèle cinétique basé sur la surface où l'hydrolyse est liée à la concentration du substrat et la superficie des particules, où un modèle biphasé où les bactéries sont attachés d'abord aux particules, libèrent alors l'enzyme pour dégrader la matière. L'hydrolyse est donc une fonction de la biomasse et de la concentration en substrat. Cependant, la plupart des auteurs considèrent l'hydrolyse comme un processus simple en utilisant une cinétique de premier ordre dépendante du substrat. L'hydrolyse s'est avéré une étape de taux limitant pour la digestion du substrat particulier comme les déchets de porcs, les déchets de vaches et les boues d'épuration, tandis que la méthanogénèse est l'étape de taux limitant pour des substrats aisément dégradables [4].

○ L'acidogène

L'étape d'acidogène consiste en une dégradation des composés produits par l'étape d'hydrolyse, par l'action de bactéries acidogènes et fermentatives. Elle conduit à la formation d'un mélange de composés : acides organiques, acides gras volatils (AGV), alcools, hydrogène, dioxyde de carbone, ammonium,...etc. Les sucres obtenus à partir de l'étape d'hydrolyse peuvent facilement être dégradés par le procédé de fermentation tandis que les acides gras à longues chaînes doivent être obligatoirement oxydés par un accepteur externe d'électron. Des acides aminés peuvent l'un ou l'autre être dégradés par des réactions dites de (stickland), où un acide aminé agit en tant que donateur d'électron et l'autre comme accepteur d'électron, ou peuvent être oxydés avec un accepteur d'électron externe. Les microbes fermentatifs de glucose ont des métabolismes embranchés, ce qui signifie qu'ils peuvent métaboliser le substrat dans différentes voies qui donnent différentes quantités d'énergie et produisent différents produits de fermentation. Les bactéries fermentatives peuvent fonctionner à des concentrations élevées de l'hydrogène et du formiate. Cependant, sous cette condition, les bactéries emploieront une voie métabolique dans laquelle plus de métabolites réduits sont produits, comme les acides gras volatils (AGV), lactate, et l'éthanol. Des exemples des différents produits de la fermentation du glucose sont montrés dans le tableau 1.1.

Tableau 1. 1:Exemples de la fermentation du glucose [5]

Produits de la réaction	Réactions
Acide propénoïque	$C_6 H_{12} O_6 + 2 H_2 \rightarrow 2 CH_3 CH_2 COOH + 2 H_2 O$
Acide botanique	$C_6 H_{12} O_6 \rightarrow CH_3 CH_2 CH_2 COOH + 2 CO_2 + 2 H_2$
Lactate	$C_6 H_{12} O_6 \rightarrow 2 CH_3 CHO HCOOH$
Ethanol	$C_6 H_{12} O_6 \rightarrow 2 CH_3 CH_2 OH + 2 CO_2$

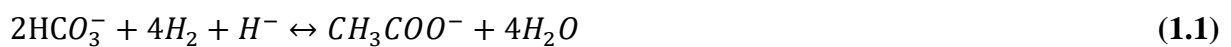
La voie dominante dépend de plusieurs facteurs tels que la concentration en substrats, le pH et la concentration en hydrogène dissout. Sous une charge organique très élevée, la production d'acide lactique devient significative. A bas pH (inférieur à 5) la production de l'éthanol est élevée, alors qu'à pH plus faible (inférieur à 4) il y a une forte production des acides gras volatils (AGV). Cependant, la pression partielle de l'hydrogène à une grande influence sur la voie

fermentescible. Á pression partielle basse de l'hydrogène, la voie de fermentation à l'acétate et l'hydrogène sont favorisés.

○ **l'acétogénèse**

L'étape d'acétogénèse permet la transformation des acides, issus de la phase d'acidogène, en acétate, en dioxyde de carbone, par l'action des bactéries acétogènes. Cette opération est réalisée par deux types de bactéries :

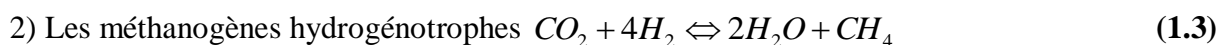
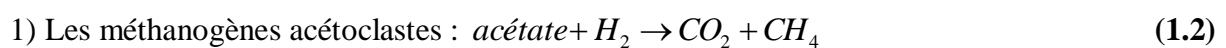
- Les bactéries productrices obligées d'hydrogène : Ce sont des bactéries anaérobies strictes, également appelées OHPA (« Obligate Hydrogen Producing Acetogens »). Elles sont capables de produire de l'acétate et de l' H_2 à partir des métabolites réduits issus de l'acidogénèse tels que le propionate et le butyrate. Il faut noter que ces bactéries ont un temps de multiplication assez long, de l'ordre de 1 à 7,5 jours.
- Les bactéries acétogènes non syntrophes : Le métabolisme de ces bactéries est majoritairement orienté vers la production d'acétate. Elles se développent dans les milieux riches en CO_2 , ce qui est très souvent le cas des niches anaérobies. Elles sont pour la plupart autotrophes. On divise classiquement les bactéries acétogènes non syntrophes en deux groupes. Un premier groupe est formé de bactéries qui produisent de l'acétate, du butyrate et d'autres composés à partir de sucres simples. Les bactéries de ce groupe sont classées en plusieurs genres tels qu'acetobacterium, acetogenium, clostridium, sporomusa, etc... Les bactéries «homoacétogènes» constituent le second groupe, elles utilisent l'hydrogène et le dioxyde de carbone pour produire de l'acétate selon la réaction suivante :



Les bactéries de ce second groupe appartiennent essentiellement au genre Clostridium. Elles ne semblent pas entrer en compétition pour l'hydrogène avec les Archaea méthanogènes hydrogénotrophes et sont présentes en quantités beaucoup plus faibles dans les biotopes anaérobies. Elles ont pu toutefois être identifiées comme partenaires hydrogénotrophes de syntrophes [6].

○ **La méthanogène**

La méthanogène consiste à transformer l'acétate, l'hydrogène et le dioxyde de carbone en méthane. Pour cela, il existe deux grandes voies, faisant chacune appel à des archées anaérobies strictes :



Il y a d'autres voies secondaires qui ont une faible importance. Dans les digesteurs anaérobies, environ 60 à 70 % du méthane sont produits par les méthanogènes acétoclastes. Durant la méthanogénèse, les produits de la fermentation tels que l'acétate et H_2/CO_2 sont convertis en CH_4 et CO_2 par des archées méthanogènes. Les archées méthanogènes peuvent accroître directement sur H_2/CO_2 , acétate et tout autre composé à un seul carbone tel que le formiate, le méthanol et le méthylamine. La méthanogénèse est influencée par les conditions de fonctionnement du réacteur telles que la température, le taux de la charge hydraulique, la charge organique, et la composition du substrat d'alimentation. De plus des réactions méthanogènes, l'inter-conversion entre l'hydrogène et l'acétate catalysé par les bactéries homoacétogènes joue

également un rôle important dans la voie de formation du méthane. Les homoacétogènes peuvent oxyder ou synthétiser l'acétate tout dépend de la concentration externe en hydrogène. Ceci le rend capable de concurrencer plusieurs différents microbes, y compris les méthanogènes [4], [6]. Le tableau 1.2 résume les différentes réactions liées au caractère méthanogènes.

Tableau 1. 2: Réactions reliées aux méthanogènes [2]

	Réaction
Méthanogénèse hydrogénotrophes	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
Méthanogène acétoclastes	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$
Oxydation d'acétate	$CH_3COOH + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + 2CO_2$
Homoacétogènes	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$

Selon le tableau 1.2, à la température standard, la consommation d'hydrogène par les méthanogène hydrogénotrophe est plus favorable que par les homoacétogènes. La consommation d'acétate par des méthanogènes acétoclastes est également plus favorable que l'oxydation d'acétate. Les méthanogènes hydrogénotrophes fonctionnent mieux à haute pression partielle d'hydrogène, alors que les méthanogènes acétoclastes sont indépendants de la pression partielle d'hydrogène. À des températures élevées (> 30 °C) la voie d'oxydation d'acétate devient plus favorable. Il a été trouvé que la formation du méthane par voie d'oxydation d'acétate peut contribuer jusqu'à 14 % de la conversion totale d'acétate en méthane dans des conditions thermophiles (60 °C). Ceci correspond à une abondance élevée de méthanogène utilisateur d'hydrogène dans un digesteur thermophile. Cependant les méthanogènes acétoclastes tels que la *Methanosarcina thermophila* fonctionnent également à température élevée. Aux concentrations élevées en acétate, la voie de méthanogène acétoclaste est plus favorable que l'oxydation syntrophique d'acétate. Cependant, en conditions extra-thermophiles (>65 °C), qui est au-delà de la température optimale (63 °C) des méthanogènes acétoclastes, la voie syntrophique d'oxydation d'acétate domine.

L'oxydation d'acétate à une température limite inférieure de fonctionnement est de 37 °C ; par contre à des faibles températures, une faible pression partielle en hydrogène est nécessaire pour obtenir l'énergie pour l'étape de l'oxydation. Dans des conditions psychrophiles (< 15 °C), l'activité des méthanogènes utilisateurs d'hydrogène est très faible. L'homoacétogénèse succède comme fonction principale d'enlèvement d'hydrogène, et la formation de méthane par les méthanogènes acétoclastes devient dominante. La formation du méthane par les homoacétogènes sous la température psychrophile peut aller jusqu'à 95 % de la production totale de méthane. Cependant, les méthanogènes acétoclastes sont plus sensibles à l'ammoniaque que les méthanogènes utilisateurs d'hydrogène. L'oxydation d'acétate peut dominer aux températures modérées (mésophiles ou inférieures) si les concentrations élevées en ammonium empêchent les méthanogènes acétoclastes.

1.4 : Conditions physico-chimiques nécessaires à la digestion anaérobie

La digestion anaérobie ne peut être réalisée que sous certaines conditions :

- absence d'oxygène, de nitrates ou de sulfates ;
- pH proche de la neutralité : optimum 6,8 – 7,5 ;

- concentration en acide gras volatils (AGV) inférieures à 2 – 3 g/l ;
- une pression partielle en hydrogène très faible : 10 – 20 Pa au maximum ;
- un potentiel d'oxydoréduction inférieur à -300 mV ;
- absence d'éléments inhibiteurs : agent chlorés, antibiotiques ;...
- une température stable optimale pour les micro-organismes épurateurs.

1.5 : Les facteurs affectant la stabilité du processus de biogaz

Les facteurs affectant la production de biogaz sont principalement basés sur les conditions opératoires ainsi que l'alimentation du digesteur. Les conditions de fonctionnement telles que le pH et la température influencent directement les microorganismes. Les perturbations par l'alimentation incluent la composition et la concentration de déchet, et les composés toxiques et les inhibiteurs. Parfois, les composés toxiques ne sont pas présents au départ dans l'alimentation, mais ils sont produits à l'intérieur du réacteur à partir de la dégradation du substrat (comme exemple, les AGV et l'ammoniaque).

✓ Le substrat

Le type et la composition du substrat déterminent directement le rendement de biogaz. En anaérobie, le substrat d'alimentation est souvent mesuré en termes de la demande chimique en oxygène totale (DCO) ou en termes de solides volatils totaux (SV). Il est important de distinguer entre la fraction dégradabile disponible et la fraction inerte, car une fraction considérable de la DCO à l'entrée est inerte. Le déchet qui contient une teneur élevée en eau a un rendement faible en méthane par DCO ou SV. Les déchets organiques contiennent une composition variée : les composés majeurs sont les saccharides (qui sont divisées en deux fractions, facilement et lentement dégradables), les lipides (facilement dégradables), les protéines (facilement dégradables), les AGV (facilement dégradables), ainsi que d'autres composés.

En revanche, la plupart des déchets organiques contiennent une fraction élevée du substrat facilement dégradabile, qui donne un rendement élevé de méthane et de production d'AGV. Il est donc important de contrôler la charge organique et hydraulique selon la capacité du digesteur. Lorsque le processus fonctionne à faible taux de charge à l'entrée cela donne un taux de production de biogaz faible également. Bien que ceci puisse empêcher la rupture du processus, il est peu économique parce que la capacité du processus n'est pas entièrement utilisée. L'augmentation de la charge donne plus de biogaz mais aussi il y a le risque de la surcharge, qui a comme conséquence l'accumulation des AGV. La concentration élevée d'AGV diminue le pH et fait que les AGV deviennent plus toxiques aux méthanogènes, qui peuvent mener le processus à la rupture. Suffisamment de nutriments sont également importants pour la croissance des cellules microbiennes. Les macros nutriments tels que le carbone, l'hydrogène, l'azote et l'oxygène sont les composants principaux des cellules dans la biomasse. Comme il y en a d'autres tels que le soufre, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le fer qui sont exigés [3].

✓ La température

La digestion anaérobie peut être appliquée dans une large plage de température, en psychrophile (< 20 °C), en mésophile (25-40 °C), en thermophile (45-60 °C), et même en conditions extra thermophiles (>60 °C). La température a un effet direct sur les propriétés physico-chimiques de tous les composants dans le digesteur et affecte aussi la thermodynamique et la cinétique des processus biologiques. La température détermine si une réaction spécifique est favorable. L'augmentation de la température a plusieurs avantages, dont :

- l'augmentation de la solubilité des composés organiques qui les rend plus accessibles aux micro-organismes ;
- l'augmentation des taux chimiques et biologiques des réactions, et accélère ainsi le processus de conversion, donc le réacteur peut être plus petit et peut fonctionner avec un plus faible temps de rétention hydraulique (TRH) ;
- l'amélioration de plusieurs propriétés physico-chimiques comme la diffusivité du substrat soluble, l'augmentation du taux de transfert de liquide vers le gaz dû à la faible solubilité du gaz, diminution de la viscosité liquide qui fait diminuer l'énergie d'agitation nécessaire et améliorer également la séparation liquide-solide de la biomasse ;
- l'augmentation du taux de mortalité des bactéries pathogènes particulièrement en condition thermophile, qui diminue le temps requis pour la réduction des pathogènes. En plus, les réactions d'oxydations d'acide organique deviennent plus énergiques à température élevée, ce qui est avantageux pour la dégradation d'acide gras à longue chaîne (AGLC), d'acide gras (AG) et d'autres intermédiaires.

