



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE BIOMETHANISATION

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER SPECIALISE EN GENIE ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES (GEER)

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

Présenté et soutenu publiquement le 11/11/2011 par

Philippe NJAMPOU

Travaux dirigés par : Didier LECOMTE

Enseignant, Chercheur

UTER ----

Jury d'évaluation du stage :

Président : Yao AZOUMAH

Membres et correcteurs : Daniel YAMEGUEU
Madi GOUNDIAM
Xavier COLLARD

Promotion [2010/2011]

REMERCIEMENTS/DEDICACES

Qu'il me soit permis de remercier :

- Tous les enseignants de la fondation 2IE pour leur apport sur le plan cognitif et surtout pour la qualité de la formation. Je m'en voudrais de ne pas citer : Dr. Joël BLIN, Dr. Yohan RICHARDSON, M. Parfait TATSIDJODOUNG, co-auteurs du cours de Biomasse Energie ; M. Frédéric TRAORE et Mme ETOBE Eliane Téclaire, respectivement responsable et tutrice du cours de Gestion Financière de Projet ; Dr. Yao AZOUMAH, responsable du cours de Solaire Thermique ; Pr. Zacharie KOALAGA, auteur du cours d'Electricité Solaire Photovoltaïque ; M. Ibrahima NIANE, responsable du cours de Comptabilité et Planification Energétique. Le vide que j'accusais dans le domaine énergétique et qui m'a poussé à prendre une inscription au 2IE a été comblé par ces enseignants.
- M. Didier LECONTE, mon tuteur académique ;
- Madame OUEDRAOGO Sylvie, Assistante de Coordination des Master spécialisés en Génie Electrique, Energétique et Energies Renouvelables (GEER) ;
- Tous mes camarades de promotion pour les échanges fructueux durant la formation et en particulier pour les travaux d'équipe
- Ma petite famille pour son soutien financier et affectif durant cette formation ;
- Madame le Délégué et tous les employés du GIC-AgroPastoral A2-PEV-D2 pour leur franche collaboration durant le Stage par nous effectué dans cette structure ;

Je témoigne également ma gratitude à Pr. César KAPSEU (ENSAI, Université de Ngaoundéré au Cameroun), personnalité ressource consultée durant ce labeur.

Je dédie ce travail à tous les artisans du développement durable.

RESUME

L'objet du présent projet consistant au "**dimensionnement d'une installation de biométhanisation**", un cadre d'analyse technico-économique a été développé afin de vérifier l'intérêt pour les familles de produire leur propre biogaz. Un ménage de 5 membres a été retenu comme échantillon pour cette étude.

Des analyses tirées de la littérature ont permis d'appréhender davantage le processus de méthanisation. Une étude technique sommaire a montré que des réservoirs ou bidons industriels en PVC pouvaient être utilisés comme digesteurs dans ces installations à l'échelle familiale.

Après avoir évalué les besoins en biogaz du ménage échantillon, le modèle mathématique de Hashimoto a permis de dimensionner le gazomètre à 1,2 m³. Le volume utile du digesteur a été dimensionné à 4,8 m³ et la quantité de substrat nécessaire pour l'alimenter au quotidien à 40 Kg. Le ratio du mélange substrat – eau était de 1 : 1. Pour ce volume et pour le modèle physique proposé, la hauteur de la conduite d'alimentation a été dimensionnée à 1,532 m et le diamètre de la conduite à biogaz à 12,5 mm.

Sur le plan micro-économique, deux scénarii ont été retenus pour juger de la pertinence du projet sur une période de 10 ans :

- Le premier scénario ciblé sur les populations rurales a analysé pour eux, la possibilité de substituer par du biogaz, le bois de chauffe et le pétrole lampant utilisés respectivement pour la cuisson et l'éclairage.
- Le second scénario ciblé quant-à lui sur les populations urbaines, a analysé la possibilité de remplacer le GPL qu'utilisent les citadins pour leur cuisson par du biogaz qu'ils auraient eux-mêmes produit grâce à leurs OM.

Cette analyse financière a montré des conclusions plutôt mitigées : le projet ne peut être rentable que dans le cas du second scénario et à condition que le ménage dispose d'environ 40 Kg de substrat au quotidien.

Compte tenu du retard qu'accuse le Cameroun dans le domaine de la biométhanisation, et considérant de nombreux intérêts que procurent cette biotechnologie sur le plan sociétal, des recommandations ont été faites aux pouvoirs publics pour qu'ils s'y impliquent de plus en plus.

Mots clés :

Biogaz ; biométhanisation ; digesteur ; dimensionnement ; rentabilité ; substrat.

ABSTRACT

The purpose of this project consisting in the "sizing of an installation of anaerobic digestion", a framework of techno-economic analysis has been developed in order to check the interest for the families to produce their own biogas. A household of 5 members was chosen as a sample for this study.

With analyzes from the literature have enabled better to grasp the process of anaerobic digestion. A summary technical study showed that tanks or cans in industrial PVC could be used as digesters in these installations to the level of the family.

After assessing the needs in biogas for the household sample, the mathematical model of hashimoto has enabled to size the Gasholder to 1.2 m³. The useful volume of the biogas plant was sized to 4.8 m³ and the amount of substrate needed to feed it on a daily basis to 40 kg with a mixture with water following the ration 1:1. For this volume and the physical model proposed, the height of the feed pipe was sized to 1.532 m and the diameter of the biogas pipe to 12.5 mm.

On the micro-economic, two scenarios were selected for judging the relevance of the project over a period of 10 years:

- The first target timeline on the rural populations has analysis for them, the possibility to substitute by biogas, the fuel-wood and kerosene oil respectively used for cooking and lighting.
- The second scenario target for him on the urban populations, has analyzed the possibility of replacing the LPG that use the urban dwellers for their cooking by the biogas that they would have produced thanks to their household garbage.

This financial analysis has shown rather mitigated conclusions: the project can be profitable only in the case of the second scenario, on condition that the household has around 40 kg of substrate daily.

Considering the delay that is accused by Cameroon in the field of anaerobic digestion, and taking into account interests provided by this biotechnology on the corporate plan, recommendations were made for public authorities so that they more get involved.

Keywords:

Biogas; Anaerobic Digestion; Biogas Plant; sizing; profitability; substrate.

LISTE DES ABREVIATIONS

AGLC	Acide Gras à Longue Chaîne
ARTI	Appropriate Rural Technology Institute
DCO	Demande Chimique en Oxygène
ER	Energies Renouvelables
GIC AgroPastoral A2-PEV-D2	Groupe d'Initiative Commune AgroPastoral pour l'Autosuffisance Alimentaire, la promotion des énergies Vertes et le développement durable
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
IAA	Industrie Agro-Alimentaire
IP	Indice de Profitabilité
MO	Matière Organique
OM	Ordures Ménagères
PNB-BF	Programme national de biodigesteurs du Burkina Faso
PVC	PolyChlorure de Vinyle
SPAg	Service de la Production Agricole
SPAn	Service de la Production Animale
SPEV	Service de la Promotion des Energies Vertes
STEP	Station d'Épuration
TRI	Taux de Rendement Interne
VAN	Valeur Actuelle Nette

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS/DEDICACES	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
I. INTRODUCTION	5
II. OBJECTIFS DU TRAVAIL	8
2.1. Objectif global	8
2.2. Objectifs spécifiques	8
III. MATERIELS ET METHODES	9
3.1. Faisabilité technique	9
3.1.1. Etat des connaissances sur la biométhanisation	9
3.1.1.1. Définition de la biométhanisation	9
3.1.1.2. Les étapes de la digestion anaérobie	10
3.1.1.3. Potentiel méthanogène des substrats	12
3.1.1.4. Paramètres d'optimisation de la méthanisation	13
3.1.1.5. Inhibiteurs de la méthanisation	16
3.1.1.6. Différents types de digesteurs	17
3.1.2. Dimensionnement de l'installation	19
3.1.2.1. Equations de dimensionnement du gazomètre	20
3.1.2.2. Equations de dimensionnement du réservoir	21
3.1.2.3. Equations de dimensionnement des conduites pour l'entrée du substrat et pour la sortie de l'effluent	22
3.1.2.4. Equations de dimensionnement de la conduite à biogaz	22
3.2. Faisabilité financière du projet	23
3.2.1. Collecte des données sur les ménages	23
3.2.2. Les critères d'évaluation de la rentabilité du projet	23

IV. RESULTATS.....	25
4.1. Résultats issus de la faisabilité technique	25
4.1.1. Présentation du type de digesteur choisi.....	25
4.1.2. Evaluation des besoins en biogaz et dimensionnement du digesteur correspondant.....	27
4.1.2.1. Vérification et validation de l'équation de dimensionnement.....	27
4.1.2.2. Evaluation du besoin des ménages en biogaz	29
4.1.2.3. Dimensionnement du digesteur correspondant.....	30
4.1.2.4. Dimensionnement des conduites pour l'entrée du substrat et la sortie de l'effluent	31
4.1.2.5. Dimensionnement de la conduite à biogaz	31
4.1.3. Matériels requis et évaluation du coût de l'installation.....	32
4.1.3.1. Matériels requis	32
4.1.3.2. Evaluation du coût de l'installation.....	33
4.2. Résultats issus de l'étude de faisabilité financière	34
4.2.1. Résultats des données collectées sur les ménages	34
4.2.2. Evaluation de la rentabilité du projet.....	35
4.2.2.1. Evaluation de la rentabilité du projet pour le premier scénario.....	35
4.2.2.2. Evaluation de la rentabilité du projet pour le second scénario	37
V. DISCUSSION ET ANALYSES	39
5.1. Analyses et discussion des résultats issus de la faisabilité technique	39
5.2. Analyses et discussion des résultats issus de la faisabilité financière	40
VI. CONCLUSION	42
VII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES	43
7.1. Recommandations.....	43
7.2. Perspectives.....	43
BIBLIOGRAPHIE.....	45
ANNEXES	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Estimation des potentiels méthanogènes des divers substrats végétaux et déjections.....	13
Tableau 2 : Températures d'opération pour chaque type de digesteur selon les auteurs.....	17
Tableau 3 : Définitions et unités des paramètres utilisés dans les équations	20
Tableau 4 : Matériaux autorisés dans les digesteurs de biométhanisation.....	25
Tableau 5 : Calcul du diamètre de la conduite à biogaz	32
Tableau 6 : Evaluation du coût de l'installation	34
Tableau 7 : Echancier des cash-flows (premier scénario).....	36
Tableau 8 : Valeur Actuelle Nette (premier scénario)	36
Tableau 9 : Echancier des cash-flows (second scénario).....	37
Tableau 10 : Valeur Actuelle Nette (second scénario)	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les étapes de la digestion anaérobie et les produits correspondants.....	11
Figure 2 : Histogramme du potentiel méthanogène des matières organiques	12
Figure 3 : Influence de la température sur la digestion anaérobie	14
Figure 4 : Influence du pH sur la digestion anaérobie	15
Figure 5 : Configuration des digesteurs à gazomètres combinés	19
Figure 6 : Proposition d'un modèle physique de digesteur, réservoir de 3m ³	26
Figure 7 : Détermination graphique du volume de gaz produit par Kg de bouse fraîche de vache	28
Figure 8 : Chronogramme d'utilisation des appareils.....	30
Figure 9 : Schéma hydraulique de l'installation	33

I. INTRODUCTION

Face à l'épuisement programmé des ressources énergétiques fossiles et compte tenu du contexte actuel de la lutte contre les changements climatiques, les énergies renouvelables (ER) représentent un enjeu de plus en plus croissant. De toutes ces énergies, celles résultant de la biométhanisation 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 déjections animales 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.