Néanmoins, la haute température peut avoir un certain effet négatif. L'augmentation de la température diminue le pKa de l'ammoniaque, augmente ainsi la fraction d'ammoniaque libre (NH₃) qui est un inhibiteur des microorganismes. En outre, l'élévation de la température augmente le pKa des AGV, qui augmente sa fraction non dissociée, particulièrement à faible pH (4-5), comme dans le réacteur acidogène. Ceci rend le processus thermophile plus sensible à l'inhibition. Cependant, en raison de la multiplicité d'avantages à hautes températures, l'opération thermophile est populaire dans les applications anaérobies où l'inhibition d'ammoniaque n'est pas la première considération [2].

✓ **Taux, degré de mélange**

Plusieurs études ont prouvé que l'intensité de mélange dans un réacteur de type CSTR a un effet sur l'inhibition du processus et le rétablissement de la surcharge organique. D'autres chercheurs ont étudié l'accumulation de l'acétate et de propionate dans un digesteur de type CSTR qui traite les déchets solides municipaux et les bios solides avec un démarrage agressif et une surcharge organique. Ils ont constaté que tandis que l'acétate était par la suite consommé, le propionate a persisté dans tout le système et il a commencé à diminuer seulement après que la vitesse de mélange a été réduite. Ils ont également constaté qu'un réacteur avec un mélange réduit peut tolérer une charge organique plus élevée que le réacteur avec un mélange intensif. Une autre étude sur des digesteurs de type CSTR traitant les déchets solides municipaux et les déchets d'animaux, a prouvé que si la charge organique était élevée, un mélange intensif a comme conséquence l'acidification et l'échec du processus, alors qu'un mélange à faible intensité était crucial pour une réussite de la digestion. Dans cette étude, ils ont supposé que le mélange empêche l'établissement des zones méthanogéniques dans le réacteur et ils ont évalué ceci dans un modèle mathématique [2].

✓ **Composés toxiques, inhibiteurs**

Les composés inhibiteurs sont présents déjà dans le substrat ou produit pendant la dégradation. La plupart des inhibiteurs sont formés pendant la dégradation du substrat, tels que l'AGV, l'AGLC, l'ammoniaque et le sulfure. Quelques inhibiteurs sont présents déjà en substrat, tels que l'AGLC, et les métaux lourds.

L'AGV est l'intermédiaire principale dans la digestion anaérobie, et il s'accumule sous l'action du déséquilibre du processus. A faible pH, l'AGV devient plus toxique, cela est dû à

l'augmentation de sa fraction non dissociée. La concentration seuil d'inhibition d'AGV dépend du pouvoir tampon du réacteur.

L'ammoniaque vient principalement de la dégradation de déchets de protéine. Une étude sur 18 stations centrales de biogaz au Danemark, a prouvé que l'ammoniaque était un facteur significatif affectant la stabilité du processus. L'augmentation de la toxicité d'ammoniaque à pH et à température élevés dus à la concentration plus élevée de l'ammoniaque libre demeure un inhibiteur. Une concentration de l'ammoniaque de l'ordre de 2 gN/l n'aura aucun effet inhibiteur sur les méthanogènes acétoclaste. Cependant, l'activité des méthanogènes est diminuée lors de l'augmentation de la concentration de l'ammoniaque, et l'inhibition totale est atteint pour une concentration de 10 gN/l. De plus le pH a une influence sur l'effet inhibiteur de l'ammoniaque. A une concentration élevée en ammoniaque et à pH entre 7,0 et 7,5, l'effet inhibiteur est faible [2].

1.6 Avantages et inconvénients de la digestion anaérobie

Les avantages de la digestion anaérobie sont :

- une réduction de la matière sèche des boues de l'ordre de 50 % ;
- une production d'un biogaz valorisable sous forme d'énergie (chauffage, cogénération d'électricité) ;
- une réduction du nombre de micro-organismes pathogènes ;
- un intérêt agronomique, lié à une concentration importante en azote ammoniacal ; (NH_4^+ et en phosphates (PO_4^{3-}) due à la lyse de la matière organique ;
- une demande en énergie plus faible que les procédés aérobies et pas d'apport en oxygène ;
- la possibilité de traiter des charges organiques élevées : de 2 à plus de 80 kg de DCO par mètre cube de réacteur et par jour avec des taux d'épuration de 80 à 98 %.

Cependant, elle comporte aussi quelques inconvénients :

- une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques ;
- une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies ;
- des coûts d'investissement importants ;
- du fait de la faible vitesse de croissance bactérienne, la cinétique d'épuration est lente et les périodes de démarrage des réacteurs relativement longues ;
- les populations microbiennes sont sensibles aux perturbations, en particulier à l'oxygène et aux métaux lourds ou encore aux surcharges organiques et le procédé se révèle souvent instable ;
- le traitement par digestion anaérobie est souvent insuffisant pour rejeter directement les effluents dans le milieu naturel un post-traitement aérobie de finition est nécessaire pour achever l'élimination du carbone et éventuellement de l'azote et du phosphore.

Conclusion

Dans le contexte actuel de l'augmentation de la production de déchets, la digestion anaérobie et la valorisation du biogaz produit, apparaissent comme des solutions d'avenir pour le traitement des déchets dans un esprit de développement durable.

Dans cette étude, l'intérêt fut de comprendre les différents paramètres de base qui composent le biodigester tel que le pH, la température, le temps de séjours hydraulique,.... Ainsi, nous avons porté notre étude sur le processus de digestion anaérobie des bouses afin d'en réaliser le dimensionnement d'un biodigester.

Chapitre 2 : Dimensionnement du biodigesteur

Introduction

La méthanisation est un processus biologique naturel, connu depuis longtemps, qui accélère la dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène grâce à l'action de micro-organismes. On parle de digestion anaérobie par opposition à la digestion aérobie qui est la transformation de la matière organique en compost en présence d'oxygène. La méthanisation se déroule de manière contrôlée (température, pH, oxygène) dans un digesteur fermé, chauffé et brassé pendant 40 à 60 jours selon les matières organiques entrantes. Elle permet de produire à la fois une énergie renouvelable, le biogaz, et un digestat, produit humide riche en matière organique, pouvant servir de fertilisant.

2.1 Présentation des différentes voies de méthanisation

Il existe plusieurs procédés de méthanisation qui se distinguent principalement selon la teneur en matière sèche (voie humide ou voie sèche), selon la température (voie mésophile ou thermophile), et selon les modes d'alimentation et d'extraction des matières (voie continue, discontinue ou semi-continue).

-**Voie humide** le digesteur contient moins de 15 % de matière sèche. Ce procédé est adapté pour les effluents liquides (lisiers, bouses). Des déchets solides peuvent être incorporés après dilution. Le substrat plus homogène permet une meilleure production de biogaz ;

-**Voie sèche** le digesteur contient entre 15 et 40 % de matière sèche. Ce procédé est adapté pour les substrats solides ;

-**Voie mésophile (25-40 °C)** c'est le procédé le plus couramment utilisé car simple de fonctionnement ;

-**Voie thermophile (45-60 °C)** ce procédé consomme plus de chaleur, reste le plus complexe à maîtriser mais la méthanisation est plus rapide ;

-**Voie continue** : dans ce système, on incorpore chaque jour un peu de substrat à la masse en cours de digestion et on extrait un peu de digestat, dans des quantités équivalentes. Cette voie, qui suppose un mélange relativement liquide pour un brassage homogène du mélange, est bien adaptée à des systèmes avec apports de lisiers. C'est la voie majoritaire actuellement.

-**Voie discontinue ou « batch »** dans ce système, la matière est apportée au début du cycle et le digestat retiré en fin de cycle.

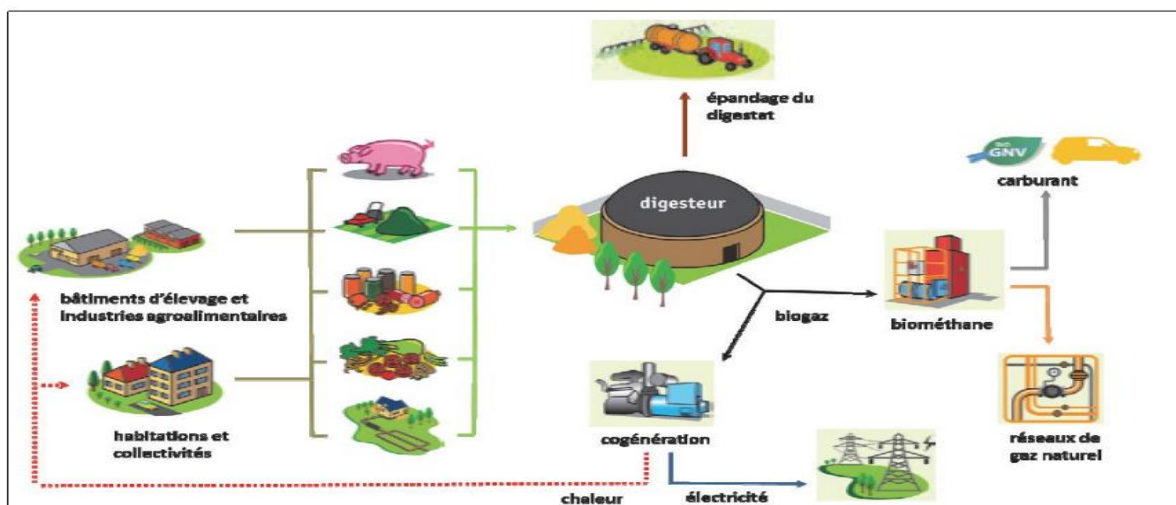


Figure 2. 1: Schéma du fonctionnement type d'une installation de méthanisation (ATEE)

2.1 : La biomasse

▪ Quelle biomasse utiliser ?

Toute matière organique peut être utilisée comme biomasse : les déchets organiques, les boues de station d'épuration, les sous-produits de l'industrie du bois, de l'industrie agro-alimentaire ou de l'agriculture. Cependant, le choix des matières organiques utilisées et les mélanges de co-substrats sont très importants au bon fonctionnement de l'installation.

Pour une production maximale de méthane, il est préférable d'utiliser des substrats riches en graisses, protéines et hydrates de carbone car leur dégradation entraîne la formation importante d'acides gras volatils, principaux précurseurs du méthane (voir tableau 2.1 et figure 2.2).

-Les déjections animales sont particulièrement intéressantes à utiliser quand elles sont produites en quantités importantes et régulières. Le lisier est adapté à la méthanisation compte tenu de son état liquide qui facilite sa manipulation et qui permet de diluer les autres substrats. Malgré un faible potentiel méthanogène, les lisiers sont indispensables car ils apportent des bactéries fraîches. Les fumiers sont également intéressants car ils ont un taux de matière sèche plus élevé et peuvent servir de support pour les bactéries à l'intérieur du digesteur ; cependant, leur aspect solide les rend plus difficiles à manipuler et plus chers à utiliser, compte tenu des étapes supplémentaires qu'ils doivent subir (mélangés à du lisier dans la pré-fosse ou introduits à l'aide d'une trémie).

-Les co-substrats sont des substrats extérieurs à l'exploitation. Les quantités et le potentiel méthanogène des substrats issus de la ferme sont en général insuffisants pour rentabiliser une installation. Ainsi, les co-substrats permettent de réaliser une co-digestion. Ils peuvent provenir d'industries agro-alimentaires (déchets de légumes ou de fruits, petit lait, huiles, graisses), de collectivités (tontes, feuilles, bio-déchets des ménages, boues de station d'épuration), de restaurateurs privés ou collectifs, ou encore de grandes surfaces de distribution.

-Les résidus de cultures (pailles, tourteaux, pulpes, fanes) ont souvent de hautes teneurs en carbone et sont facilement assimilables dans le digesteur ; ils sont donc de bons substrats pour la méthanisation.

-Les cultures (maïs ensilage, herbe, ensilage, betterave) possèdent des potentiels méthanogènes intéressants et peuvent donc être utilisées à des fins énergétiques. Il est cependant nécessaire d'étudier les coûts engendrés par ces cultures par rapport aux bénéfices réalisés au travers de la méthanisation ; il n'est donc pas forcément intéressant d'intégrer des cultures à la méthanisation.

Parmi les différentes matières organiques, seuls les déchets ligneux (bois, branchages) ne sont pas aptes à être digérés par les bactéries, il est donc inutile de les mettre dans le digesteur. De plus, il ne faut pas introduire de produits inorganiques (sable, verre, plastique) : ils ne sont pas dégradés lors de la digestion, risquent de provoquer des perturbations dans le processus (séparation de phase, sédimentation, flottation, apparition de mousse), et viendront polluer les terres agricoles par l'épandage du digestat. Les matières contenant des substances dangereuses (métaux lourds, polluants organiques, substances présentant un risque sanitaire antibiotiques) ne doivent pas entrer dans le digesteur ; elles risquent à la fois de perturber le processus bactérien et d'altérer la qualité du digestat

Tableau 2. 1 : Production de biogaz selon les matières entrants (EDEN, 2007)

Lisier de vache	200 m ³ méthane /T de MS
Lisier de porc	300 m ³ méthane /T de MS
Fumier de volaille	250 m ³ méthane /T de MS
Boues urbaines	300 m ³ méthane /T de MS
Déchets organiques	250 m ³ méthane /T de MS
Déchets gras	720 m ³ méthane /T de MS
Tontes d'herbe	480 m ³ méthane /T de MS
Résidus de silo céréalier	450 m ³ méthane /T de MS

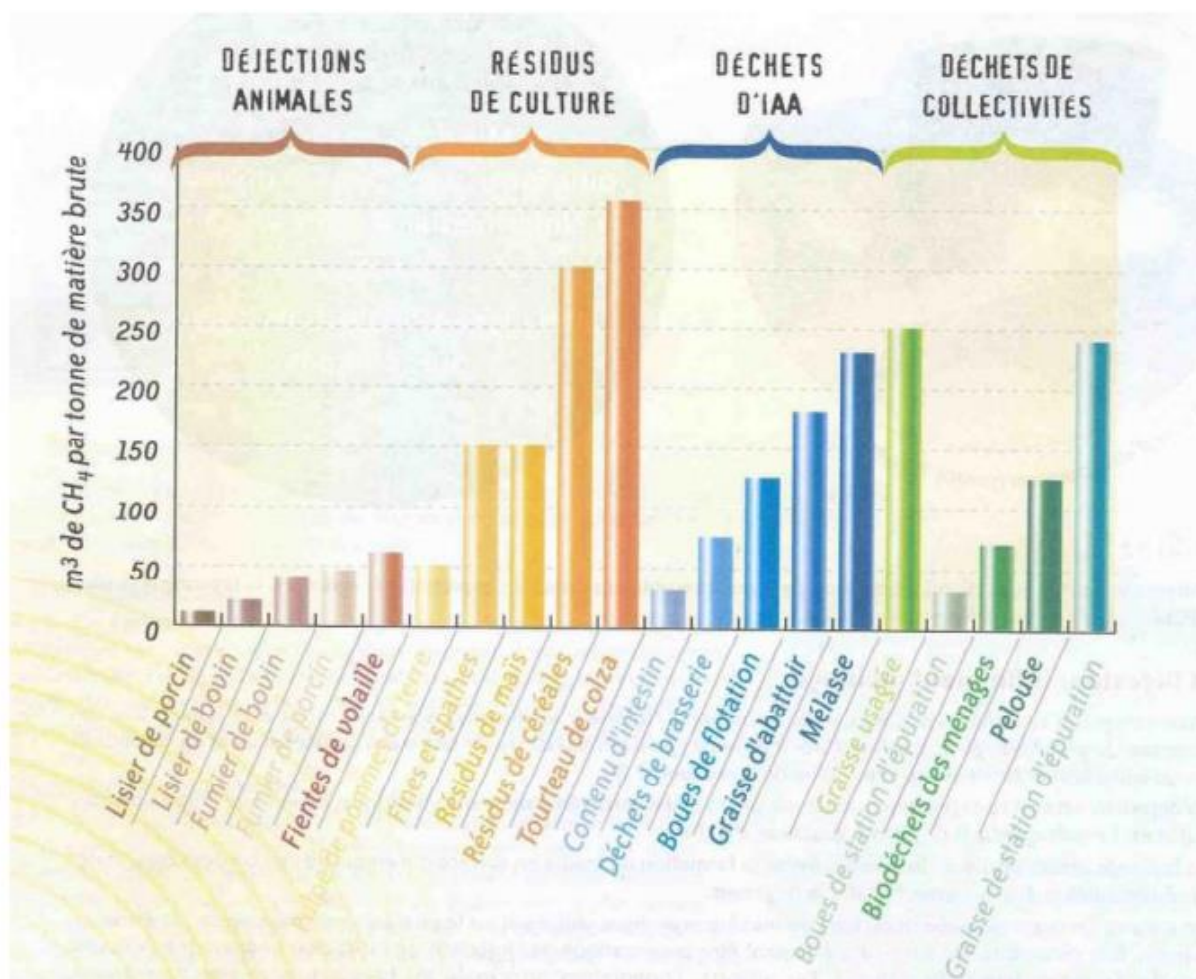


Figure 2. 2: Potentiels de production de méthane en fonction des matières brutes (fiche ADEME, 2006)

▪ La digestion des substrats

Cette matière organique doit être collectée puis emmenée jusqu'à l'unité de méthanisation. Dans l'unité de méthanisation, différentes opérations préalables avant l'introduction dans le digesteur peuvent être requises en fonction de la nature du substrat à traiter :

- épaissement du substrat (lisiers) ;
- dilution des substrats (fumiers) plus de 80 % de la biomasse est de la matière sèche, à laquelle il est nécessaire d'ajouter de l'eau ou d'autres produits liquides (lisier) ;
- élimination des matériaux indésirables (produits inorganiques) ;
- homogénéisation ; le substrat peut, par exemple être broyé ;

- Hygiénisation ;
- correction du pH : neutralisation des effluents trop acides ou basiques.

Les biomasses solides (fumier, herbe, ensilage, déchets agroalimentaires) sont ensuite stockées dans des silos en béton, qui ont pour but de garantir l'approvisionnement de l'installation en matières premières.

La trémie d'incorporation est utilisée pour alimenter le digesteur en matières organiques solides de manière régulière et automatique.

La pré-fosse de stockage sert pour les liquides (lisiers, jus d'écoulement de fumier, mélasse, effluents industriels) ainsi que pour la fraction liquide du digestat, qui sera de nouveau insérée dans le digesteur.

2.2 : Paramètres opérationnels du digesteur

2.2.1 : Charge organique

Si le déchet est bien fermentescible, il faut éviter les surcharges brutales (augmentation de plus de 20 % en moins d'une journée) qui risquent de déséquilibrer le processus et d'acidifier le milieu par suite d'une trop rapide production d'acides gras volatils. Pour les déchets de biomasse (dont la teneur en carbone de la matière organique est environ 50 % de sa masse sèche), on obtient environ 1 Nm³ de biogaz par kilogramme de matière organique dégradée.

2.2.2 : Température

Il existe trois niveaux de température qui déterminent la vitesse de décomposition de la matière organique des installations de biogaz : la psychrophilie, la mésophilie et la thermophilie.

Un milieu psychrophile caractérise les biodigesteurs dits « passifs », qui ne sont pas chauffés. Ces techniques, les plus anciennes et les plus simples, fonctionnent par des températures en-dessous de 25 °C, et sont peu utilisées de nos jours en raison de la durée élevée de la digestion. Un système peu coûteux et intéressant pour des agriculteurs qui n'ont pas de quantités énormes à traiter.

Les milieux mésophiles sont les plus courants, et concernent les températures comprises entre 25 et 45 °C. Les temps de séjour corrects, une température très adaptée à la stabilité des micro-organismes méthanogènes et un faible besoin en chaleur du processus, rendent la digestion mésophile très adaptée à la plupart des utilisations, particulièrement pour les installations de fermentation humide.

Les milieux thermophiles, avec des températures comprises entre 45 et 55 °C, sont caractérisés par une décomposition rapide du substrat et des hauts rendements de production de gaz. Cependant, le nombre de micro-organismes actifs à ces températures sont très inférieurs à celui de la flore mésophile : des perturbations extérieures (variations de température, de quantité d'intrants organiques, entrée de matières inhibitrices) peuvent rendre le fonctionnement moins stable (décomposition réduite, rendements moins élevés). Les besoins en chaleur plus importants sont également à considérer.

Des mesures expérimentales de la température et du pH ont été réalisées dans notre digesteur le 05 Avril 2016 au 18 Mai 2016. (Voir figure 2.3).

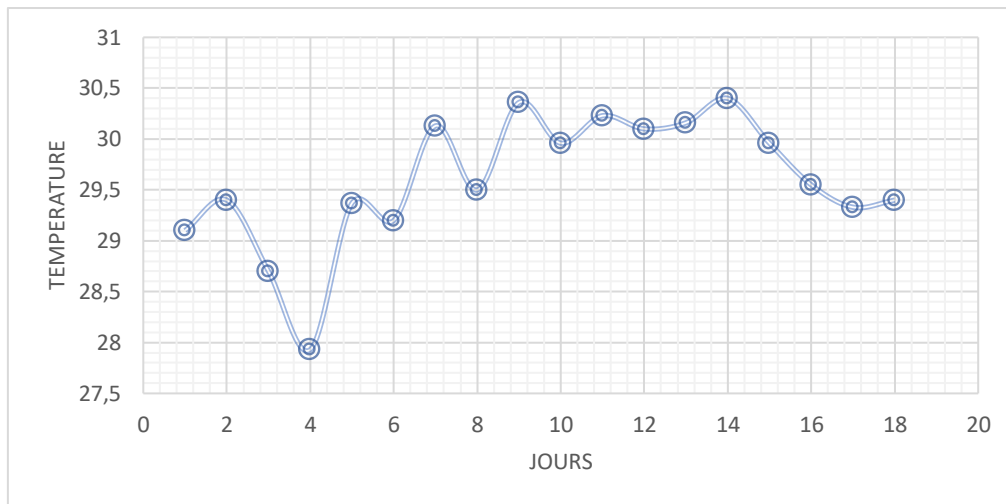


Figure 2. 3 : Evolution de la température du digesteur en fonction des jours

Ainsi en se basant sur les données du tableau 2.2 ci-dessous et sur la base de la température moyenne de 30 °C obtenue de nos données expérimentales, nous pouvons affirmer que notre bio digesteur est bien mésophile.

Tableau 2. 2: Température d’opération pour chaque type de digesteurs selon les auteurs [7]

Système de digesteur	Burton et Turner, 2003	Willinger, 1999	Bio-Terre Systèmes Inc... 2010	RENTEC, 2004	Krinkels, 2004
Thermophile	40 à 60°C	49 à 60°C	60°C	52 à 55°C	55°C
Mésophile	20 à 40°C	25 à 35°C	35 à 45°C	25 à 40°C	24 à 40°C
Psychrophile	10 à 20°C	10 à 25°C	5 à 25°C	<25°C	-

2.2.3 : Paramètre opérationnel : temps de séjours hydraulique (TRH)

Le TRH ou temps de rétention hydraulique (temps de séjour moyen des bouses) est le principal paramètre de dimensionnement d’un digesteur. Il est généralement de l’ordre de 30 à 45 jours, 40jours en moyenne ce qui est un compromis entre l’optimisation des performances de la dégradation de la matière organique et le volume du digesteur.

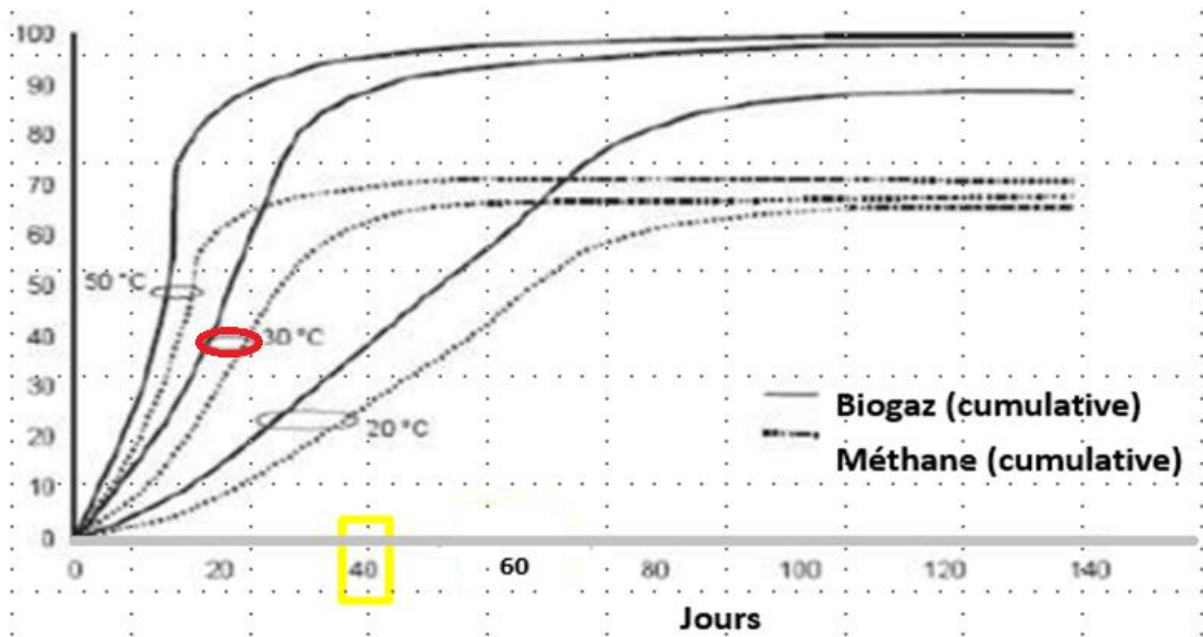


Figure 2. 4: Evolution de la production du biogaz pour diverses températures en fonction du temps de rétention hydraulique [8]

2.2.4 : Le pH

Les bactéries méthanogènes sont très sensibles aux valeurs de pH du milieu et ont un optimum entre 6,8 et 7,2. La digestion anaérobie se déroule normalement pour des pH compris entre 6 et 8 [4]; si le pH du milieu est acide, ceci entraîne un arrêt de la fermentation. Par ailleurs si le pH du milieu est basique, ceci entraîne une production des éléments sulfato-réducteurs, inhibiteurs (H_2S, H_2, \dots).

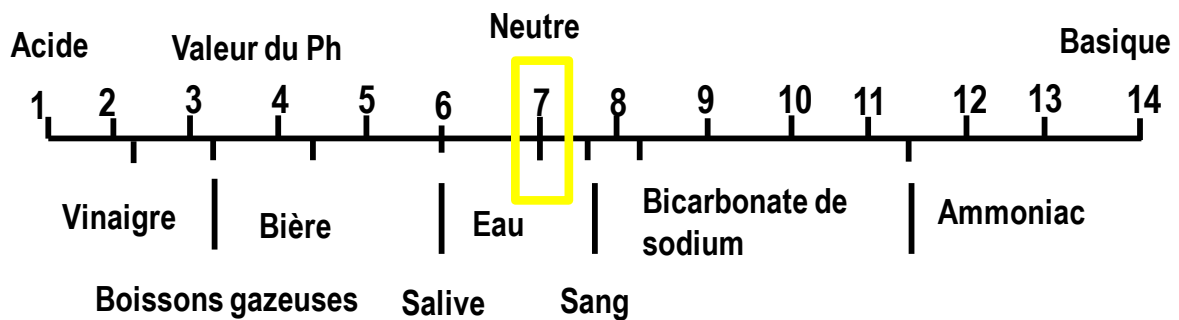


Figure 2. 5: Plage de neutralité ou optimum du pH [9]

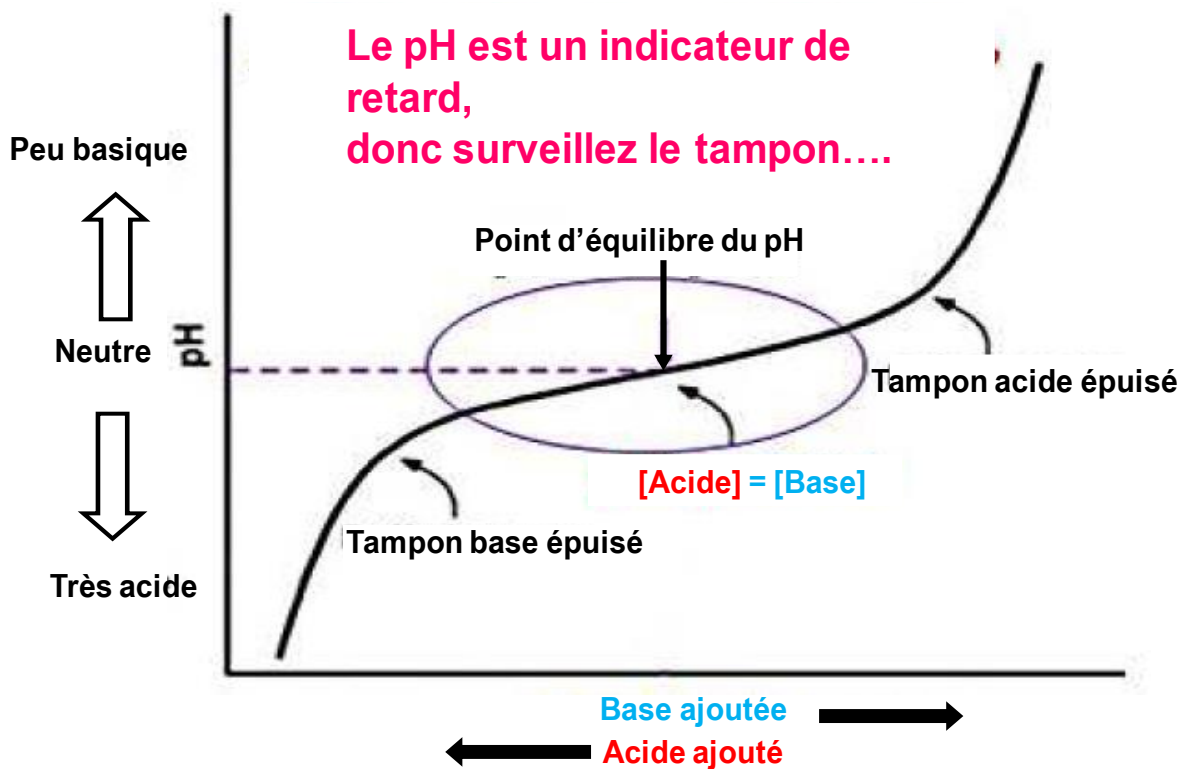


Figure 2. 6: Autre représentation de la plage de neutralité [10]

Cette représentation du pH en fonction des jours, issue de nos mesures de pH lors de notre stage sur le site du biodigesteur nous montre un bon fonctionnement du digesteur. Car pour un bon fonctionnement du digesteur l'optimum du pH doit se situer entre 6,8 et 7,2.