Si certains pays de l'Afrique sub-saharienne, particulièrement ceux de l'Afrique de l'ouest, de l'Afrique de l'Est et de l'Afrique australe possèdent déjà une longue expérience dans ce domaine, la filière se cherche encore en Afrique centrale et au Cameroun où l'on est encore au niveau de sensibilisation et de la promotion des projets portant sur la construction des biodigesteurs (A titre d'illustration on pourra citer pour le Cameroun l'étude portant sur les projets de mise en place de 23 biodigesteurs en six mois contre le Programme national de biodigesteurs du Burkina Faso (PNB-BF) qui ambitionne 10 000 biodigesteurs dans 3 ans !)¹.

La réussite de ces paris passe nécessairement par la sensibilisation et la formation des principaux acteurs chargés de leur mise en œuvre.

Il s'agit là entre autres de certaines des missions du GIC agropastoral A2-PEV-D2 basée dans la région de l'Adamaoua au Cameroun. Ce GIC accompagne l'Etat camerounais dans les programmes de développement en s'attendant sur le bien être des populations à travers certains de ses services à eux offerts dans le domaine de la production agricole (SPA_g), de la production animale (SPA_n) et de la promotion des énergies vertes (SPEV).

¹ Riaed 2010

Pour revenir au centre de cette étude à savoir le "dimensionnement d'une installation de biométhanisation", plusieurs auteurs ont développé des méthodes empiriques de dimensionnement où l'estimation du biogaz produit est obtenue sur la base des expériences de laboratoire. La littérature est peu riche sur les modèles mathématiques d'estimation de la quantité du biogaz produit dans les fermenteurs. Néanmoins, quelques modèles cinétiques ont été développés pour décrire le processus de la fermentation anaérobie et ensuite pour estimer la quantité du biogaz produit. Le modèle de Monod qui présente une relation hyperbolique entre la vitesse de croissance exponentielle des micro-organismes et la concentration des substrats. Ce modèle peut être utilisé pour déterminer le taux d'utilisation du substrat et le volume du biogaz cumulé produit à travers les équations (1) et (2) ci-dessous (Nagamani B. et al (2003) ; Girault R. (2009)) :

$$U = U_m \frac{S}{K_S + S} \quad (1)$$

Où U représente le taux d'utilisation du substrat

U_m le taux d'utilisation maximale du substrat

S la charge volumique en substrat

Et K_S la concentration en substrat lorsque ou U vaut $U_m/2$ (constate de demi saturation)

$$V(t) = V_m \times \frac{t}{1+t/K_S} \quad (2)$$

Où t est le temps écoulé depuis la dernière alimentation du fermenteur.

Un autre modèle connu sous le nom du modèle cinétique du premier ordre permet de déterminer ce même volume de biogaz à travers la relation mathématique (3) suivante (Milan Z., 2003):

$$G = G_m(1 - e^{-K_0 t}) \quad (3)$$

Où G est le volume du biogaz cumulé pour un temps t donné en jour, G_m est le volume maximal cumulé pour un temps de digestion infini et K_0 est une constate cinétique apparente exprimé en (jour^{-1})

Les limites de ces modèles résident sur le fait que l'ensemble des paramètres cinétiques qu'ils utilisent sont insuffisants pour décrire biologiquement le processus en terme de temps de rétention hydraulique et aussi que l'obtention de ces paramètres cinétiques est impossible pour certains substrats complexes. Le modèle développé par Hashimoto vient résorber ces limites et permet de

calculer la production volumique du biogaz à travers l'équation (4) ci-dessous (Coudure R. et al 1997 ; Nagameni B. et al 2003 ; Wikam W. T. et al 2009):

$$P_v = \frac{B_0 \times S}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu_m - 1 + K)} \right] \quad (4)$$

Où P_v est la production spécifique, B_0 est le potentiel de production du méthane pour le substrat, TRH le temps de rétention hydraulique, S la charge volumique en substrat, K est la constante d'inhibition qui est spécifique pour un substrat donné et pour un consortium bactérien et enfin μ_m le taux de croissance maximal des microorganismes.

PROBLEMATIQUE

Près de 60%² de la population camerounaise est rurale et vit essentiellement des produit de leur agriculture et de l'élevage. L'accès aux sources d'énergies de chauffage et de cuisson autre que le bois leur est difficile ce qui pose le problème de déboisement et par conséquent les problèmes de changement climatique. Par ailleurs moins de 15%² de cette population a accès à l'électricité ce qui a pour conséquence de les renvoyer à l'utilisation du pétrole lampant pour leur éclairage.

Dans les trois régions septentrionales du Cameroun l'élevage dominant est celui des bovins ; les cheptels se déplacent à longueur de journée dans la recherche des pâturages. Au cours de leur déplacement, ceux-ci défèquent dans la nature ce qui pose à la longue, un problème de santé publique pendant la grande et dure saison sèche (cf. annexe 1).

La population des éleveurs est une population nomade ce qui pose un problème d'investissement dans les infrastructures fixes de collecte des déjections bovines ; Il faut penser à un autre mode de collecte.

Aussi bien en zones urbaines qu'en zones rurales, d'importants résidus des abattoirs municipaux sont directement rejetés dans la nature sans aucun traitement, ce qui constitue une source de nuisance (mauvaises odeur) pour les populations environnantes (cas du quartier Baladji II à Ngaoundéré, Etoudi à Yaoundé, Abattoir à Ebolowa, quartier Tchumo Aaron à Melong ...).

Dans les régions urbaines camerounaises, la gestion d'ordures ménagères a toujours posé un problème sérieux dans diverses municipalités. L'expérimentation du trié des ordures avant leurs dépôts dans les poubelles municipales dédiées à cet effet n'a jamais connue de succès car les citoyens n'y trouvent en cela aucun intérêt direct.

C'est pour répondre à ces préoccupations que le GIC agropastoral A2-PEV-D2 se propose d'apporter sa contribution si modeste soit elle, à la résolution de cette problématique d'ordre énergétique, sanitaire et environnemental.

² Agence d'électrification rurale du Cameroun www.club-er.org

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL

2.1. Objectif global

L'objectif général de ce travail vise à :

- amener les populations rurales à valoriser le potentiel énergétique de leurs bassins agro-pastoraux dans le respect des normes environnementales et à diminuer leur dépendance énergétique dans la consommation du bois de chauffe et du pétrole lampant.
- Préparer les populations urbaines sur le boum pétrolier à venir en leur présentant des énergies propres de type biogaz auxquelles elles pourront accéder en valorisant leurs ordures ménagères (OM).

2.2. Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre l'objectif global formulé dans le paragraphe ci-dessus, l'exécution des objectifs spécifiques suivants sera nécessaire :

- Mener une étude de faisabilité technique de la valorisation de la biomasse en vue d'obtenir du biogaz, énergie alternative pouvant remplacer les combustibles classiques utilisés dans les ménages.
- Mener une étude de faisabilité financière de type sommaire qui permettra de juger de la pertinence dudit projet.

III. MATERIELS ET METHODES

La démarche va consister au niveau de la faisabilité technique, à exploiter l'état des connaissances sur la biométhanisation pour choisir un type de digesteur à même de répondre à la problématique exposée ci-dessus. Un ménage de 5 membres sera retenu comme échantillon pour cette étude (cf. annexe 4). Par la suite il sera question de procéder au dimensionnement de l'installation et d'inventorier le matériel nécessaire pour sa mise en œuvre.

Au niveau de la faisabilité financière, après évaluation du coût de mise en œuvre de l'installation, les critères de choix des investissements basés sur l'actualisation seront utilisés pour l'analyse de la rentabilité de ce projet. Deux scénarii seront retenus pour mener cette étude : le premier s'intéressera aux populations rurales et mettra en compétition l'ensemble bois de chauffe, pétrole lampant et le biogaz. Le second opposera, le biogaz au GPL utilisé pour la cuisson en zone urbaine. En fonction des résultats obtenus, des recommandations seront faites aux différents acteurs afin de les orienter. Mais auparavant, il sera procédé à une collecte des données sur les ménages permettant d'estimer la demande en énergie et de nous renseigner sur le prix des différents combustibles mis en jeu.

De manière plus explicite l'étude se fera suivant les étapes ci-après:

3.1. Faisabilité technique

3.1.1. Etat des connaissances sur la biométhanisation,

Afin d'appréhender la faisabilité d'utiliser les résidus agropastoraux et les *OM* dans la production du biogaz, il est nécessaire de connaître les principes généraux de la méthanisation.

3.1.1.1. Définition de la méthanisation

La méthanisation encore appelée digestion anaérobie ou fermentation méthanique est un processus biologique basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlés et en l'absence d'oxygène (réaction en milieu anaérobie). Cette digestion se déroule dans un réacteur ou enceinte close dénommée digesteur ou cytotoculteur et aboutit à la production :

- du biogaz, mélange gazeux saturé en eau à la sortie du digesteur et composé d'environ 50% à 70% de méthane (CH_4), de 20% à 50% de gaz carbonique (CO_2) et de quelques gaz traces (NH_3 , N_2 , H_2S).
- du digestat, produit humide riche en matière organique partiellement stabilisé et utilisé comme fertilisant (Blin J. et al 2010).

Il s'agit d'un processus complexe assuré grâce à l'action concertée de microorganismes appartenant à différentes populations microbiennes qui se déroule généralement en 4 étapes (l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse); les deux premières sont souvent regroupées car effectuées par les mêmes populations de microorganismes.

3.1.1.2. Les étapes de la digestion anaérobie

a) Hydrolyse et Acidogénèse

Cette première étape est effectuée par un ensemble varié de microorganismes, la plupart anaérobies strictes. Généralement, l'hydrolyse est le fait d'enzymes extra-cellulaires (cellulases, hydrolases, amylases, protéases, lipases etc.) qui libèrent des produits de poids moléculaire plus faible (monomères) qui vont pénétrer dans la cellule où ils seront dégradés selon les voies classiques du catabolisme. Ces monomères sont transformés en acides organiques et alcools avec libération d'ammonium (NH_4^+); de dioxyde de carbone (CO_2) et d'hydrogène (H_2): Acidogénèse (Ghattas D., 2004 ; Effebe K. R. 2009 ; Wikipedia).

b) Acétogénèse

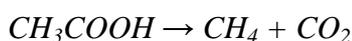
C'est pendant cette phase que sont produits, à partir des étapes précédentes, les principaux substrats de la méthanogénèse : acide acétique (CH_3COOH), CO_2 et H_2 . L'acide acétique est un intermédiaire clé de la transformation de la matière organique dans l'environnement. De nombreuses bactéries sont capables de faire de l'acétate par fermentation et sont souvent qualifiés «d'acétogènes» (Ghattas D., 2004).

c) Méthanogénèse

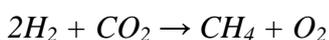
C'est l'étape finale et spécifique de la fermentation méthanique. Elle conduit à la réduction du carbone en méthane et elle est réalisée par des microorganismes très spécialisés, anaérobies strictes, qui se subdivisent en méthanobactériales, méthanococcales et méthanomicrobiales.

Il existe deux grandes voies de formation du méthane:

- La voie acétoclastique où l'acide est transformé en méthane:



- La voie hydrogénéophile où c'est le mélange CO_2/H_2 qui est utilisé:



D'autres réactions existent à partir de différents composés comme le méthanol, l'acide formique, la méthylamine ou encore le diméthylsulfure (Ghattas D., 2004 ; Effebi K. R. 2009 ; Wikipedia).

Figure 1 : Etapes de la digestion anaérobie et Produits correspondants.

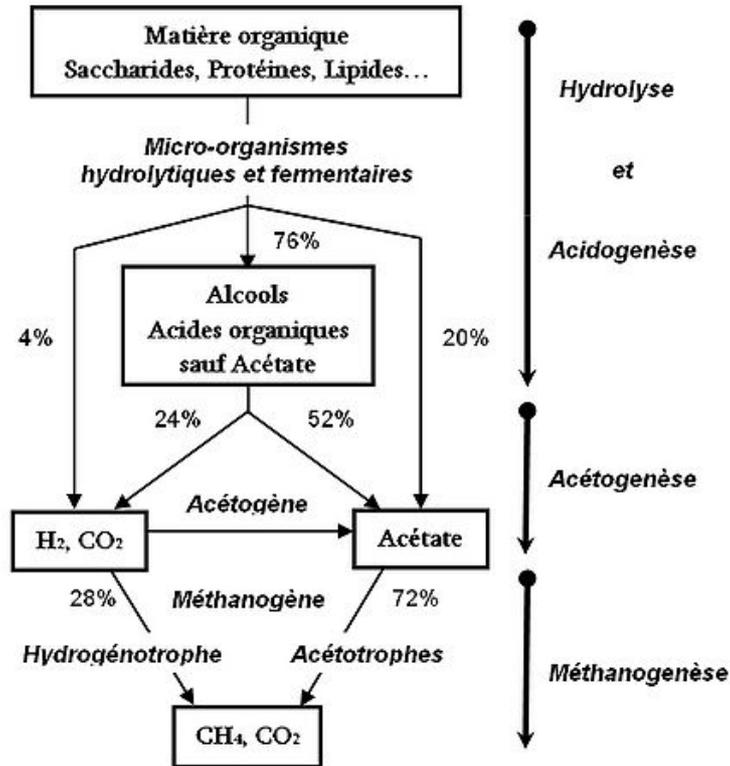


Figure 1a : Etapes de la digestion anaérobie (Wikipédia 2011 ; Vedrenne F. 2007)

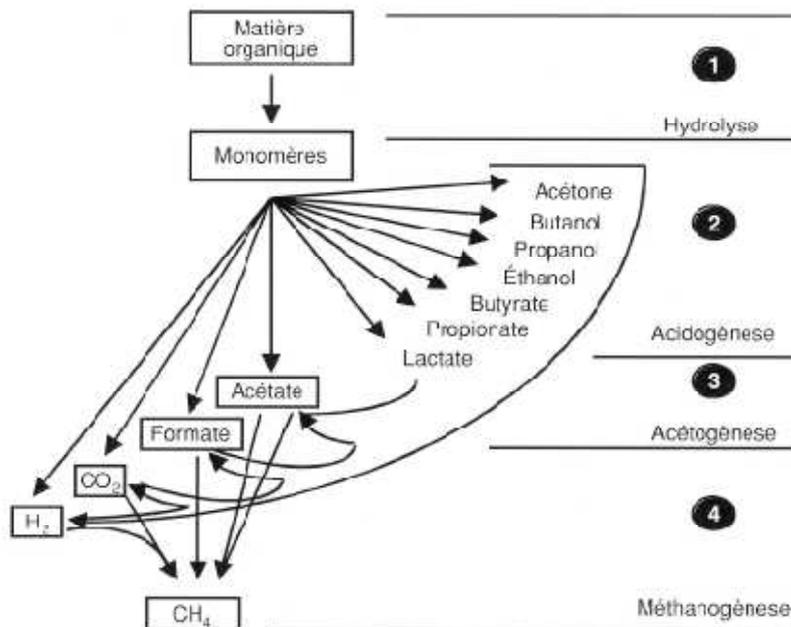
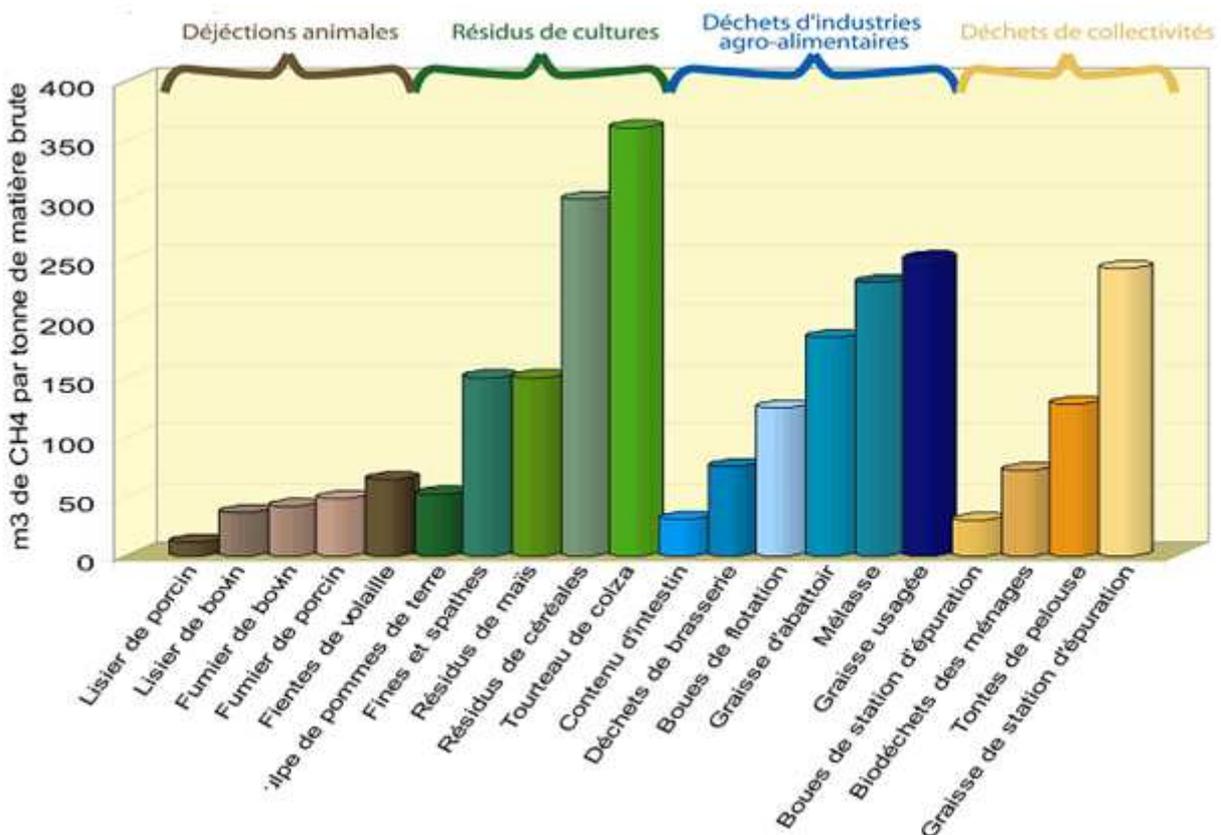


Figure 1b : Produits issus des différentes étapes (Lima Amarente J. A., 2010)

3.1.1.3. Potentiel méthanogène des substrats

Tous les substrats ne disposant pas du même potentiel méthanogène. Le choix de la matière organique à méthaniser est donc fondamental. En effet, toute matière organique fraîche et non lignifiée (bois et branchages) peut être méthanisée. Les matières organiques favorables au développement de la méthanisation se retrouvent principalement dans les quatre secteurs d'activités suivants: secteur agropastoral (déjections animales, résidus de culture), secteur ménager (déchets ménagers), secteur industriel (déchets d'industrie agro-alimentaire 'IAA') et le secteur urbain (déchets de collectivités, boues urbains de station d'épuration 'STEP'). Une autre solution fonctionnelle consiste à associer des effluents d'élevage (faible potentiel méthanogène mais pouvoir tampon et apportant des bactéries) et des résidus de cultures ou d'industries agro-alimentaires (bon potentiel méthanogène).