Ces différentes données du pH ci-dessous ont été obtenues entre le 05 Avril 2016 au 18 Mai 2016 dans notre digesteur.

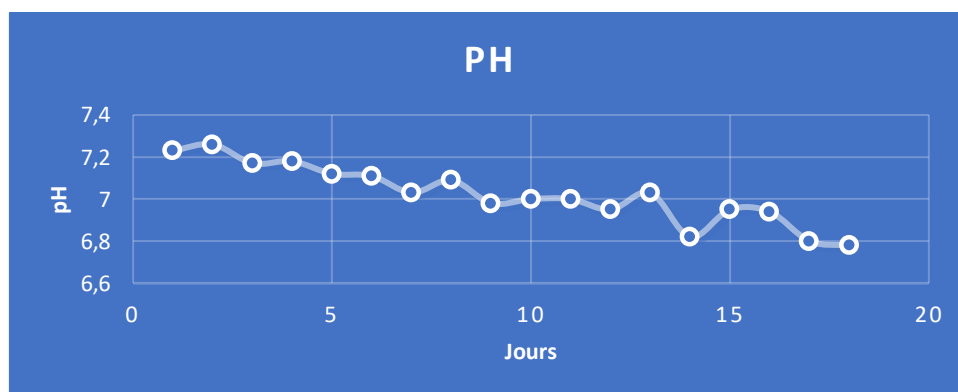


Figure 2. 7: Représentation du pH des bouses de vaches en fonction des jours

2.2.5 : Le rapport carbone/azote (C/N)

Des études indiquent que la proportion désirable du rapport (C/N) se situe entre 20 et 30 ; le ratio 25 étant l'idéal. Une augmentation de l'apport en azote peut mener à une production accrue d'ammoniac, ce qui peut nuire aux microorganismes et inactiver la méthanisation [11].

2.2.6 : L'agitation

Une bonne agitation permet d'éviter la production de croûtes et la décantation de particules denses ce qui permet de rompre la couche qui surnage et facilite ainsi l'échappement du biogaz ; elle favorise aussi la dégradation de la MO par les bactéries [11].

2.2.7 : L'humidité

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité minimale est de 60 à 70 % en eau liée ou eau libre. Dans tous les cas, l'humidité des déchets doit être suffisante pour que l'hydrolyse, première étape de la 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 très dilué : 85 à 90 % d'eau avec 10 à 15 % de matière sèche [12].

2.3 : Dimensionnement du digesteur

Une installation de bio méthanisation se compose généralement d'un digesteur, des équipements d'épuration, des équipements d'utilisation et des accessoires de raccordement.

Dans le cadre de notre travail, l'installation est destinée à produire du biogaz brut utilisé pour la cuisson et l'éclairage ; elle ne comportera donc pas d'équipements d'épuration. Dans ces conditions, dimensionner cette installation domestique se résume au dimensionnement de son élément principal (le digesteur) et la production. Pour le biodigesteur, la démarche consistera donc à dimensionner d'abord le gazomètre, le volume utile du digesteur, et enfin le volume totale du digesteur (volume du réservoir).

La taille du digesteur ou volume de construction du digesteur est conditionnée par le temps de séjour hydraulique ou temps de rétention (TRH) et par la quantité de substrat disponible par jour. La quantité de matière disponible est obtenue en effectuant une enquête chez l'utilisateur potentiel. La valeur du substrat se compose de la matière à digérer et de l'eau de mélange. Si on utilise des bouses de vache, on doit mélanger la matière avec de l'eau suivant un rapport 1:1 (un seau de bouses fraîches est mélangé à un seau d'eau).

2.3.1 : Equation de dimensionnement du gazomètre

Dans ce paragraphe, une fois que nous aurons évalué les besoins journaliers en biogaz, nous allons utiliser le modèle de Hashimoto pour déterminer la production spécifique journalière (équation 1) puis à partir du volume utile V du digesteur, on pourra enfin calculer la production volumique journalière grâce à l'équation (3) [13].

La production du biogaz par m^3 du digesteur s'obtient donc à partir de l'équation suivante :

$$P_v = \frac{B_o \times S}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu m - 1 + K)} \right] \quad (1)$$

avec

$$\mu m = 0,013(T) - 0,129 \quad (2)$$

Pour un volume utile V du digesteur, on obtient alors une production volumique journalière de :

$$G = P_v \times V = \frac{B_o \times S \times V}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu_m - 1 + K)} \right] \quad (3)$$

Tableau 2. 3: Définitions et unités des paramètres utilisés dans les équations [14]

Paramètres	Définitions	Unités	Modes
P_v	Production volumique ; production de biogaz par m^3 de fermenteur/ jour	$m_g^3/m_f^3.j$	Calcul
S	Charge volumique	$kg(MS, MO, DCO/m_i^3)$	Calcul
B_o	Potentiel de production de méthane	$m^3/kgMO$	Laboratoire
TRH	Temps de rétention hydraulique moyen de l'effluent dans le réacteur = $\frac{V}{Q}$	J	Voir graphique
K	Constante d'inhibition qui est spécifique pour un substrat donné et pour un consortium bactérien	Adimensionnel	Laboratoire
μ_m	Coefficient cinétique (taux de croissance journalier des microorganismes)	j^{-1}	Calcul
T	Température	$^{\circ}C$	Mesure

V	Volume utile du fermenteur	m_f^3	Calcul
G	Biogaz produit par jour	m_g^3/j	Calcul

2.3.2 Equation de dimensionnement du réservoir

Le volume du réservoir (V_D) qui n'est autre chose que le volume du digesteur correspondant au volume de l'ensemble formé par le gazomètre et du volume de l'effluent (volume utile V) :

$$V_D = V + G \quad (4)$$

$$\text{Sachant que } V = Q \times TRH \quad (5)$$

En récrivant l'équation (4) sur la base des équations (3) et (5), on aura V_D en fonction de Q via l'équation suivante :

$$V_D = Q \left[TRH + B_o \times S \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu_m - 1 + K} \right) \right] \quad (6)$$

Q	Débit volumique	m_i^3/j	Calcul
V_D	Volume total du digesteur	m^3	Calcul

On peut finaliser l'équation (6) en tenant compte du fait que :

-le débit (Q) est non seulement fonction de la masse (m) du substrat à digérer, mais aussi du ratio de son mélange avec de l'eau (1 : x). Ainsi, le volume (v en m³) qu'occupe cette masse de substrat vaut:

$$v = \frac{m}{\rho_s} \quad (7)$$

Avec m en [kg] et ρ_s en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$$Q = v(1+x) = \frac{m(1+x)}{\rho_s} \quad (8)$$

Où en [m³], x définit le ratio bouse sur eau

$$\text{Et } V = TRH \times Q = \frac{TRH \times m \times (1+x)}{\rho_s} \quad (9)$$

-la charge volumique (S) s'exprime en fonction de la masse (m), de la concentration (C) et du volume utile (V) à travers :

$$S = \frac{m \times C}{V} \quad (10)$$

Après avoir substitué successivement (8) dans (5) et (5) dans (9), on obtient :

$$S = \frac{\rho_s \times C}{TRH(1+x)} \quad (11)$$

En substituant (8) et (10) dans (6) l'on obtient l'équation finale (12) de dimensionnement:

$$V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_s} \left[TRH + \frac{B_o \times C \times \rho_s}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu_m - 1 + K} \right) \right] \quad (12)$$

M	Masse du substrat (matière première)	kg	Mesure
C	Concentration de la matière organique dans le substrat	% (en valeur relative)	Laboratoire

2.3.3 : Evaluation des besoins en biogaz et dimensionnement du digesteur correspondant

Vérification et validation de l'équation de dimensionnement

L'équation finale (12) de dimensionnement du digesteur exprime la sortie (V_D) en fonction des entrées (m) et (x) ($V_D = f(m, x)$).

Les autres paramètres étant fixés, cette équation permet de choisir parmi une gamme des digesteurs celui qui aura un volume égal ou légèrement supérieur à (V_D) et permettant de digérer une masse connue (m) du substrat mélangé à une quantité d'eau (m_x).

De même, lorsque le volume (V_D) du digesteur est connu, l'équation finale (12) permet à l'utilisateur de déterminer la masse du substrat (m) à digérer et le ratio (x) de son mélange avec l'eau.

Le volume du gaz attendu peut être obtenu soit par l'équation (3), soit par la différence entre (V_D) et (V).

Illustrons pour vérifier ce qui précède en dimensionnant un digesteur et en déterminant le volume de gaz attendu si l'on dispose de 10 kg de bouses (quantité de bouse moyenne produite quotidiennement par une vache).

- ✓ Le régime de fonctionnement du digesteur est soit psychrophile, soit mésophile en raison de la température moyenne dans la région qui est de l'ordre de 30°C (permettant de remonter à la valeur du potentiel méthanogène du substrat utilisé) ;
- ✓ La concentration de la matière organique dans la bouse est évaluée en unité relative vaut $C = 10 \%$;
- ✓ Le mélange de la bouse et de l'eau se fait suivant le ratio 1 : 1 (1 litre de bouse fraîche est mélangée et diluée dans 1 litre d'eau) ;
- ✓ Le temps de rétention hydraulique (TRH) est fixé à 40 jours.

On se fixe l'hypothèse suivante : on suppose pour simplifier les calculs que 1kg de bouse correspond à 1 litre ($\rho_s=1000\text{kg/m}^3$). Ainsi en utilisant l'équation (12), on aura :

$$V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_s} \left[TRH + \frac{B_o \times c \times \rho_s}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu_m - 1 + K} \right) \right] \quad (12)$$

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

$$K = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \times s} = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \frac{c \times \rho_s}{TRH(1+x)}} = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \frac{10 \times 1000}{40 \times 2}} = 3,693$$

La valeur du potentiel méthanogène de la bouse de vache à la température $T = 30^\circ\text{C}$ vaut :

$$B_o = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg} \quad [13]$$

$$\text{Et enfin } \mu_m = 0,013 \times 30 - 0,129 = 0,261/\text{j}$$

$$\text{A.N : } V_D = \frac{10(1+1)}{1000} \left[40 + \frac{0,2 \times 10 \times 1000}{40(1+1)} \left(1 - \frac{3,693}{40 \times 0,261 - 1 + 3,693} \right) \right] = 1,159 \text{ m}^3$$

Pour un digesteur à gazomètre combiné, un volume de $1,159 \text{ m}^3$ sera nécessaire pour digérer 10 kg de bouse humide de vache concentrée à 10% de MO mélangées à de l'eau suivant le ratio 1 : 1.

$$\text{D'après l'équation (9) : } V = TRH \times Q = \frac{TRH \times m \times (1+x)}{\rho_s} \text{ nous pouvons calculer le volume utile.}$$

$$V = \frac{40 \times 10 \times (1+1)}{1000} = 0,800 \text{ m}^3 \text{ d'où nous pouvons en déduire le volume maximal journalier de biogaz produit :}$$

$$G = V_D - V = 1,159 - 0,800 = 0,359 \text{ m}^3 \text{ soit } 359 \text{ litres de biogaz}$$

Comparative à la méthode empirique (basée sur le graphique ci-dessous), ce volume de gaz attendu vaut environ : $10 \text{ kg} \times 34 = 340 \text{ litres}$