Figure 2: Histogramme du potentiel méthanogène des matières organiques (Pierrevelcin M. 2008)



Parmi les différents paramètres permettant d'apprécier la diversité de la matière organique, le potentiel méthanogène (B_0) est particulièrement bien adapté, notamment pour l'étude de la production de CH₄ et de la dégradation anaérobie. A ce titre, les potentiels méthanogènes de la

matière organique de différentes origines ont été estimés et présentés dans le tableau ci-dessous (Vedrenne F. et al 2005)

Tableau 1 : Estimation des potentiels méthanogènes (B_0 en $L CH_4.kg^{-1} MO$) de divers substrats végétaux et de déjections. (tiré de Vedrenne F. et al 2005)

Auteurs	Substrat	T °C	Valeurs B_0
Møller <i>et al.</i> (2004a)	Fèces + Urine : Porc	35	350
	Bovins		250
Møller <i>et al.</i> (2004b)	3 Fèces bovin	35	100 à 161
	2 Lisiers bovins		150 et 207
	5 Fèces Porc Eng		340 à 403
	3 Fèces Truie		250 à 317
	Refus lisier porc		261
	2 Refus lisier porc		159 et 247
	Refus lisier porc Paille		506 195
Hansen <i>et al.</i> (2004)	Déchet organique	55	495
	Cellulose		379
Buffière <i>et al.</i> (2005)	Salade	55	294
	Carottes		388
	Herbe		388
	P. de Terre		427
	Banane		289
	Pomme		317
Mladeno-vska <i>et al.</i> (2005)	Fraction solide déjections	55	233 ± 17 à 289 ± 14
Amon <i>et al.</i> (2004)	6 Lisier V Lait.	38	126 à 166
	Paille		211
	Rafle maïs		274
	Feuille maïs		252
	Quenouille		202
	Varech		260
	Eau jacinthe		206
	Semoule maïs		297
	Papier journal		53
	Chandler <i>et al.</i> (1980)		Fèces éléphant
Fientes poulet		295	
Lisier porc		407	
3 déjections VL		259 à 270	
Hill (1984) Données d'autres auteurs	3 lisiers Porcins	35	320
	3 lisiers bœufs		220 à 240
	2 lisiers bœufs		60
	2 lisiers bœufs		55
	3 lisiers V Lait.		35
	Lisier V Lait.		60
2 Lisiers Volaille	35	230 à 280	

3.1.1.4. Paramètres d'optimisation de la méthanisation

Plusieurs facteurs interagissent entre eux et influencent la vitesse et l'efficacité de la digestion anaérobie. Les principaux paramètres tirés de la littérature sont présentés dans les prochaines sections.

a) La température

Les bactéries ne se développent que lorsqu'elles sont dans des conditions adéquates de température et par conséquent, la cinétique des réactions en dépend. L'élévation de la température engendre une augmentation de l'efficacité de la méthanisation. Par contre, cette croissance de l'efficacité n'est pas linéaire, mais affiche plutôt des zones idéales de température. Le maintien de la température dans une de ces plages est essentiel pour l'efficacité du processus (Amarante J. 2010). La figure 3a ci-dessous indique en fonction de la température, le taux de croissance des microflores

méthanogènes responsables de la digestion anaérobie tandis que la figure 3b indique l'évolution de la production du biogaz en fonction de la durée de la digestion pour diverses températures.

Figure 3 : Influence de la température sur la digestion anaérobie.

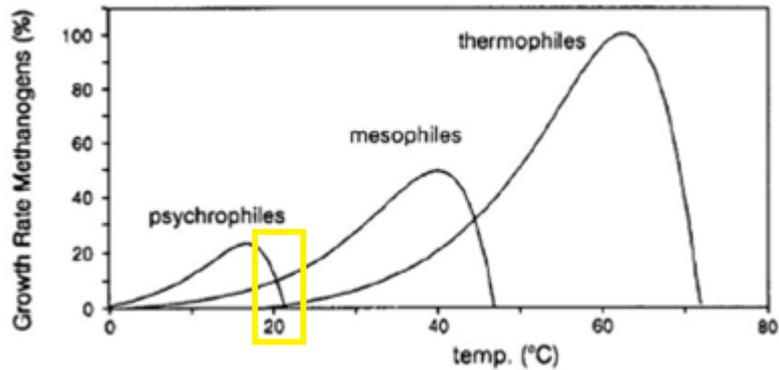


Figure 3a : taux de croissance des microflores méthanogènes (Al Seadi et al, 2008)

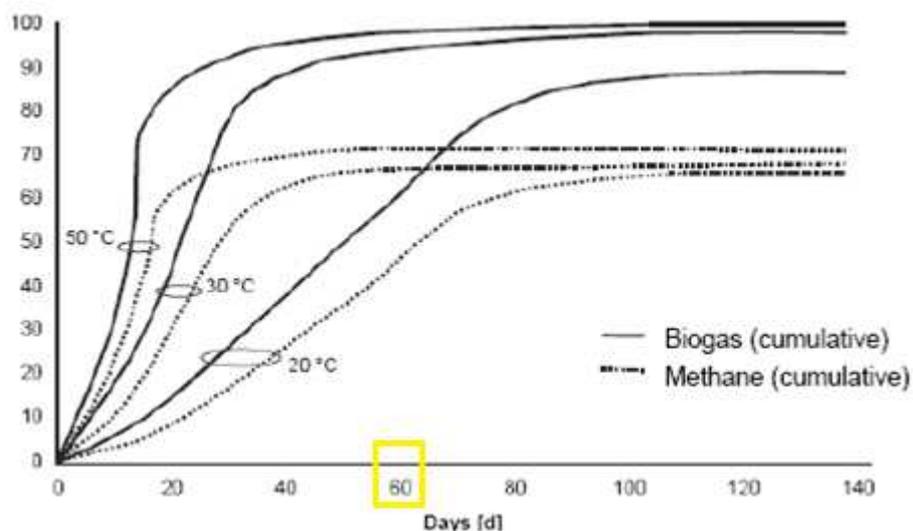


Figure 4b : évolution de la production du biogaz pour diverses températures en fonction du temps de digestion (Al Seadi et al, 2008)

b) 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 (Effebi K. R., 2009) ; 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 (H₂S, H₂,...).

Figure 4 : Influence du pH sur la digestion anaérobie.

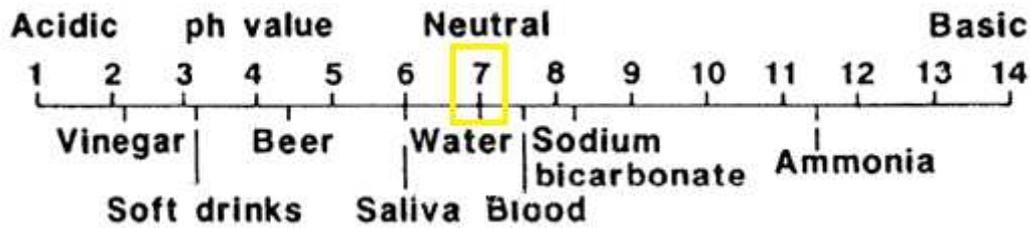


Figure 4a : plage de neutralité ou optimum du pH (Fulford D. 1998)

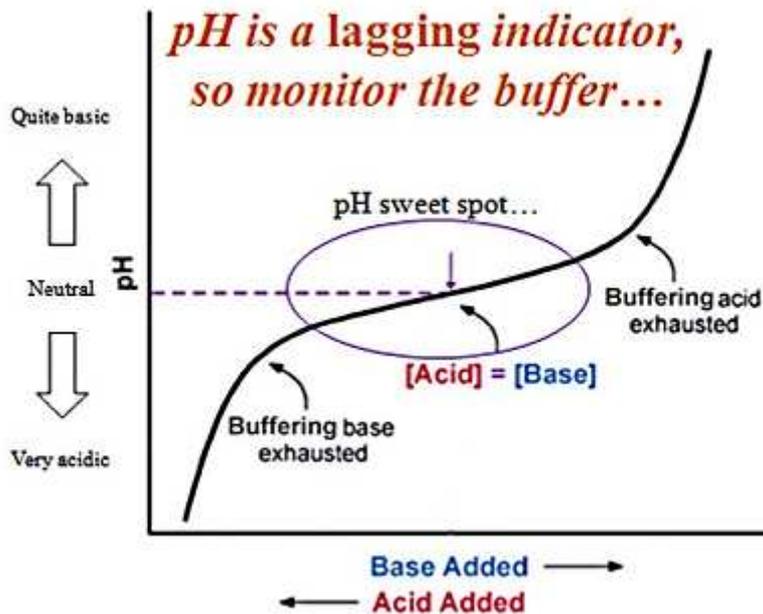


Figure 4b : Autre représentation de la plage de neutralité (Dana R., 2010)

c) Le rapport carbone/azote (C/N)

Des études indiquent que la proportion désirable du rapport (C/N) se situe entre 20 et 30, 25 étant le ratio 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 (Amarante J. 2010)

d) Le temps de rétention hydraulique.

Ce temps est fonction de la température, du taux de matière sèche, de la nature et de la composition du substrat : plus la température est élevée, plus la digestion est rapide, plus le substrat est riche en eau et en particules fines, plus la digestion est rapide (Amahrouch A. 2010).

e) 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 (Amahrouch A. 2010).

f). L'humidité.

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité minimale est de 60 à 70 %, 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. (Tou I. et al 2001)

3.1.1.5. Inhibiteurs de la méthanisation.

Outre les facteurs physico-chimiques, comme le pH et la température, plusieurs substances peuvent avoir un effet nocif sur la digestion anaérobie.

Ammoniac (NH_3) : l'ammoniac en concentrations au-delà de quelques grammes par litre peut inhiber la phase méthanogène de la digestion anaérobie. Ces concentrations de NH_3 peuvent être causées par un apport élevé de matières riches en protéines, comme les restes d'élevage et les déchets agroalimentaires (Amarante J. 2010 ; Amahrouch A. 2010)..