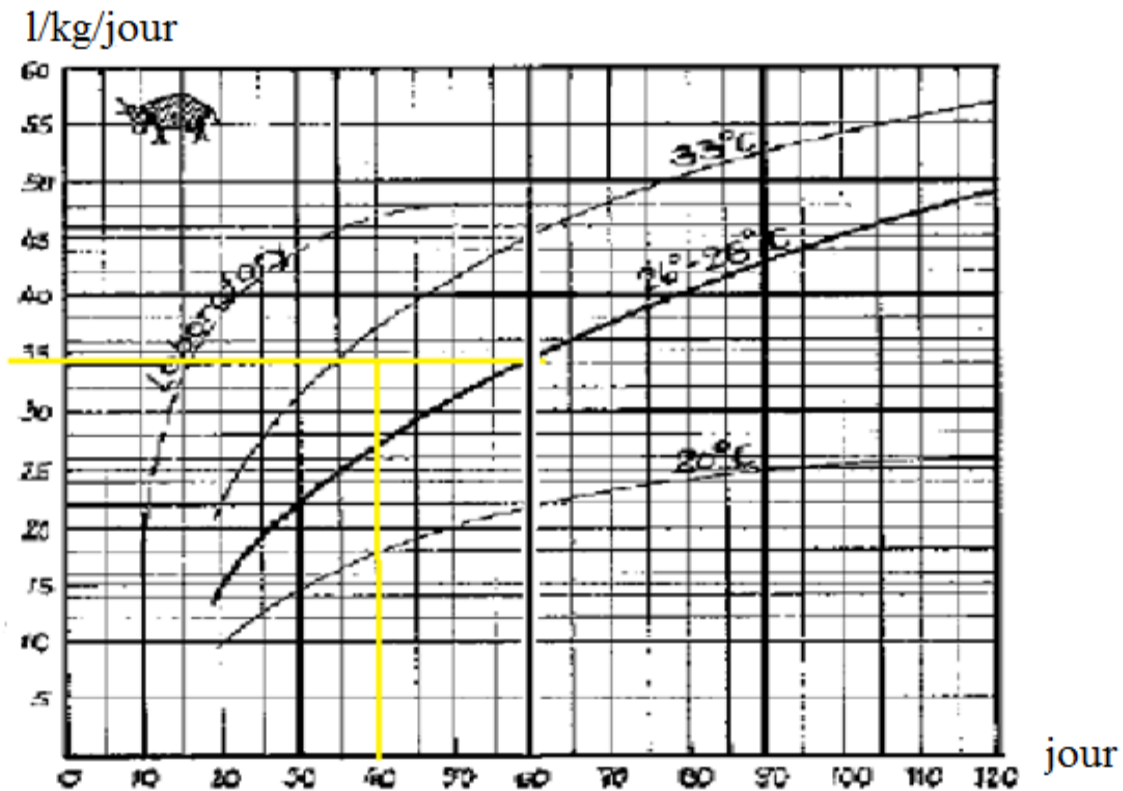


Figure 2. 8: Détermination graphique du volume de biogaz produit par kg de bouse fraîche de vache [15]

Inversement, l'on pourra calculer à partir de l'équation de dimensionnement la masse du substrat à digérer si le volume du digesteur et le ratio du mélange substrat – eau sont connus. Illustrons également cela pour un digesteur de volume 8 m^3 si l'on est en présence de la bouse de vache dans les mêmes conditions que précédemment. Autrement dit, quelle est la masse de bouse à digérer dans un digesteur de 8 m^3 et quelle est le volume du gaz attendu dans les conditions suivantes :

- ✓ Le régime de fonctionnement du digesteur est mésophile la température est de l'ordre de $30\text{ }^\circ\text{C}$;
- ✓ La concentration de la matière organique dans la bouse vaut $C = 10\%$;
- ✓ Le mélange de la bouse et de l'eau se fait suivant le ratio $1 : 1$ (1 litre de bouse fraîche est mélangée et diluée dans 1 litre d'eau) ;
- ✓ Le temps de rétention hydraulique (TRH) est fixé à 40 jours.

Avec l'hypothèse 1kg de bouse correspond à un litre ($\rho_s=1000\text{ kg/m}^3$), et toujours grâce à l'équation (12) on peut procéder de la sorte.

L'équation de dimensionnement (12) nous permet de déterminer la masse du substrat injectée dans le digesteur.

$$\text{A.N : } 8 = \frac{m(1+1)}{1000} \left[40 + \frac{0,2 \times 10 \times 1000}{40(1+1)} \left(1 - \frac{3,693}{40 \times 0,261 - 1 + 3,693} \right) \right]$$

$$8 = 0,116 m \Rightarrow m = \frac{8}{0,116} ; \text{ ce qui donne une masse de } m = 68,965 \text{ kg}$$

$$\text{Le volume utile vaut : } V = \frac{40 \times 68,965 \times (1+1)}{1000} = 5,517 m^3$$

D'où $G = 8 - 5,517 = 2,484 m^3$ soit 2484 litres.

En conclusion, pour un digesteur de $8 m^3$ et pour un mélange d'eau et de bouse suivant le ratio 1:1, il faudra disposer de 68,965 kg de bouses et s'attendre à une production journalière de $2,484 m^3$ de biogaz.

Par la méthode empirique (basée sur le graphique de la figure 2.8), on trouve un volume de gaz d'environ $68,965 \times 34l = 2\,345 \text{ litres}$.

Illustrons également cela pour le digesteur installé sur le site de l'université et dont le volume est de $10 m^3$. Ainsi en présence de bouses de vache dans les mêmes conditions que précédemment, on peut s'amuser à déterminer la masse de bouses à digérer dans ce digesteur de $10 m^3$ et d'en connaître le volume du gaz attendu dans les mêmes conditions que précédemment.

Ainsi :

$$\text{A.N : } 10 = \frac{m(1+1)}{1000} \left[40 + \frac{0,2 \times 10 \times 1000}{40(1+1)} \left(1 - \frac{3,693}{40 \times 0,261 - 1 + 3,693} \right) \right] ;$$

$$10 = 0,116 m \Rightarrow m = \frac{10}{0,116}$$

D'où $m = 86,206 \text{ kg}$ de bouses de vache.

$$\text{Le volume utile vaut : } V = \frac{40 \times 86,206 \times (1+1)}{1000} = 6,896 m^3$$

La production journalière est donc de $G = 10 - 6,896$

On obtient donc $G = 3,104 m^3 / j$ soit 3 104 litres.

La figure 2.9 ci-dessous dressée par le PNB donne un aperçu du dimensionnement fait sur la base du modèle empirique.



Figure 2. 9: Configuration d'un digesteur de 8m3 de volume total

2.3.4 : Evaluation des besoins d'un ménage

Le dimensionnement des digesteurs dépend d'abord et avant tout du volume journalier du biogaz nécessaire pour couvrir les besoins du ménage en cuisson (zone rurale et urbaine) et en éclairage (principalement en zone rurale). Evaluer ce besoin est une activité assez complexe en ceci qu'il est en même temps fonction du type et du nombre des appareils d'utilisation (brûleurs et lampes), du nombre de cuissons par jour, du type de la denrée à cuire, de la taille du ménage, des habitudes alimentaires, etc.

En tout état de cause, l'évaluation du besoin des ménages en biogaz se fera sur la base des estimations suivantes :

- l'évaluation de la demande en biogaz-énergie se fera sur un ménage de 4 membres et sur la base des données énergétiques indiquées sur les appareils d'utilisation et de leur temps journaliers de fonctionnement (200 l/h par foyer du brûleur à biogaz et 140 l/h par lampe à biogaz) ; ceci suppose que ces appareils sont connus d'avance;
- un brûleur à 2 foyers est utilisé et le ménage prend deux repas chauds quotidiennement. Conformément à leur habitude alimentaire, le temps de cuisson est généralement pris entre 11h et 13h et dure en moyenne 1h 30 min, puis le repas est réchauffé en 30 min, entre 18h30 et 19h, la soirée.
- La lampe est utilisée le soir entre 19h et 22h.

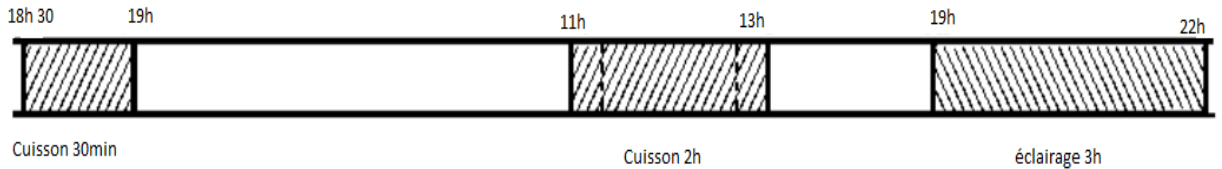


Figure 2. 10: Chronogramme d'utilisation des appareils

Évaluation de la demande journalière du ménage en biogaz

D'abord nous définissons les grandeurs Db et Dl :

Db : Demande du brûleur ou l'énergie consommée par le brûleur durant les 1h 30min pour le repas du midi et 30min le repas du soir.

Dl : Demande de la lampe ou l'énergie consommée par la lampe durant les 3h.

$$G = Db + Dl = [(200 \times 1,5 \times 2) + (200 \times 0,5 \times 2)] + [140 \times 3]$$

$$G = 1220 \text{ litres soit } 1,22 \text{ m}^3 \text{ de biogaz}$$

Dans ces conditions, un ménage de 4 personnes en zone rurale a besoin de $1,22 \text{ m}^3$ de biogaz pour l'éclairage et la cuisson de ses aliments. En zone urbaine, un ménage de même taille en aura besoin un peu moins.

Une fois que nous avons déterminé les besoin d'un ménage de 4 personnes en biogaz nous allons procéder au dimensionnement de l'unité nécessaire pour satisfaire les besoins d'un tel ménage.

Dimensionnement du digesteur correspondant au besoin d'un ménage de 4 personnes

D'après notre hypothèse 1kg de bouse correspond à 1litre ($\rho_s=1000 \text{ kg/m}^3$), ce dimensionnement se fera avec les données ci-dessous.

- ✓ Le régime de fonctionnement du digesteur est mésophile en raison de la température moyenne dans la région qui est de l'ordre de $30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ✓ La concentration de la matière organique dans la bouse vaut $C = 10\%$;
- ✓ Le mélange de la bouse et de l'eau se fait suivant le ratio 1 : 1 (1 litre de bouse fraîche est mélangée et diluée dans 1 litre d'eau) ;
- ✓ Le temps de rétention hydraulique (TRH) est fixé à 40 jours.

Le volume de biogaz (G) étant connu, l'on peut calculer le volume utile (V) du digesteur à partir

de l'équation (3) : $G = P_v \times V = \frac{B_o \times S \times V}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu_m - 1 + K)} \right]$

D'après les équations (2) et (11) ; on calcule la valeur des paramètres (μ_m) et (S)

$$\mu_m = 0,013(30) + 0,129 = 0,261/j$$

$$S = \frac{10 \times 1000}{40 \times 2} = 125 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 0,8 + 0,0016 \ell^{0,06 \times S} = 0,8 + 0,0016 \ell^{\frac{0,06 \times c \times \rho_s}{TRH(1+x)}} = 0,8 + 0,0016 \ell^{\frac{0,06 \times 10 \times 1000}{80}} = 3,693 \text{ (Bouses de vache)}.$$

D'après l'équation (1) :

$$P_v = \frac{B_o \times S}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu m - 1 + K)} \right]$$

$$AN : P_v = \frac{0,2 \times 125}{40} \left[1 - \frac{3,693}{(40 \times 0,261 - 1 + 3,693)} \right] = 0,449 m^3 / m^3$$

$$AN : V = \frac{G}{P_v} = \frac{1,22}{0,449} = 2,717 m^3$$

Dès lors on obtient le volume total du digesteur grâce à l'équation (4) :

$$V_D = V + G = 2,717 + 1,22 = 3,937 m^3 \sim 4 m^3$$

Un digesteur de 4m³ sera donc nécessaire pour un ménage de 4 membres pour 1,22 m³ de biogaz par jour permettant ainsi de couvrir leurs besoins en éclairage (3 heures par jour) et en cuisson (2 heures par jour).

Une fois le volume du digesteur connu, l'on pourra poursuivre en déterminant la masse de bouse correspondante et le nombre de vaches nécessaires à ce ménage.

$$\text{On tire } m \text{ de l'équation (12) : } V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_s} \left[TRH + \frac{B_o \times c \times \rho_s}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right]$$

$$m = \frac{\rho_s \times V_D}{(1+x) \left[TRH + \frac{B_o \times c \times \rho_s}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right]}$$

$$m = \frac{1000 \times 4}{2 \left[40 + \frac{0,2 \times 10 \times 1000}{40 \times 2} \left(1 - \frac{3,693}{40 \times 0,261 - 1 + 3,693} \right) \right]} = 34,501 kg$$

$m = 34,501 kg$ soit 35kg de boues.

Le nombre (n) de vaches nécessaire pour approvisionner ce digesteur est de :

$$n = \frac{35}{10} = 3,5 \text{ vaches}$$

Un digesteur de 4m³ peut être alimenté par (3 à 4vaches) et donc satisfaire les besoins journaliers en cuisson et éclairage d'un ménage de 4 personnes.

Le tableau 2.4 ci-dessous résume les informations de base en rapport avec les différentes dimensions des biodigesteurs selon le nombre de têtes de bœufs, le chargement journalier, le volume utile, le volume total du biodigesteur et ce pour une température égale à 30 °C et un temps de séjour de 40 jours.

Tableau 2. 4: Dimensionnement de quelques digesteurs à partir de nos mesures expérimentales

Volume du digesteur (m^3)	Nombre de personnes dans la famille	Volume utile du digesteur (m^3)	Production journalier (m^3/j)	Chargement journalier (kg)	Nombres de bœufs
4	4	2,717	1,220	34,482	3 à 4
6	5 à 6	4,138	1,862	51,724	5 à 6
8	7 à 9	5,517	2,484	68,965	6 à 7
10	10 à 11	6,896	3,100	86,207	8 à 9
12	12 à 13	8,276	3,724	103,448	10 à 11
14	14 à 15	9,655	4,345	120,689	12 à 13
16	16 à 18	11,034	4,966	137,931	13 à 14
18	19 à 20	12,414	5,586	155,172	15 à 16

Partant de l'équation d'Hashimoto, en utilisant les valeurs expérimentales mesurées au sein de notre biodigesteur qui est mésophile, à savoir la température qui est de l'ordre de 30 °C et un temps de séjour de 40 jours. Nous avons trouvé les valeurs suivantes.

Tableau 2. 5: Etude comparative de nos résultats avec celui du PNB

Volume du digesteur (m^3)	Production journalier (m^3/j)		Chargement journalier (kg)		Nombres de bœufs	
	Nos résultats	PNB	Nos résultats	PNB	Nos résultats	PNB
4	1,220	1 à 1,6	34,482	20 à 40	3 à 4	3 à 4
6	1,862	1,5 à 2	51,724	40 à 60	5 à 6	4 à 6
8	2,484	2 à 2,5	68,965	60 à 80	6 à 7	6 à 10
10	3,100	2,5 à 3	86,207	80 à 100	8 à 9	8 à 10
12	3,724	3 à 3,5	103,448	100 à 120	10 à 11	10 à 12
14	4,345	3,5 à 4	120,689	120 à 140	12 à 13	12 à 14
16	4,966	4 à 4,5	137,931	140 à 160	13 à 14	14 à 16
18	5,586	4,5 à 5	155,172	160 à 180	15 à 16	16 à 18

Le modèle mathématique de Hashimoto nous a permis de dimensionner les digesteurs de volumes variant de 4 à 18 m^3 de volume total, tout en utilisant nos résultats de mesure sur la température et le temps de séjour hydraulique. Les résultats de ce dimensionnement ont été comparés avec ceux du PNB qui sont basés sur le model empirique.