H_2S : des substrats riches en protéines soufrées et en sulfates peuvent mener à une augmentation de la production de H_2S . Il est également toxique pour les microorganismes méthanogènes, en plus d'être corrosif pour les matériaux (Amarante J. 2010 ; Amahrouch A. 2010).

Substances toxiques : les hydrocarbures aliphatiques chlorés et les acides gras à longue chaîne (AGLC) sont les substances organiques les plus toxiques pour la digestion anaérobie ; les antibiotiques et les antiseptiques entravent également le développement des bactéries méthanogènes. À propos des éléments inorganiques, les plus toxiques sont les cations comme le sodium (Na^+), le potassium (K^+) et les métaux lourds comme le cuivre, le nickel, le zinc et le plomb, en plus du NH_3 et du H_2S (Amarante J. 2010 ; Amahrouch A. 2010).

3.1.1.6. Différents types de digesteur.

La littérature présente un large éventail de digesteurs qui ont fonctionnés ces cinquante dernières années. Plusieurs critères ont souvent été retenus pour les classer. Certains auteurs ont organisé les principaux critères ainsi qu'il suit :

- Classification sur base de leurs propres caractéristiques technologiques :
 - Le critère portant sur l'approvisionnement des digesteurs a permis de classer ceux-ci en deux types : le type continu qui traitent les substrats n'excédant pas 15% de matières sèches (MS) et le type discontinu qui a l'avantage d'utiliser peu d'eau et acceptent facilement différents substrats liquides ou solides. (Jlaidi M. et al 1995 ; Blin J. et al 2010)
 - Le critère portant sur la mobilité de la flore microbienne a été retenu pour classer les réacteurs en deux générations : la flore microbienne fixée se développe sur un garnissage (support immobile) ou sur un lit fluidisé (support en suspension) ; les digesteurs utilisant cette technologie sont dits de « seconde génération » par opposition aux digesteurs de « première génération » pour lesquels la flore microbienne est libre. (Sallustro J. L 2009).
 - Un autre critère porte sur le mélange ou l'agitation du substrat contenu dans le digesteur : le mélange qui permet d'homogénéiser les conditions du milieu, de maîtriser le transfert des matières et d'éviter la formation non contrôlée des volumes morts et des courts-circuits à l'intérieur du réacteur. Ce critère permet de distinguer les digesteurs dits mélangés des digesteurs non mélangés ou digesteurs à lit de boues (Moletta R. 2002).
 - Le critère basé sur la température de fonctionnement des digesteurs permet de classer ceux-ci en trois catégories (psychrophile, mésophile, thermophile). Les plages de températures varient selon les auteurs :

Tableau 2: Température d'opération pour chaque type de digesteurs selon les auteurs (tiré de Ricard M. A. et Al, 2010)

Système de digesteur	Burton et Turner, 2003	Wellinger, 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	-

- Un autre critère important est le système de stockage du biogaz produit. Il permet de distinguer les réacteurs en : réacteur à gazomètre combiné fixe à volume constant et à pression variable, ou flottant

à volume variable et à pression constante (gazomètres à cloches) et réacteur à gazomètre séparé. (Wikam W. T et al 2009 ; Blin J. et al 2010)

- Classification sur base des charges acceptées

D'autres auteurs utilisent le critère portant sur l'état du substrat : l'état liquide pour la fermentation à faible charge, l'état solide pour la fermentation à forte charge. (Rutz D. et al (2008).

- Classification sur base du principe de fonctionnement

Le nombre d'étapes (mono-étape ou phase unique et bi-étape ou phases séparées) : dans le procédé à une étape, l'ensemble des transformations microbiennes se font dans un seul réacteur. Par contre, dans le procédé à deux étapes, l'hydrolyse et l'acidogénèse sont réalisées dans un premier réacteur alors que, l'acétogénèse et la méthanogénèse sont réalisées dans un second réacteur (Moletta R., 2002)

- Classification sur la base des autres paramètres

D'autres paramètres et non les moindres sont :

- le critère portant sur la taille du système. Celui-ci a permis de classer les digesteurs en trois grandes familles : digesteur pour échelle familiale, digesteurs pour échelle fermière et la famille des digesteurs centralisés. (Al Seadi et al 2009)
- la forme et la nature du matériau de construction (acier, PVC, film plastique, béton) sont également utilisées comme critères de classification des digesteurs. Ils permettent de classer ceux-ci ainsi qu'il suit : les digesteurs-fosse qui sont des fosses en béton ; les digesteurs silos, réservoirs verticaux en acier ou en béton ; les digesteurs horizontaux en acier et les digesteurs-lagunes, réservoirs étanches construits dans le sol (Ricard M. A. et al 2010).

Du point de vue configuration, tous les réacteurs à gazomètre combiné peuvent être catalogués par les deux modèles représentés ci-dessous : à savoir le modèle chinois et le modèle indien. Une représentation non exhaustive de divers types de ces digesteurs est offerte en annexe 3.

Figure 5 : configuration des digesteurs à gazomètres combinés.

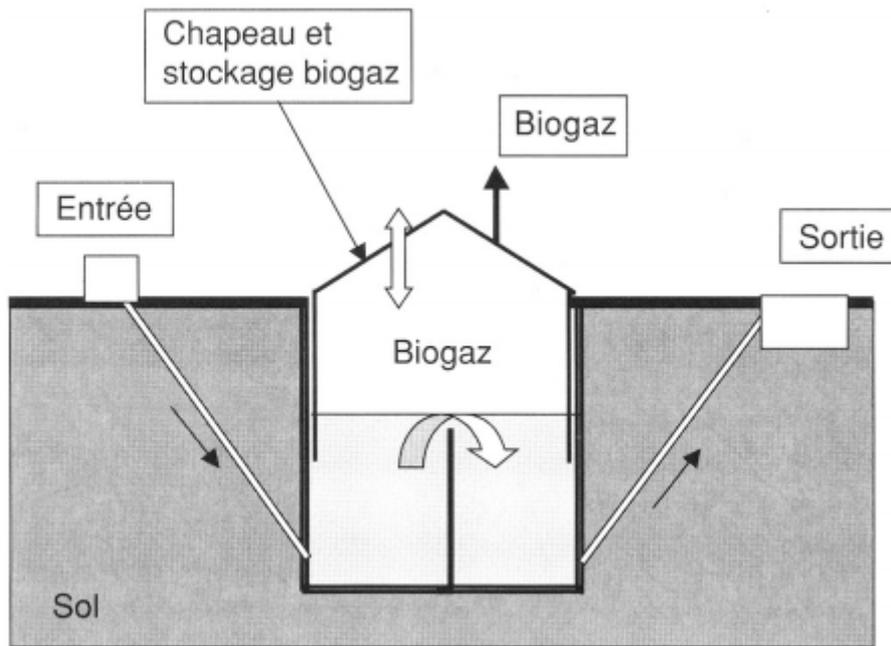


Figure 5a : modèle indien (Lima Amarente J. A., 2010)

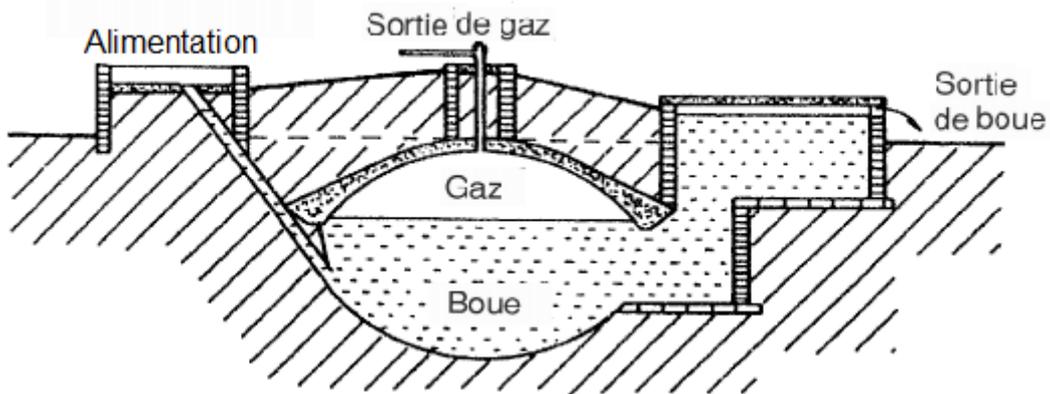


Figure 5b : modèle chinois (Fulford D. 1998)

3.1.2. Dimensionnement de l'installation.

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

Dans le cadre de ce projet, 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 biodigesteur) et de la conduite à gaz.

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).

3.1.2.1. Equations de dimensionnement du gazomètre

Après avoir évalué les besoins journaliers en biogaz, l'on utilisera le modèle de Hashimoto pour déterminer la production spécifique journalière (équation 5) puis à partir du volume utile V du digesteur, l'on pourra enfin calculer la production volumique journalière grâce à l'équation (7) (Coudure R. et Castaing J. 1997 ; Wikan W. T. et al 2009).

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

$$Pv = \frac{B_0 \times S}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu m - 1 + K)} \right] \quad (5)$$

$$\text{Avec } \mu m = 0,013(T) - 0,129 \quad (6)$$

Tableau 3 : Définitions et unités des paramètres utilisés dans les équations
(Adapté de Al Seadi T. et al 2008 ; Sallustro J. L. 2009).