Nous avons constaté qu'il y'a une légère différence entre les résultats trouvés et ceux du PNB et principalement au niveau de la production journalière pour les digesteurs de volumes compris entre 10 à 18 m^3 , ceci peut être expliqué par la différence sur les deux modèles d'études ; en effet l'un est mathématique basé sur des mesures et calcul et l'autre empirique.

Conclusion

Le dimensionnement du volume utile du digesteur a pu être fait sans aucune peine puisque l'équation utilisée à cet effet ($V= Q.TRH$) est universelle au regard de la littérature. Quant-au dimensionnement du gazomètre, l'équation (1) issue du modèle mathématique de Hashimoto a été utilisée avec nos mesures expérimentales pour évaluer le volume spécifique du biogaz attendu. Cette équation a été appliquée d'abord numériquement à titre de vérification et son résultat a été comparé à celui du modèle empirique utilisé par le PNB.

En revanche, nous allons passer au chapitre3 pour faire le bilan (évaluation) de la conception de notre biodigesteur en briques de ciment de volume total de 10 m^3 .

Chapitre 3 : Bilan de conception d'un biodigesteur en briques de ciment

Introduction

Un biodigesteur est une installation composée de trois sous-ensembles : une chambre d'alimentation (entrée), la chambre de fermentation et les sorties.

L'entrée est l'emplacement qui sert à nourrir le digesteur avec de la matière organique composée d'excréments de vache ou tout autre substrat organique mélangés à un même volume d'eau.

Le mélange s'écoule ensuite vers la chambre de fermentation qui est un cylindre surmonté d'un dôme. Il se produit alors une réaction de transformation grâce à des bactéries anaérobiques. Créé par ce processus, le biogaz est stocké dans la partie supérieure du digesteur. Il est conduit vers l'utilisateur (ménage) par un conduit en tuyaux de PVC.

Lorsqu'il est en quantité suffisante, le gaz exerce une pression sur le résidu liquide appelé effluent qui s'évacue alors par la sortie prévue à cet effet (chambre de sortie). L'effluent est ensuite récupéré pour servir de compost dans les jardins.

Un tuyau situé sur la partie supérieure du dôme, sert à fournir la cuisine en gaz et sert à alimenter les lampes à gaz et brûleurs de cuisson.

Au niveau le plus bas de la canalisation qui relie le méthaniseur à la maison, est placée une vanne de purge qui permet l'évacuation de l'eau. Celle-ci s'accumule dans les tuyaux par condensation. Il faut donc la purger une fois par semaine.

3.1 : Choix du site et de l'emplacement

Ces choix sont nécessaires pour le bon fonctionnement d'un digesteur, mais aussi participent à la réduction des frais et simplifient l'opération et nous garantit aussi une assez grande la durée de vie du biodigesteur.

3.1.1 : Choix du site

Le choix du site d'une installation de biogaz doit prendre en considération les critères suivants:

- disponibilité de la matière première (bouse de vache par exemple et eau) ;
- besoins en énergie sous forme de gaz (biogaz) ;
- disposition du bénéficiaire à assurer le fonctionnement de l'installation.

3.1.2 : Choix de l'emplacement

Quant au choix de l'emplacement, ce dernier doit tenir compte des facteurs suivants :

- le niveau piézométrique de l'eau ;
- la consistance du sol ;
- la proximité de la source de matière première : bouse (près de l'étable), eau près d'un point d'eau (mais de façon à éviter leur interférences) ;
- la proximité de la cuisine (réduction des pertes de charge et du coût en plomberie) ;
- endroit ensoleillé (activer le processus de bio méthanisation).

3.2 : Guide de conception d'un digesteur

Un ménage qui souhaite disposer d'un biodigesteur (voir figures 3.1 et 3.2) doit remplir plusieurs conditions afin de garantir le succès de l'implantation et l'utilisation du bio digesteur :

- ❖ Disposer du nombre de têtes d'animaux suffisant pour assurer les chargements initiaux et journaliers. En effet, par exemple, au démarrage d'un biodigesteur dont le digesteur fait 8 m³, une charge d'au moins 3 tonnes de bouses est requise pour son remplissage initial ; par la suite, une charge quotidienne de l'ordre de 80 kg est nécessaire ;
- ❖ Disposer de l'eau nécessaire pour assurer le ratio de mélange;
- ❖ Disposer d'une propriété de terrain (l'ouvrage pouvant faire 20 ans, il est important que le terrain appartienne au ménage) ;

- ❖ Pouvoir installer le biodigesteur le plus proche possible du lieu d'utilisation ;
- ❖ Disposer des ressources financières pour prendre en charge le coût de l'investissement et l'entretien de l'ouvrage. Après la satisfaction de ces conditions, des techniques doivent être prises en compte, telles que l'emplacement de l'ouvrage (l'ombrage, la facilité d'accès, la proximité de l'ouvrage face aux usages ainsi qu'à l'étable, etc.) ;
- ❖ Outillage de maçonnerie :
 - ✓ 1 truelle,
 - ✓ 1 auge,
 - ✓ 1 brouette,
 - ✓ 2 Pelles,
 - ✓ 2 Pioches,
 - ✓ 1 seau de maçon,
 - ✓ 1 fil à plomb,
 - ✓ 1 taloche,
 - ✓ 1 corde de 40m,
 - ✓ 1 niveau à bulles,
 - ✓ 1 scie à métaux,
 - ✓ 1 décamètre,
 - ✓ 1 caisse de dosage,
 - ✓ 1 moule à brique,
 - ✓ 1 moule à couvercle,
 - ✓ baguettes de mesure.
- ❖ Respecter la norme de dosage du béton et du mortier ;
- ❖ La fabrication des blocs de bétons ou briques pour les murs et dalles et dôme.



Figure 3. 1: Photo de la conception d'un bio digesteur



Figure 3. 2: Schéma récapitulatif de conduites de biogaz et accessoires

3.2.1 : Matériels et matériaux pour un biodigesteur

3.2.1.1 : Les équipements périphériques

✓ Les canalisations du gaz

Les matériaux servant aux différents types de canalisation peuvent être en métal galvanisé, en cuivre, en caoutchouc ou en PVC. Par ailleurs, chaque type de matériau a ses avantages et ses inconvénients :

- ✓ Le tuyau en métal galvanisé est disponible en de nombreuses dimensions et présente peu d'incompatibilité avec quelques équipements, ce qui nécessite plus d'adaptateurs ni de réducteurs ;
- ✓ Le tuyau en cuivre est utilisé souvent dans les maisons, il est parfait, mais cher et peut être corrodé par l'hydrogène sulfuré produit par le digesteur ; le caoutchouc résiste peu au soleil ;
- ✓ Le PVC est rigide et intéressant pour le transport du gaz sur les très longs parcours (mais il y'a souvent beaucoup de raccords et leur étanchéité est difficile). Dans les installations rencontrées au Sénégal et sur le site de l'université, les tuyaux en PVC sont souvent utilisés pour le transport du gaz.

Le diamètre des canalisations est un facteur important pour le bon fonctionnement des appareils d'utilisation de gaz. Ce diamètre est déterminé en fonction du débit du gaz, de la longueur des canalisations et de la pression du gaz.

✓ Les pièges à eau

L'eau est contenue en quantité notable dans le biogaz, qu'on peut considérer comme saturé à la sortie du digesteur. L'inconvénient principal est le dépôt de condensats dans les canalisations provoquant d'éventuelles obstructions et favorisant la corrosion. On y remédie aisément par des purges. Ces purges sont installées au niveau des points les plus bas de rupture de pentes (voir figure 3.3).

A la sortie du digesteur, la canalisation est enterrée. Au point le plus bas de la canalisation, on installe un raccord amovible et étanche. De temps à autre, il faudra fermer la vanne principale, détacher le raccord et vider l'eau, puis fermer hermétiquement. Quand l'eau se condense dans la canalisation on le détecte par un bruit sonore lors de l'utilisation d'un appareil (brûleur ou lampe) et par une fluctuation de la

pression au niveau du manomètre quand un appareil est en service. L'apparition de ces signaux indique la nécessité de purger la canalisation.

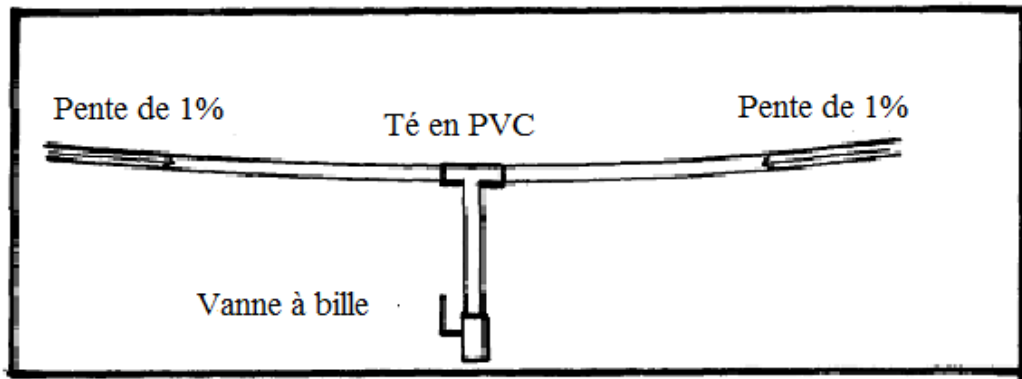


Figure 3. 3: Schéma d'un piège à eau

✓ **Le manomètre**

Un manomètre sert à indiquer la pression du gaz dans l'installation ou au sein de la conduite de gaz. Il existe différents types de manomètres :

- ✓ Les manomètres de tuyau en forme de U (voir figure 3.4) qui sont partiellement remplis d'eau. La pression du gaz est indiquée par la différence de hauteur entre les deux niveaux d'eau dans le tuyau. Une échelle indique la pression en cm de colonne d'eau ;
- ✓ Les manomètres de pression de type industriel fonctionnent avec des ressorts. La pression est indiquée par l'aiguille sur une échelle ronde. Les manomètres sont utilisables seulement pour la gamme de pression indiquée au manomètre. Un changement avec une pression excessive peut détruire le ressort du manomètre. Ce type de manomètre est utilisé pour les tests d'étanchéité et l'ajustage d'un régulateur de pression.

En générale dans les installations de biogaz classiques, seuls les manomètres de tuyau en forme de U sont utilisés.

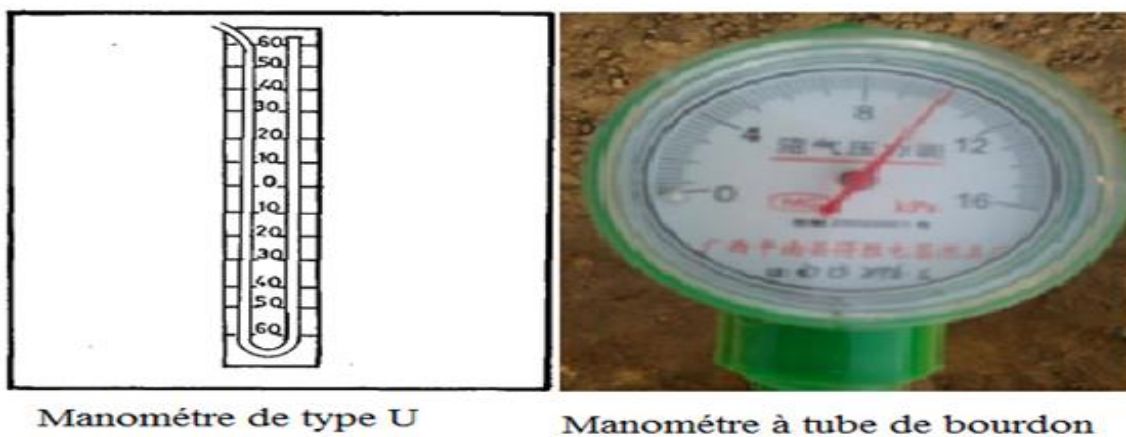


Figure 3. 4: Les types de manomètres

3.2.1.2 : Les équipements d'utilisation du biogaz

✓ Les brûleurs

Les brûleurs utilisables sont les brûleurs atmosphériques. Dans ces brûleurs une partie ou la totalité de l'air nécessaire à la combustion du biogaz est mélangée à ce dernier avant la combustion. L'air admis dans ce brûleur est dit air primaire et l'air fourni à la flamme est dit air secondaire. C'est l'énergie cinétique disponible du biogaz passant à travers un orifice calibré appelé injecteur (gicleur) qui entraîne l'air primaire. Le mélange gaz-air s'effectue dans le corps du brûleur appelé tube de mélange. La combustion se produit sur la tête du brûleur. Pour un biogaz de caractéristiques bien définies, le diamètre de l'injecteur des orifices de sortie et d'ouverture de la bague d'air sont calculés pour assurer une flamme stable dans une plage de puissance la plus large possible. La température de la flamme du biogaz à 60% de CH₄ est de 1 796°C les brûleurs destinés à fonctionner avec le butane sont adaptables au biogaz (voir figure 3.5).

✓ Les lampes



Figure 3. 5: Brûleur a biogaz fabriqué localement

Les lampes à butane habituellement rencontrées en milieu rural sont de simples tubes coudés munis d'un diffuseur, d'une mèche et d'un robinet et de réglage. Leur gicleur peut être facilement alésé à 1mm, les entrées d'air doivent être agrandies et couvertes en partie par une bague coulissante.

Un bon éclairage d'une lampe est obtenu en réglant le débit de gaz (vanne) pour que la combustion se fasse au niveau du manchon.

Les lampes dites chinoises à pétrole (Red Heart en anglais) et piston peuvent donner des résultats de meilleures qualités et demeurent plus robustes (voir figure 3.6).