Paramètres	Définition	Unité	Mode d'obtention
Pv	Production volumique : production de biogaz par m^3 de fermenteur / jour	$m^3_g/m^3_{f.j}$	Calcul
S	Charge volumique	Kg(MS,MO, DCO) / m^3_i	Calcul
B_0	Potentiel de production de méthane	$m^3/KgMO$	Laboratoire
TRH	Temps de rétention hydraulique moyen de l'effluent dans le réacteur = V/Q	j	Voir graphiques
K	constante d'inhibition qui est spécifique pour un substrat donné et pour un consortium bactérien	adimensionnel	Laboratoire
μm	coefficient cinétique (taux de croissance journalier des microorganismes)	j^{-1}	Calcul
T	Température	$^{\circ}C$	Mesure

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

$$G = Pv \times V = \frac{B_0 \times S \times V}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu m - 1 + K)} \right] \quad (7)$$

V	Volume utile du fermenteur	m^3_f	calcul
G	Biogaz produit par jour	m^3_g/j	Calcul

3.1.2.2. Equations de dimensionnement du réservoir

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

$$V_D = V + G \tag{8}$$

Sachant que $V = Q \times TRH$ (9)

Et en introduisant (7) et (9) dans (8), on réussi à exprimer V_D en fonction Q par l'équation suivante :

$$V_D = Q \left[TRH + B_0 \cdot S \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m^{-1} + K} \right) \right] \tag{10}$$

Q	Débit volumique de l'influent	m^3_i/j	Calcul
VD	Volume total du digesteur	m^3	Calcul

On peut finaliser l'équation (10) en tenant compte de ce 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 ($1 : x$) ; le volume qu'occupe cette masse de substrat vaut :

$$v = m/\rho_s ; v \text{ en } [m^3], m \text{ en } [Kg] \text{ et } \rho_s \text{ en } \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \tag{11}$$

$$Q = v(1 + x) = \frac{m(1+x)}{\rho_s} ; x \text{ en } [m^3], x \in \mathbb{Q}^+ \tag{12}$$

$$\text{Et } V = TRH \times Q = \frac{TRH \times m \times (1+x)}{\rho_s} \tag{13}$$

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

$$S = \frac{m \times c}{V} \tag{14}$$

$$\text{Après avoir substitué (12) dans (9) et (9) dans (13), on obtient } S = \frac{c \times \rho_s}{TRH(1+x)} \tag{15}$$

En Substituant (12) et (14) dans (10) l'on obtient l'équation finale (16) de dimensionnement du projet :
$$V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_S} \left[TRH + \frac{B_0 \cdot c \cdot \rho_S}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right] \quad (16)$$

<i>m</i>	Masse du substrat (matière première)	Kg	mesure
<i>c</i>	Concentration de la matière organique dans le substrat	% (en valeur relative)	laboratoire

3.1.2.3. Equations de dimensionnement des conduites pour l'entrée du substrat et la sortie de l'effluent.

La hauteur de ces conduites est déterminante pour le volume du biogaz à produire. Le fluide (substrat) étant au repos, il n'y a pas de perte de charge. La hauteur (h) du fluide dans les conduites est donc la même que dans le digesteur (loi des vases communicant). En approximant la base du digesteur à un cylindre, on détermine (h) à partir de l'équation
$$V = \frac{\pi \times d^2 \times h}{4} \quad (17)$$

Où V est le volume utile du digesteur et (d) son diamètre en mètre

3.1.2.4. Equations de dimensionnement de la conduite à gaz

Le diamètre des canalisations est un facteur très important pour le bon fonctionnement des appareils à biogaz. La perte de charge (J) et la distance (L) séparant le site de production et le lieu d'utilisation étant connues, ce diamètre (D) s'obtient grâce à l'équation de la perte des charges utilisée en mécanique des fluides :

$$J = \nabla H = \frac{\lambda \times L \times \rho \times u^2}{D \times g} \quad (18)$$

Avec $\lambda = f(Re)$ et $Re = \frac{\rho \times D \times u}{\mu}$ (19) et (20)

$J = \nabla H$	Pertes de charge	m	
λ	Coefficient de résistance (coefficient de friction)	adimensionnel	
L	Distance production - utilisation	m	
ρ	Poids volumique du biogaz	Kg/m ³	1,009
u	Vitesse d'écoulement	m/s	
D	Diamètre de la conduite	m	

g	Accélération de la pesanteur	m/s^2	9,81
Re	Nombre de Reynolds	adimensionnel	
μ	Viscosité dynamique	$Kg/m/s$	$1,297.10^{-5}$

La complexité de l'équation (17) se situe au niveau de ses inconnues (λ) et (D). (λ) est une fonction de (Re) c'est-à-dire du régime d'écoulement du biogaz. Or (Re) est aussi fonction de (D). La résolution de ce type d'équation se fait par les méthodes numériques. Dans le cadre de ce projet, la démarche consiste donc à tester diverses valeurs normalisées de (D) (disponible sur le marché) dans (Re) afin de prévoir le régime d'écoulement ; on détermine ensuite (λ) et (Le) correspondants. On validera D lorsque que (Le) sera proche de (L).

3.2. Faisabilité financière du projet

3.2.1. Collecte des données sur les ménages

Ces données collectées seront utilisées pour estimer la demande moyenne en énergie au cours d'une année ; il s'agit des données telles que ; le nombre de personne par ménage ; la consommation moyenne des combustibles par ménage durant une période ; le prix unitaire des différents combustibles.

Les hypothèses suivantes seront fixées :

- pour le premier scénario qui intéresse les populations rurales, l'on suppose que les paysans utilisent exclusivement le bois de chauffe pour cuisiner et le pétrole lampant pour l'éclairage ;
- pour le deuxième scénario qui concerne la population urbaine, l'on suppose que les ménages utilisent exclusivement le gaz (GPL) pour cuisiner ;
- le fertilisant recueilli à la sortie du digesteur n'a aucune valeur commerciale ;
- en dehors des conseils prodigués aux populations lors de la livraison des digesteurs, aucun autre frais ne sera engagé pour le fonctionnement et la maintenance de cette installation de type familiale.

3.2.2. Les critères d'évaluation de la rentabilité du projet

Comme dans toute analyse financière, il s'agit de recenser année par année les variables du projet (capital à investir et les charges d'exploitation, recettes générées et dépenses) qui permettront d'établir les flux de trésorerie (cash-flows).

Quant aux recettes générées, il faut noter que le biogaz comme combustible n'est pas vendu sur le marché. Son tarif sera évalué selon le prix des combustibles qu'il remplace ; à savoir le bois de chauffe et le pétrole lampant pour le premier scénario et le gaz (GPL) pour le second scénario.

Une fois les variables du projet inventoriées et les flux de trésorerie établis, les quatre critères classiques d'évaluation seront utilisés pour juger de la pertinence de ce projet au niveau des deux scénarii. Il s'agit de :

- La Valeur Actuelle Nette (*VAN*) qui se calcule suivant la relation mathématique ci-dessous

$$VAN = -I_0 + CF_1(1+i)^{-1} + CF_2(1+i)^{-2} + \dots + CF_K(1+i)^{-K} + \dots + CF_n(1+i)^{-n} \quad (21)$$

Où CF_K est le cash-flow généré en année K , i le taux d'actualisation, n la durée de vie de l'investissement et I_0 l'investissement initial qui est un flux négatif actualisé à l'année $n=0$

Dans un chiffrier électronique comme Excel, la *VAN* s'obtient directement sur la matrice des cash-flows avant impôt suivant la syntaxe ci-contre : $=VAN(ad1;ad2:ad3)+ad4$ où $ad1$ représente l'adresse de la cellule du taux d'actualisation ; $ad2 :ad3$ est le vecteur ou matrice unicolonne des revenus : dans ce vecteur, $ad2$ est l'adresse de la cellule portant le revenu de la première année et $ad3$ l'adresse de la cellule portant le revenu de la dernière année ; $ad4$ est l'adresse de la cellule qui porte le coût initial de l'investissement.

- Le Taux de Rendement Interne (*TRI*) qui représente le taux d'actualisation pour lequel la dépense d'investissement est égale à la somme des cash-flows générés par cet investissement ; c'est le taux d'actualisation pour lequel la valeur actuelle nette (*VAN*) est nulle. On l'obtient par la formule suivante :

$$TRI = i \text{ tel que } I_0 = CF_1(1+i)^{-1} + CF_2(1+i)^{-2} + \dots + CF_K(1+i)^{-K} + \dots + CF_n(1+i)^{-n} \text{ ou } TRI = i \text{ tel que } VAN = 0 \quad (22)$$

De même, le *TRI* s'obtient dans Excel suivant la syntaxe : $=TRI(ad5:ad6)$ où $ad5 :ad6$ est le vecteur ou matrice unicolonne des flux de trésorerie avant impôt, dans ce vecteur, $ad5$ est l'adresse de la cellule portant l'investissement initial et $ad6$ représente l'adresse de la cellule portant le revenu de la dernière année.

- Le délai de récupération ou Pay-back-period (d) qui représente le temps nécessaire au remboursement de l'investissement initial et qui s'obtient par la relation :

$$d \text{ tel que } CF_1(1+i)^{-1} + CF_2(1+i)^{-2} + \dots + CF_d(1+i)^{-d} = I_0 \quad (23)$$

Dans une feuille de calcul, ceci s'obtient facilement grâce au cumul des flux de trésoreries actualisés.

- L'Indice de Profitabilité (*IP*) qui représente l'indice de rentabilité et se calcule à partir de la *VAN* par la formule $IP = \frac{VAN}{I_0} + 1$ (24)

IV. RESULTATS

4.1. Résultats issus de l'étude de faisabilité technique

4.1.1. Présentation du type de digesteur choisi

Des études menées au niveau de l'état des connaissances orientent le choix sur un digesteur qui respecte les contraintes portant sur le substrat et le matériau de construction ; en y ajoutant les contraintes de coût, l'ensemble des qualités recherchées se présente ainsi qu'il suit :

- Au niveau du substrat, le substrat à méthaniser sera humide.
- Au niveau du matériau, l'on doit choisir un matériau qui conviendra pour un digesteur :
 - facilement déplaçable ou portable donc léger (population nomade)
 - durable et résistant à la corrosion
- Au niveau du coût
 - bon marché, disponible et facilité de mise en œuvre

Tableau 4 : Matériaux autorisés dans les digesteurs de biométhanisation
(tiré de Trazie G. M., 2007)

Matériau	autorisé		non autorisé
	résistant	non résistant	non résistant
Fer non traité			X
Cuivre			X
Laiton			X
Aluminium			X
Fer galvanisé		X	
Inox (V2A)		X	
Fonte grise	X		
Acier au chrome-molybdène (V4A)	X		
Plastique	X		

Au regard de ces contraintes le digesteur qui convient le plus est un digesteur du genre silos (vertical) en PVC contrairement aux digesteurs à fosse faits en briques ou en acier.

Inspiré des technologies "ARTI" et "BIOTECH" (cf. Annexe 3), les réservoirs ou des fûts de différentes capacités (250 l ; 1 m³ ; 1,5 m³ ; 2 m³ ; 2,5m³ ; 3 m³ ; 5 m³ ; 6 m³ ; 7 m³ ; 8 m³ ; 9 m³ et plus) très souvent utilisés pour le stockage de l'eau constituent le modèle physique retenu dans le cadre de ce projet. Pour des raisons économiques, le modèle proposé est à gazomètre combiné et la disponibilité de ces réservoirs sur les marchés camerounais vient conforter notre choix

Figure 6 : proposition d'un modèle physique de digesteur, réservoir de 3 m³

(Photo amateur Ph. Njampou)



4.1.2. Evaluation des besoins en biogaz et dimensionnement du digesteur correspondant

4.1.2.1. Vérification et validation de l'équation de dimensionnement.

- L'équation finale (16) 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 mélangée à une quantité d'eau (mx).

De même, lorsque le volume (V_D) du digesteur est connu, l'équation finale (16) permet à l'utilisateur de déterminer la masse du substrat (m) à digérer et le ratio (x) de son mélange avec de l'eau. (Cas des réservoirs et des fûts PVC, modèle physique proposé dans ce projet).

Le volume du gaz attendu peut être obtenu soit par l'équation (7), soit par la différence entre (V_D) et (V).

Moyennant les données ci-dessous, 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 bouse (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 25 °C.
- La concentration de la matière organique dans la bouse est évaluée en unité relative et 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 60 jours au regard de la figure 4b. *On se fixe l'hypothèse suivante : on suppose pour simplifier les calculs que 1 Kg de bouse correspond à 1 litre ($\rho_S = 1000 \text{Kg/m}^3$).*

On utilise l'équation (16), $V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_S} \left[TRH + \frac{B_0 \cdot c \cdot \rho_S}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right]$:

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

$$K = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \times S} = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \frac{c \times \rho_S}{TRH(1+x)}} = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \frac{10 \times 1000}{60(1+1)}} = 1,0375$$

La valeur du potentiel méthanogène de la bouse de vache à la température $T = 25^\circ\text{C}$ vaut :

$B_0 = 0,2 \text{ m}^3/\text{Kg}$ (cf. tableau 1 ; Wikam W. T et al 2009)

Et enfin $\mu m = 0,013 \times 25 - 0,129 = 0,196 \text{ j}^{-1}$

$$\text{AN: } V_D = \frac{10(1+1)}{1000} \left[60 + \frac{0,2 \times 10 \times 1000}{60(1+1)} \left(1 - \frac{1,0375}{60 \times 0,196 - 1 + 1,0375} \right) \right] = 1,504 \text{ m}^3$$

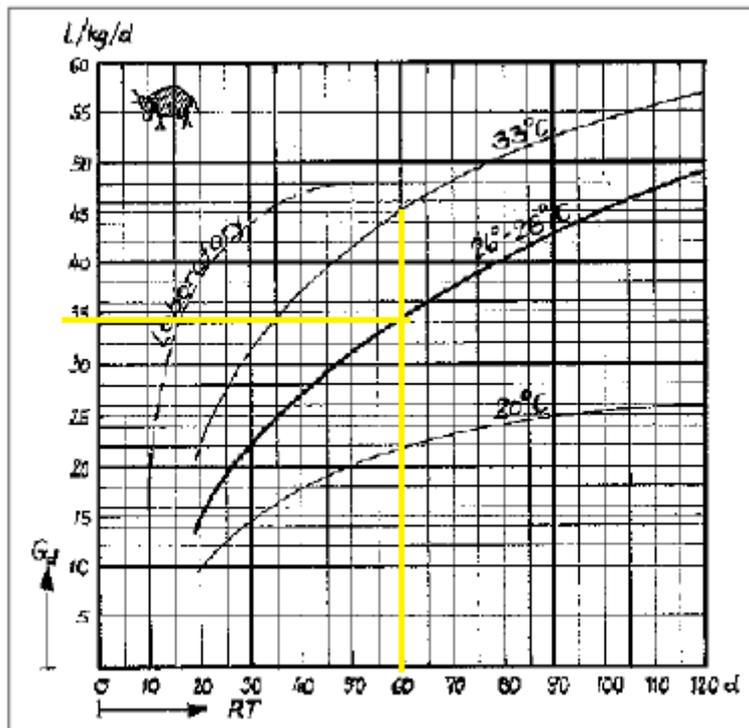
Pour un digesteur à gazomètre combiné, un volume de $1,504 \text{ m}^3$ sera nécessaire pour digérer 10 Kg de bouse humide de vache concentré à 10% de MO mélangé à de l'eau suivant le ratio 1 : 1.

A partir de (13), on calcul $V = 1,200 \text{ m}^3$ d'où, le volume maximal journalier de biogaz produit vaut :

$$G = V_D - V = 1,504 - 1,200 = 0,304 \text{ m}^3 \text{ soit } 304 \text{ litres de biogaz.}$$

Par la méthode empirique (utilisation du graphique ci-dessous), le volume de gaz attendu vaut environ $10 \times 34 \text{ l} = 340 \text{ litres}$

Figure 7 : détermination graphique du volume de gaz produit par Kg de bouse fraiche de vache



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 3 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 3m^3 et quelle est le volume du gaz attendu dans les conditions suivantes :

- 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 $25\text{ }^\circ\text{C}$.
- 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 60 jours.

Moyennant la même l'hypothèse, 1 Kg de bouse correspond à 1 litre ($\rho_S = 1000\text{ Kg/m}^3$),

On utilise encore l'équation (16), $V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_S} \left[TRH + \frac{B_0 \cdot c \cdot \rho_S}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right]$:

$$\text{AN : } 3 = \frac{m(1+1)}{1000} \left[60 + \frac{0,2 \times 10 \times 1000}{60(1+1)} \left(1 - \frac{1,0375}{60 \times 0,196 - 1 + 1,0375} \right) \right] \Leftrightarrow 3 = 0,150 m \Leftrightarrow m = 20,09\text{ Kg}$$

$$V = \frac{60 \times 20,09 \times 2}{1000} = 2,41\text{ m}^3 \Rightarrow G = 3 - 2,4 = 0,6\text{ m}^3 \text{ soit } 600\text{ litres}$$

En conclusion, pour un digesteur de 3 m^3 et pour un mélange d'eau suivant le ratio 1:1, il faudra disposer de 20 Kg de bouse et s'attendre à une production journalière de $0,6\text{ m}^3$ de biogaz.

Par la méthode empirique (utilisation du graphique ci-dessus), le volume de gaz attendu ici vaut environ $20 \times 34\text{ l} = 680\text{ litres}$.

4.1.2.2. Evaluation du besoin des ménages en biogaz.

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 (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 (bruleurs et lampes), du nombre de cuisson par jour, du type de la denrée à cuire, de la taille du ménage, les habitudes alimentaires, etc.

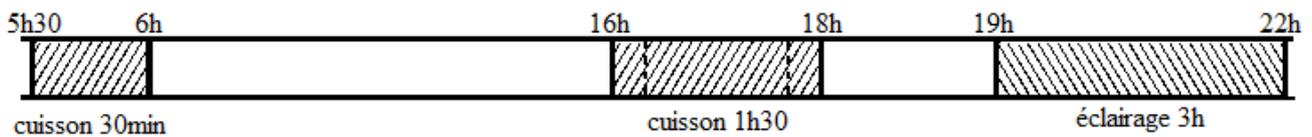
En tout état de cause, l'évaluation du besoin des ménages en biogaz se fera sur la base des postulats suivants :

- L'évaluation de la demande en biogaz énergie se fera sur un ménage de 5 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 bruleur à biogaz et 140 l/h par lampe à biogaz): ceci suppose que ces appareils sont connus d'avance ;

- Un bruleur 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 16h et 18h et dure en moyenne 1h 30 min. puis le repas est réchauffé en 30 min. entre 5h30 et 6h le lendemain.
- La lampe est utilisée le soir entre 19h et 22h.

Figure 8 : Chronogramme d'utilisation des appareils



On évalue alors la demande journalière du ménage en biogaz :

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

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

Dans ces conditions, un ménage en zone rurale a besoin de 1,22 m³ pour l'éclairage et la cuisson de ses aliments. En zone urbaine un ménage de même taille en aura un peu moins besoin.

4.1.2.3. Dimensionnement du digesteur correspondant.

Moyennant l'hypothèse, 1 Kg de bouse correspond à 1 litre ($\rho_S=1000 \text{ Kg/m}^3$), 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 25 °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 60 jours.

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

$$\text{l'équation (7)} : G = P_v \times V = \frac{B_0 \times S \times V}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu m - 1 + K)} \right]$$

A partir des équations (15) et (6), on calcule d'abord les paramètres (*S*) et (μm) respectivement :

$$S = \frac{c \times \rho_S}{TRH(1+x)} = 83,33 \text{ Kg/m}^3 \text{ et } \mu m = 0,013(T) - 0,129 = 0,013 \times 25 - 0,129 = 0,196 \text{ j}^{-1}$$

$$K = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \times S} = 0,8 + 0,0016e^{0,06 \times \frac{c \times \rho_S}{TRH(1+x)}} = 1,0375 \text{ (bouse de vache)}$$

$$\text{De l'équation (5), on tire } Pv = \frac{B_0 \times S}{TRH} \left[1 - \frac{K}{(TRH \times \mu m - 1 + K)} \right] = \frac{0,2 \times 83,33}{60} \left[1 - \frac{1,0375}{(60 \times 0,196 - 1 + 1,0375)} \right] = 0,25334 \text{ m}_g^3/\text{m}_f^3$$

$$\text{AN : } V = \frac{G}{P_v} = \frac{1,22}{0,25334} = 4,8156 \text{ m}^3$$

Dès lors on obtient le volume total du digesteur grâce à l'équation (8) :

$$V_D = V + G = 4,8156 + 1,22 = 6,0756 \text{ m}^3$$

Un digesteur de 6 m³ sera donc nécessaire pour un ménage de 5 membres pour 1,22 m³ de biogaz par jour permettant ainsi de couvrir ses 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 vache nécessaire.

$$\text{On tire } m \text{ de l'équation (16) } V_D = \frac{m(1+x)}{\rho_S} \left[TRH + \frac{B_0 \cdot c \cdot \rho_S}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right] :$$

$$m = \frac{\rho_S \times V_D}{(1+x) \left[TRH + \frac{B_0 \cdot c \cdot \rho_S}{TRH(1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right]} = \frac{1000 \times 6}{2[60 + 16,666 \times 0,912]} = 39,89 \text{ Kg} \cong 40 \text{ Kg}$$

Le nombre (n) de vache nécessaire pour approvisionner ce digesteur est de $n = \frac{40}{10} = 4 \text{ vaches}$.