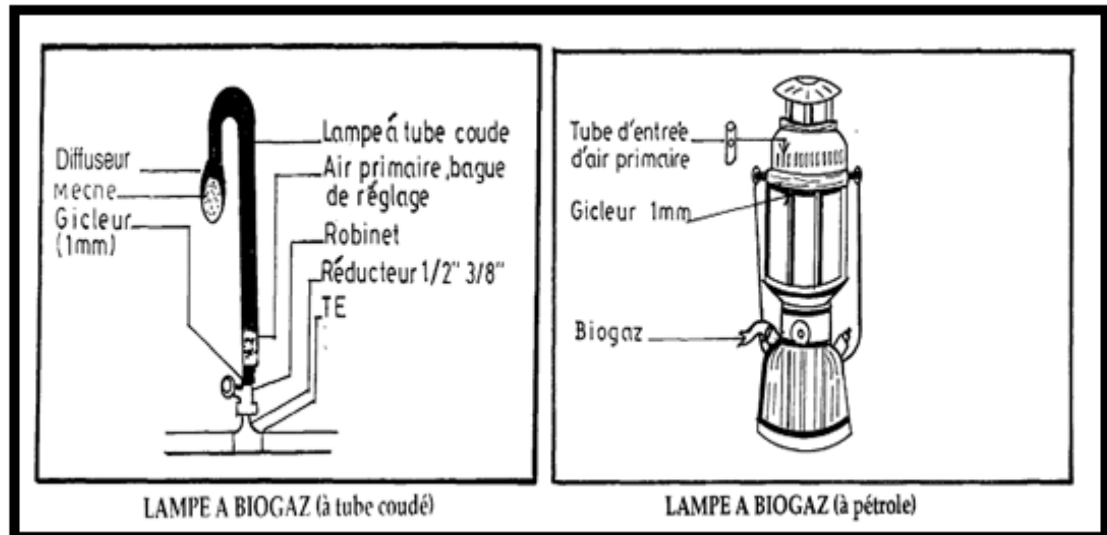


Figure 3. 6: Les types de lampes à biogaz

3.3 : Bilan de la conception ou évaluation du coût d'un biodigesteur de 10 m³

- **Budget pour la construction du biodigesteur de 10m³ de l'université (UASZ)**

Cet exercice qui sert de transition entre la phase technique et la phase financière permet de dégager le coût de l'installation et par conséquent le capital à investir.

Les tableaux 3.1 à 3.3 ci-dessous, nous donnent les informations sur les matériaux, matériels et mains d'œuvre utilisés ainsi que leurs prix pour la conception du biodigesteur de 10 m³ de volume en briques de ciment se trouvant sur le site de l'université.

Le tableau 3.1 ci-dessous résume le matériel et matériaux utilisés nécessaires à la conception d'un biodigesteur de 10 m³. Le coût du dit matériel pour la construction du biodigesteur dans la région de Ziguinchor s'estime à **339 800 Fcfa**.

Tableau 3. 1: Bilan des matériaux de construction et du matériel

Désignations	PNB (Kaffrine)		Université (Ziguinchor)	
	P.U	Montant	P.U	Montant
Collier de serrage en acier galva (6)	100	600	150	900
Colle PVC Para bond - Pot de 125 g (4)	1 500	3 000	1 900	3 800
Coude galva 15/21 (2)	200	800	350	1 400
Coude PVC 25 (10)	200	2 000	350	3 500
Déboursé armatures Ø 8(6)	2 000	12 265	2 300	13 800
Déboursé ciment (34)	4 000	135 499	3 800	129 200
Déboursé peinture acrylique (5)	2 000	10 000	2 200	11 000
Embout fileté PVC 25(7)	200	1 400	300	2 100
Fourniture mixeur métallique (1)	20 000	20 000	25 000	25 000
Lampe à biogaz (5)	10 000	50 000	10 000	50 000
Mamelon galva 15/21 (7)	200	1 400	300	2 100
Manchon galva 40/15 (1)	3 000	3 000	3 200	3 200
Manomètre 16 kPa (1)	3 000	3 000	10 000	10 000
Raccord union galva 15/21 (2)	200	400	300	600
Réchaud à biogaz (2)	15 000	30 000	15 000	30 000
Rouleau téflon (4)	600	2 400	1 925	7 700
T en PVC 25 (5)	200	1 000	300	1 500
Tube galva 40 (1)	3 000	3 000	3 200	3 200
Tuyau galva 15/21 (6)	1 333	8 000	1 400	8 400
Tuyau PVC 110 (6)	1 500	9 000	1 700	10 200
Tuyau PVC 25 (12)	333	4 000	400	4 800
Tuyau PVC flexible (2)	1 300	2 600	1 500	3 000
Vanne à bille 15/21 (4)	2 500	10 000	3 600	14 400
Total général		313 364		339 800

Le tableau 3.2 donne un aperçu de la subvention de l'entreprise fournissant le maçon ainsi que des mains d'œuvre de maçonnerie, de plomberie et de fabrication des agglomérations du biodigester de 10 m³ installé dans local de démonstration de l'université. Le montant des dépenses effectuées est estimé à **399 732Fcfa**.

Tableau 3. 2: Budget des mains d'œuvre

Désignations	Main d'œuvre UASZ		Main d'œuvre PNB	
	P.U	Montant	P.U	Montant
Maçonnerie et plomberie	84 732	84 732	84 732	84 732
Fabrication des agglos	1500	51 000	8 021	8 021
Extraction terre et remblayage	15 000	15 000	15000	15 000
Débroussage (eau, sable et gravier)	102 000	102 000	73 725	73 725
Fouille des fosses de composte et du digester	37 500	37 500	33 536	33 536
Visite maintenance annuelle (2)	15 000	30 000	7 250	14 500
Paiement à l'entreprise qui donne le maçon	65 000	65 000	—	—
Coûts indirects	15 000	15 000	—	—
Total		399 732		229 514

Le tableau 3.3 résume l'ensemble des prix en matériaux de construction, matériel de plomberie, matériaux de construction et main d'œuvre au prix du marché local (à Ziguinchor avec comme boutique témoin Sara Matériaux) et du matériel de cuisson d'éclairage (au prix appliqué par le PNB), nécessaires à la construction d'un biodigesteur de 10 m³. Ce tableau inclue aussi le coût de la main d'œuvre locale.

Tableau 3. 3: Budget total de l'installation y compris la maintenance

Désignation	Montants UASZ (Ziguinchor)	Montants PNB (Kaffrine)
Matériaux de construction et matériel	339 800	313 364
Main d'œuvre	399 732	229 514
Total	739 532	542 878

Nous constatons une différence sur les deux budgets d'investissement d'une somme de 196 654 Fcfa pour l'installation des deux biodigesteurs de 10 m³ de volume, pour celui de l'université Assane Séck de Ziguinchor, nous avons effectué une dépense globale en construction de 739 532 Fcfa alors que pour celui réalisé par le PNB à Kaffrine, le montant s'élève à 542 878 Fcfa.

En étudiant les tableaux issus des données du PNB, nous nous sommes rendu compte que la différence se trouve sur les prix des matériaux; vu que de plus en plus qu'on s'éloigne de Dakar les prix deviennent plus élevés à cause du coût du transport et du fait que la région de Ziguinchor est très enclavée et difficile d'accès surtout par la route. Par ailleurs ces différences s'expliquent aussi dans le fait que la conception du biodigesteur en dehors de la subvention fixée par le gouvernement induit dans notre cas le paiement à l'entreprise ayant louée les services de son maçon le paiement d'une somme de 65 000 Fcfa devant servir à combler le manque à gagner par l'entreprise. Du côté de la main d'œuvre on se rend aussi compte que la main d'œuvre locale fut très chère ceci peut aussi s'expliquer doublement car le projet fut géré par un enseignant-chercheur moins sensible et méconnaissant des coûts de la main d'œuvre locale mais aussi du fait de sa sensibilité vis-à-vis des manœuvres lors des négociations de prix (en effet le biodigesteur de l'université n'est pas conçu à but lucratif mais pour la recherche).

En d'autres termes, cette différence peut être expliquée aussi du fait que tout biodigesteur est unique et la condition standard des régions aussi diffère, l'utilisation des matériaux de construction et du matériel peut être différente de par des matériaux utilisés pour la plomberie (Kaffrine et Ziguinchor, tuyaux en PVC, Matam, tuyaux en galvanisé) adaptée aux conditions climatiques de la région, jouant ainsi sur le coût de ces derniers.

Dans ce qui suit, nous allons étudier les coûts d'investissement de deux types de biodigesteurs (différence dans le type de matériau de construction pour faire les parois) de 10 m³ avec des durées de vies différentes et cela dans deux situations différentes du propriétaire vivant dans une famille de 11 personnes. Le rôle de ces tableaux est de mettre en évidence des conditions de financement différentes pour l'opérationnalisation de ces deux types d'installations chez les populations.

Dans ces tableaux pour tenir compte des fluctuations du prix des matériaux, matériel et matières premières, nous avons tenu compte de la dépréciation monétaire afin de bien estimer à la hausse les charges de construction sur une durée de 5 ans avec un taux de croissance de 20 % ; ce qui permettrait aux investisseurs ou au consommateur de minimiser le risque au cas où il souhaiterait posséder une autre installation dans les 5 ans à venir.

Le tableau 3.9 ci-dessous nous donne le coût d'investissement d'un biodigester de 10 m³ de volume, pour une famille de 11 membres possédant aux moins 8 vaches pour le chargement journalier de 80 à 90 kg de bouses.

Tableau 3. 4: Investissement pour un biodigester de 10m3en brique de ciment

Rubriques	Quantité	Prix Unitaires	Montants Total annuel	CHARGES ANNUELLES AUX DE CROISSANCE DE 20 %				
				Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Achat de matériaux de construction et matériels	1	339 800	339 800	339 800	407 760	489 312	587 174	704 609
Main d'œuvre	1	354 732	354 732	354 732	425 678	510 814	612 977	735 572
Visite technique annuelle	2	15 000	30 000	30 000	36 000	43 200	51 840	62 208
Coûts indirectes	1	15 000	15 000	15 000	18 000	21 600	25 920	31 104
Total Investissement	5		739 532	739 532	887 438	1 064 926	1 277 911	1 533 494

Le tableau montre ainsi un investissement de 739 532 Fcfa la première année s'échelonnant ainsi jusqu'à atteindre la valeur de 1 533 494 Fcfa sur une durée de 5 ans.

Sur la base des données du tableau, nous pouvons donc estimer le coût d'amortissement sur 20 ans du biodigester de 10 m³ en utilisant la formule classique utilisée en économie donnée comme suit :

$$\text{Amortissement} = \frac{\text{Dépenses totales}}{\text{Durée de vie de l'installation}} \quad (1)$$

Le calcul donne un amortissement de 37 000 Fcfa sur les 20 ans de durée de vie du biodigester. Pour le tableau 3.5 c'est le même cas que précédemment mais avec achat de 8 vaches qui pourront assurées les chargements pour la production du biogaz.

Tableau 3. 5: Investissement pour un biodigester en briques de ciment de 10 m3 avec achat de 8 vaches

Rubriques	Quantité	Prix Unitaires	Montants Total annuel	CHARGES ANNUELLES AUX TAUX DE CROISSANCE DE 20 %				
				Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Achat de matériaux de construction et matériels	1	339 800	339 800	339 800	407 760	489 312	587 174	704 609
Main d'œuvre	1	354 732	354 732	354 732	425 678	510 814	612 977	735 572
Visite technique annuelle	2	15 000	30 000	30 000	36 000	43 200	51 840	62 208
Coûts indirectes	1	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
Achat de 8 vaches	8	250 000	2 000 000	2 000 000	2 400 000	2 880 000	3 456 000	4 147 200
Total Investissement	13		2 739 532	2 739 532	3 284 438	3 938 326	4 722 991	5 664 590

On remarque qu'avec en plus l'achat de 8 vaches, l'investissement passe de 739 532 Fcfa à 2 739 532 Fcfa la première année s'échelonnant ainsi jusqu'à atteindre la valeur de 5 680 694 Fcfa sur une durée de 5 ans.

Le tableau 3.11 nous donne le coût d'investissement d'un biodigester en briques d'argile cuite de 10m³de volume pour une famille de 11 membres.

Tableau 3. 6: Investissement pour un biodigester en briques d'argile cuite de 10m3 (sans achat de vaches)

Rubriques	Quantité	Prix Unitaires	Montants Total annuel	CHARGES ANNUELLES AUX DE CROISSANCE DE 20 %				
				Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Achat de briques d'argile cuites	3 000	208	624 000	624 000	748 800	898 560	1 078 272	1 293 926
Achat de matériaux de construction et matériels	1	279 000	279 000	279 000	334 800	401 760	482 112	578 534
Main d'œuvre pour la maçonnerie et l'installation	1	305 037	305 037	305 037	366 044	439 253	527 104	632 525
Visite technique annuelle	2	15 000	30 000	30 000	36 000	43 200	51 840	62 208
Coûts indirectes	1	10 000	10 000	10 000	12 000	14 400	17 280	20 736
Total Investissement	3 005		1 248 037	1 248 037	1 497 644	1 797 173	2 156 608	2 587 930

A la différence du tableau 3.5, l'investissement d'un biodigester en briques d'argile cuite atteint 1 248 037 Fcfa la première année (plus cher que celui en briques de ciment) la première année allant jusqu'à atteindre un montant de 2 587 930 Fcfa en tenant compte des fluctuations de prix.

Enfin avec l'achat de 8 vaches (voir tableau 3.7), ce type de biodigester revient à 3 248 037 Fcfa la première année et peut aller jusqu'à 6 735 130 Fcfa à la cinquième année devenant ainsi plus cher que celui en brique de ciment avec l'achat de 8 vaches du tableau 3.7.

Tableau 3. 7: Investissement pour un biodigester en briques d'argile cuite de 10 m3 (avec achat de 8 vaches)

Rubriques	Quantité	Prix Unitaires	Montants Total annuel	CHARGES ANNUELLES AUX DE CROISSANCE DE 20 %				
				Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Achat de briques d'argile cuites	3 000	208	624 000	624 000	748 800	898 560	1 078 272	1 293 926
Achat de matériaux de construction et matériels	1	279 000	279 000	279 000	334 800	401 760	482 112	578 534
Main d'œuvre pour la maçonnerie et l'installation	1	305 037	305 037	305 037	366 044	439 253	527 104	632 525
Visite technique annuelle	2	15 000	30 000	30 000	36 000	43 200	51 840	62 208
Coûts indirectes	1	10 000	10 000	10 000	12 000	14 400	17 280	20 736
Achat de 8 vaches	8	250 000	2 000 000	2 000 000	2 400 000	2 880 000	3 456 000	4 147 200
Total Investissement	3 013		3 248 037	3 248 037	3 897 644	4 677 173	5 612 608	6 735 130

En outre, en se basant des données économiques [16] portant sur des cultures utilisant des engrais issus des biofertilisants produits par une installation de biodigester, nous avons dressé l'estimation des dépenses et bénéfices générées autour de cet engrais organique.

Ainsi, au-delà de son objectif principal qui est de produire du biogaz tout en améliorant le pouvoir d'achat des consommateurs (santé, éducation et activité génératrice de revenus), le biodigester, constitue indubitablement un bel outil de production d'engrais organique pour :

- ✓ Enrichir les sols ; ce qui contribue ainsi à augmenter les rendements de productions agricoles ;
- ✓ lutter contre la déforestation ;

- ✓ contribuer au développement de l'économie verte et au développement durable par la protection de zones forestières ;
- ✓ développer l'économie solidaire à travers la mise en relation entre les producteurs d'engrais par les biodigesteurs et les détenteurs de terres agricoles ou cultivateurs ;
- ✓ améliorer le pouvoir d'achat des ménages par la création de revenus de subsistance à travers les ventes des produits ;
- ✓ réduire la pauvreté et contribuer au développement local à travers une association entre détenteurs de biodigesteurs, cultivateurs et éleveurs de vaches ;
- ✓ enrichir les espaces verts par l'engrais (diversité des écosystèmes).

Les tableaux 3.13 à 3.14 donnent un aperçu des bénéfices que peut tirer le propriétaire d'un biodigesteur de 10 m³ utilisant le biofertilisant comme engrais dans la production de semences de chou, de tomate, d'aubergine et de gombo.

Tableau 3. 8: Coût d'investissement et revenus sur l'agriculture en maraichage des sols fertilisés

Elements	Chiffre d'affaire estimé des			VENTE ANNUELLE AU TAUX DE CROISSANCE DE 20%				
	Quantité	Prix unitaire CFA	Montant Annuel	Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Semences choix (170m2)	1	3 000	3 000	3 600	4 320	5 184	6 221	7 465
Semences tomate (275m2)	1	4 000	4 000	4 800	5 760	6 912	8 294	9 953
Semences aubergine (175m2)	1	5 000	5 000	6 000	7 200	8 640	10 368	12 442
Semences gombo (200m3)	1	4 500	4 500	5 400	6 480	7 776	9 331	11 197
Eau	1	10 000	10 000	12 000	14 400	17 280	20 736	24 883
Produits phytosanitaires	1	5 000	5 000	6 000	7 200	8 640	10 368	12 442
TOTAUX Chiffre d'affaire mensuelle			31 500	37 800	45 360	54 432	65 318	78 382
REVENUS								
Elements	Chiffre d'affaire estimé des			VENTE ANNUELLE AU TAUX DE CROISSANCE DE 20%				
	Quantité	Prix unitaire CFA	Montant Annuel	Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Choux	1	71 000	71 000	85 200	102 240	122 688	147 226	176 671
Tomate	1	81 000	81 000	97 200	116 640	139 968	167 962	201 554
Aubergine	1	74 000	74 000	88 800	106 560	127 872	153 446	184 136
Gombo	1	145 275	145 275	174 330	209 196	251 035	301 242	361 491
TOTAUX Chiffre d'affaire mensuelle			371 275	445 530	534 636	641 563	769 876	923 851
BENEFICE ANNUEL PREVISIONNEL	0	0	339 775	407 730	489 276	587 131	704 557	845 469

Tableau 3. 9: Tableau récapitulatif des dépenses de conception et des revenus agricoles autour du biodigesteur

Elements	Chiffre d'affaire estimé des			VENTE ANNUELLE AU TAUX DE CROISSANCE DE 20%				
	Quantité	Prix unitaire CFA	Montant Annuel	Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Benefice après récolte (820m2)	1	371 275	371 275	445 530	534 636	641 563	769 876	923 851
TOTAUX Chiffre d'affaire mensuelle			371 275	445 530	534 636	641 563	769 876	923 851
Coût d'investissement pour un biodigesteur de 10m3								
Elements	Chiffre d'affaire de la conception			VENTE ANNUELLE AU TAUX DE CROISSANCE DE 20%				
	Quantité	Prix unitaire CFA	Montant Annuel	Année_1	Année_2	Année_3	Année_4	Année_5
Coûts d'un biodigesteur	1	739 532	739 532	887 438	1 064 926	1 277 911	1 533 494	1 840 192
TOTAUX Chiffre d'affaire mensuelle			739 532	887 438	1 064 926	1 277 911	1 533 494	1 840 192
BENEFICE ANNUEL PREVISIONNEL			368 257	441 908	530 290	636 348	763 618	916 341

A la vue du tableau 3.9, nous voyons que pour un investissement de 739 532 Fcfa, le propriétaire d'un biodigesteur de 10 m³ en briques de ciment, valorisant le biofertilisant produit en cultivant du chou, de la tomate, des aubergines et du gombo peut amoindrir fortement ces dépenses

annuelles en gagnant 441 908 Fcfa première année soit un amortissement dès la première année d'exploitation de 368 257 Fcfa.

Les revenus comme tous bénéfiques serviront à améliorer les conditions de vie des ménages. Ils vont pouvoir grâce à leurs revenus améliorer leur santé, le niveau éducatif des enfants et même du propriétaire en techniques d'amélioration et d'exploitation de ses terres et activités lucratives. De même, cela contribuerait à la mise en place d'association entrepreneuriale.

Par ailleurs pour bien mesurer l'impact du biodigester sur l'environnement, nous avons aussi effectué des enquêtes auprès des familles de 11 membres sur les types d'énergies utilisées et leur quantité par mois. Cela nous a permis de connaître leur consommation annuelle pour afin calculer leurs dépenses sur cette énergie durant 20ans ; durée de vie d'un biodigester en briques de ciment. Le tableau ci-dessous, nous donne les informations sur les différents types d'énergies utilisées et leurs modes de consommation pour la famille de 11 membres.

Tableau 3. 10: *Enquête sur la consommation des énergies fossiles pour la famille de 11 membres*

Types de combustibles énergies utilisés	Dépense par mois Fcfa	Dépense en 20 ans Fcfa
Dépenses en bouteille de gaz	10 800	2 592 000
Dépenses en charbon	10 500	2 520 000
Dépenses en charbon et bouteille de gaz	10 600	2 544 000
Dépenses totale de construction d'un biodigester avec achat de 8 vaches	2 750 837	

Cette situation s'explique par de faibles augmentations (faibles coûts de transport et offre de produits combustibles diversifiée) des combustibles classiques chez les populations urbaines et une grosse fluctuation de ces dernières chez les populations rurales enclavées et ayant un accès difficile à une offre de produits combustibles diversifiée.

Ce tableau montre clairement une différence à l'avantage des autres combustibles, cependant avec la fluctuation des prix et le coût du transport de ces produits, nous pouvons nous attendre à une meilleure rentabilité côté biogaz car en plus le bénéficiaire peut générer d'autres revenus via le biofertilisant produit. Par ailleurs, l'impact sur l'environnement constitue aussi un atout majeur dans l'utilisation du biogaz. La figure 3.6 illustre bien l'équivalent de ce type de combustible (biogaz \equiv méthane, fumier) et montre la capacité de ce combustible à se substituer positivement aux différentes énergies fossiles communément rencontrées.

C'est dans cet optique que nous voulons préparer les populations sur les risques des déforestations mais aussi sur le boum pétrolier à venir en leur présentant des énergies propres de type biogaz ; auxquelles elles pourront accéder en valorisant leurs déchets organiques, leurs déchets agricoles et d'origine animale etc...



Figure 3. 7: Le méthane comparé aux autres sources d'énergies: selon l'ABC de la méthanisation agricole

Conclusion

En définitive, faire le bilan de la conception revient à lister les prix des matériaux et matériels nécessaires pour la conception du biodigester pour afin donner le coût total de l'installation. Les études nous ont montré que pour la conception d'un biodigester de $10m^3$ de volume total, il nous faut une somme de 739 532 Fcfa pour couvrir les dépenses de matériaux, de matériel et de la main d'œuvre ouvrière, avec un coût d'amortissement sur 20 ans de 37 000 Fcfa/an pour un ménage qui aimerait acquérir dans 20 ans un autre biodigester de $10 m^3$ de volume. L'analyse faite montre aussi que l'utilisation d'un biodigester, est plus avantageuse et moins coûteux par rapport à l'utilisation des combustibles fossiles.

Conclusion générale et perspectives

Le développement du biogaz domestique est une approche fédératrice des secteurs de l'environnement, de l'élevage, de l'agriculture et de l'énergie permettant aux bénéficiaires de la technologie de disposer d'un outil de développement durable en plus de l'énergie obtenue. Force est de reconnaître que l'adoption des biodigesteurs par les ménages des pays en voie de développement doit encore faire face à des facteurs freinant, autant financiers que socioculturels (par exemple l'utilisation des excréments humains pose un réel problème au Sénégal).

Les paramètres mesurables pour les unités de méthanisation et les technologies de traitement du biogaz sont nombreux. Il y a cependant encore un certain nombre de paramètres qui ne sont pas mesurés in situ et en temps réel. Dans certains cas, ceci se rapporte à des difficultés analytiques, dans d'autres, c'est en raison de l'entretien important et des coûts élevés. Ces paramètres de contrôle clés ont été choisis par des experts, sur base de R&D et d'expériences pratiques en digestion anaérobie et d'unités de méthanisation. Différents paramètres de surveillance peuvent s'appliquer selon l'objectif de l'unité de méthanisation et de traitement du biogaz, si le contrôle doit être effectué, le type et les caractéristiques des substrats utilisés, le type de technologie de conversion et les marchés du digestat et le biométhane produit.

Les équations mathématiques issues du modèle de Hashimoto ont permis de dimensionner le gazomètre et ensuite le biodigesteur de l'installation expérimentale sise à l'université. La grandeur apparente du volume des biodigesteurs trouve désormais sa justification dans cette étude et pourra contribuer à ramener ceux qui doutaient encore.

En somme, cette biotechnologie multifonctionnelle peut concourir à la lutte contre certains fléaux (déforestation, déboisement, changements climatiques et pauvreté). Elle peut satisfaire à coup sûr les besoins énergétiques et domestiques (cuisson, éclairage) tout en assurant la fertilité des sols donc le maintien de l'équilibre écologique et par conséquent la conservation de la biodiversité avec un coût plus ou moins abordable. En effet, pour un digesteur de 10 m³ de volume total, les dépenses s'élèvent à 739 532 Fcfa et peut couvrir les besoins énergétiques d'une famille de 11 membres (en cuisson et éclairage), s'ils ont 8 vaches pour un chargement journalier de 80 à 90 kg de bouses par jour, avec un coût d'amortissement sur 20 ans de 37 000 Fcfa/ans pour un biodigesteur conçu en briques de ciment.

La biotechnologie de la digestion anaérobie fait partie des technologies nouvelles et renouvelables, non polluantes, décentralisées, conduisant à la production autonome d'énergie. Bref, elle contribue énormément non seulement à l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), mais surtout à un développement durable.

Dès lors, des discussions doivent être menées afin de déclencher les réflexions à même temps de sensibiliser et d'orienter les programmes politiques des décideurs gouvernementaux en faveur de cette forme de biotechnologie (comme cela est déjà amorcé au Sénégal avec le PNB). En perspectives, vue l'abondance de l'argile dans cette région de la Casamance, nous envisageons de finir la conception du second biodigesteur en briques d'argile, faire le dimensionnement, évaluer les coûts et amortissements sur une durée de vie de 35ans afin de le comparer avec celui en briques de ciment avant sa diffusion auprès des populations de la région de Ziguinchor et au-delà dans le Sénégal.

Aussi, il serait souhaitable de travailler plus avec des proportions de résidus de pommes de Faire une étude du coût des matériaux de construction et matériel dans les régions de Ziguinchor, Sedhiou, Kolda, Tambacounda afin de proposer les coûts d'investissement pour chaque zones géographique donnée et ainsi mieux adapter la subvention accordée par le gouvernement dans la construction des biodigesteurs via le PNB mais aussi d'aider l'optimisation des projets de développement communautaires.

REFERENCES

- [1] Alexis Mottet (2009). Recherche d'indicateurs de biodégradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile : Application aux boues secondaires d'épuration non traitées et prétraitées thermiquement, thèse de Doctorat, Montpellier II.
- [2] Kerroum Derbal (2012). Digestion anaérobie des déchets solides mélanges avec les boues des stations d'épurations, thèse de Doctorat Constantine.
- [3] Vedrenne F. (2007). Etude des processus de dégradation anaérobie et de production de méthane au cours de stockage des lisiers, Thèse de doctorat, science de l'environnement, ENSAR- Rennes.
- [4] Effebi K. R. (2009). Lagunage anaérobie : modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie, Thèse de doctorat, Sciences et gestion de l'environnement, Université de Liège.
- [5] Jonathan HESS (2007). Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation, thèse de Doctorat Université de Nice.
- [6] Ghattas D. (2004). Valorisation des margines par digestion anaérobie, Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en contrôle et gestion de la qualité, « application à l'agroalimentaire », Université Libanaise (UL).
- [7] Ricard M. A. et al (2010). Développer un cadre d'analyse et identifier l'intérêt technico-économique de produire du biogaz à la ferme dans un contexte québécois (Rapport final) Centre de développement du porc du Québec inc.
- [8] Al Seadi T. Rutz D. Pressl H. Köttner M. Finstarwalder T. Volk S et Janssen R. (2008), biogas handbook, University of southern Danemark.
- [9] Fulford D. (1998). Running a Biogas Programme: A handbook, Intermediate Technologie Publications, London, UK.
- [10] Dana R. (2010). Micro-Scale Biogas Production : A Beginners Guide.
- [11] Amahrouch A. (2010). Le biogaz, Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), Royaume du Maroc.
- [12] Tou I., Igoud S. et Touzi A. (2001). Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales, Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse, (2001) 103-108, Laboratoire de Biomasse, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger.
- [13] Wikan W. T. Asari A. Ana N. et Elita R. (2009). Design and development of Biogas Reactor for farmer group scale, Indonesia Journal of Agriculture (2), 121 – 128.
- [14] Sallustro J. L. (2009). Fiche n° 10 - Traitement anaérobie des déchets organiques, Programme régional pour la Gestion durable des zones Côtières des pays de l'océan indien/ Regional Programme for the sustainable Management of the Costal zones of countries of the indian ocean (ProGeCo/ReCoMAP).
- [15] Youssef Abarghaz (2013). Promotion des techniques d'assainissement écologique rural à des fins de valorisation des eaux usées, Thèse de Doctorat, Université Mohammed V-AGDAL.
- [16] Bassirou Sarr, PNB, 2014. Contribution du biodigesteur sur les transformations des exploitations familiales. (FIARA2014) Foire Internationale de l'Agriculture et des Ressources Animales.