4.1.2.4. Dimensionnement des conduites pour l'entrée du substrat et la sortie de l'effluent.

Pour le modèle des réservoirs proposés, $d = 2 \text{ m}$ pour un volume $V_D = 6 \text{ m}^3$ et $V = 4,815 \text{ m}^3$

$$\text{Partant de } V = \frac{\pi \times d^2 \times h}{4} \text{ on tire } h = \frac{4V}{\pi d^2} = \frac{4 \times 4,815}{\pi \times 4} = 1,532 \text{ m}$$

4.1.2.5. Dimensionnement de la conduite à gaz.

Un postulat portant sur la perte des charges dans des installations des digesteurs à gazomètres fixes stipule que celle-ci vaut 10 mmWG au maximum (cf. Annexe 5). Par ailleurs le biodigesteur doit être positionné à une distance L de la cuisine d'utilisation au moins pour deux raisons :

- Le digesteur doit pouvoir bénéficier de la chaleur issue des rayons solaires pour améliorer la productivité.
- Il doit être un peu éloigné de la cuisine pour éviter les odeurs nauséabondes.

Supposons cette distance $L = 15 \text{ m}$ et appliquons la méthode décrite ci-dessus avec les deux diamètres suivants : $D = 12,5 \text{ mm}$ et $D = 16 \text{ mm}$.

Lorsque les deux bruleurs et la lampe fonctionnent simultanément, le débit (q) maximal du biogaz vaut $q = \frac{200}{60} \times 2 + \frac{140}{60} = 9 \text{ l/min}$ soit $9 \times \frac{10^{-3}}{60} \text{ m}^3/\text{s}$ et comme $A = \frac{\pi \times D^2}{4}$, et l'on a :

Tableau 5 : calcul du diamètre de la conduite à biogaz

Pour $D = 12,5 \text{ mm}$	Pour $D = 16 \text{ mm}$
$u = \frac{\frac{9 \cdot 10^{-3}}{60}}{\frac{\pi(12,5 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = \frac{4 \times 9 \cdot 10^{-3}}{\pi \times (12,5 \cdot 10^{-3})^2 \times 60} = 1,222 \text{ m/s}$	$u = \frac{4 \times 9 \cdot 10^{-3}}{\pi \times (16 \cdot 10^{-3})^2 \times 60} = 0,75 \text{ m/s}$
$Re = \frac{\rho \times u \times D}{\mu} = \frac{1,099 \times 1,222 \times 12,5 \cdot 10^{-3}}{1,297 \cdot 10^{-5}} = 1294,31$	$Re = \frac{1,099 \times 1,222 \times 16 \cdot 10^{-3}}{1,297 \cdot 10^{-5}} = 1016,80$
$Re < 2000$ donc le régime d'écoulement est laminaire et $\lambda = \frac{64}{Re}$	
$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1294,31} = 0,049$	$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1016,80} = 0,069$
$Le = \frac{J \times D \times g}{\lambda \times u^2 \times \rho} = \frac{10 \times 12,5 \cdot 10^{-3} \times 9,81}{0,049 \times 1,222^2 \times 1,0994} = 15,243 \text{ m}$	$Le = \frac{J \times D \times g}{\lambda \times u^2 \times \rho} = \frac{10 \times 16 \cdot 10^{-3} \times 9,81}{0,063 \times 0,75^2 \times 1,0994} = 40,32 \text{ m}$
$Le \cong L$ donc le diamètre $D = 12,5 \text{ mm}$ est validé	$Le \gg L$ donc le diamètre $D = 16 \text{ mm}$ est refusé

4.1.3. Matériels requis et évaluation du coût de l'installation

4.1.3.1. Matériels requis

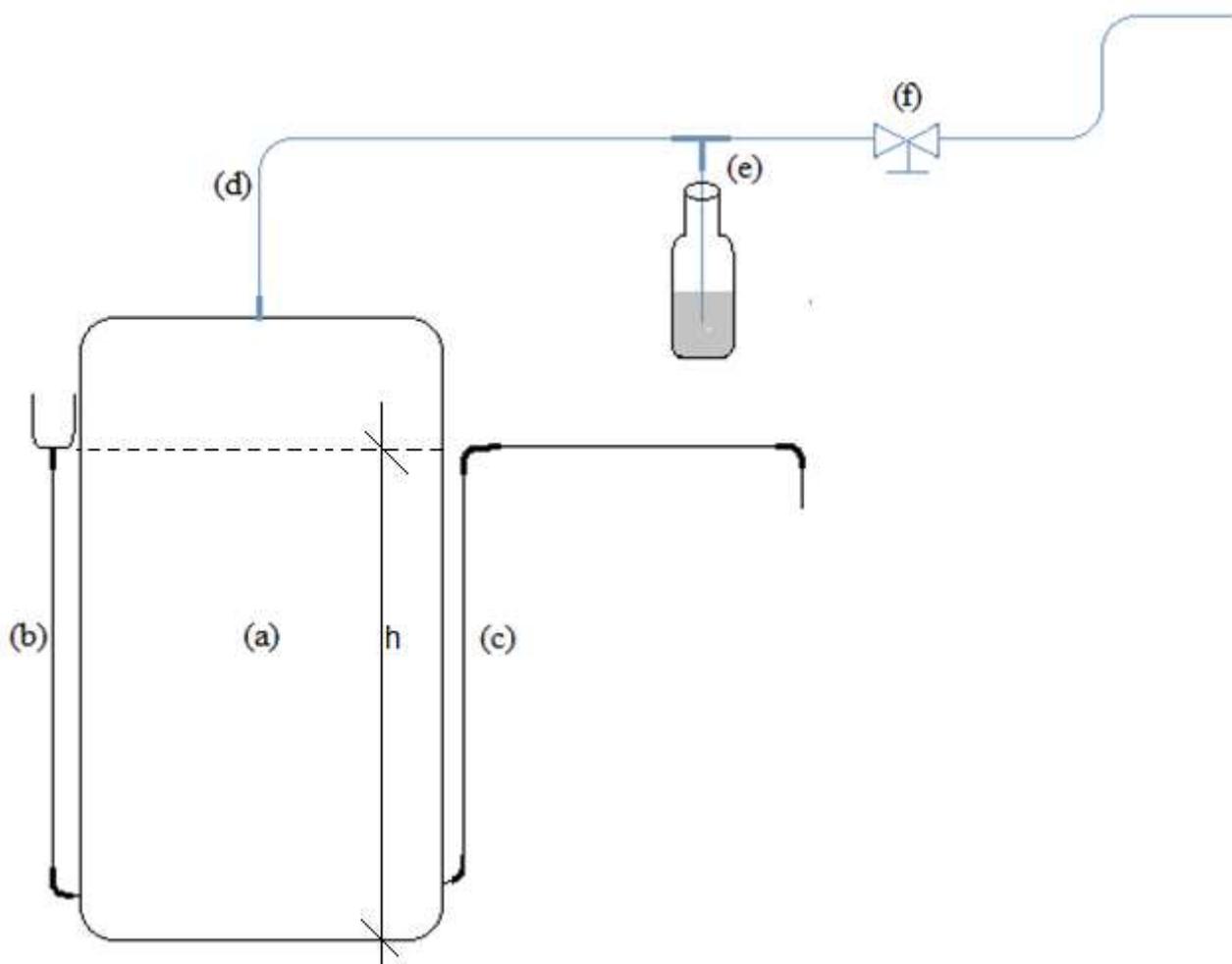
Un réservoir ou fût étanche en plastique ou encore un bidon PVC industriel (a) vendus dans des magasins et entrepôts sanitaires ainsi que le petit matériel de plomberie constituent l'essentiel du matériel requis. Plus explicitement, il se présente ainsi qu'il suit :

- Un réservoir ou fût étanche en plastique ou encore un bidon PVC industriel de capacité 6 m^3 (a)
- Le tuyau d'entrée (b): ce tuyau en PVC est monté dans la partie basse du réservoir. À l'extrémité libre de la conduite, est fixé un entonnoir pour faciliter l'introduction de la matière première qui doit être tout à fait fluide. Le tuyau et l'entonnoir sont fixés librement sur la cuve, en position verticale. Ce tuyau servira aussi de purge en cas de nécessité.

- Un tuyau PVC (c) monté sur la partie supérieure du réservoir assure la sortie d'effluent et détermine le niveau maximal de la matière dans le réservoir.
- Un tuyau galvanisé ou en cuivre (d) monté à l'extrémité du réservoir dirige le biogaz au niveau de l'utilisation
- Une bouteille d'eau de 5 litres (e) joue le rôle de soupape de sécurité
- Un détendeur ou un robinet à gaz (f) est monté au niveau de l'utilisation
- Des accessoires tels que les rondelles PVC et caoutchouc, raccord et T en cuivre, le papier de verre, les bandes de caoutchouc de 5 cm de largeur viennent compléter la liste.

Le raccordement de ces différents éléments se fera conformément au schéma hydraulique ci-dessous.

Figure 9 : schéma hydraulique de l'installation



4.1.3.2. Evaluation du coût de l'installation

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 (investissement initial)

Tableau 6 : Evaluation du coût de l'installation

Quantité	Désignation	Caractéristiques	Prix unitaire	prix total
1	réservoir PVC	6 m ³	402000	402000
2	tuyaux PVC	2,5 m - Ø63 mm	2500	5000
1	entonnoir		500	500
1	réduction PVC		1500	1500
4	coudes PVC		1000	4000
1	tuyaux galva. à biogaz	15 m - Ø12,5 mm	15000	15000
1	détendeur à gaz		3500	3500
1	Raccord T en cuivre	Ø12,5 mm	1000	1000
1	bouteille	5 l	300	300
1	tube de colle tangit		3000	3000
1	Accessoires divers		1500	1500
Montant total				437300

Montant total : Quatre cent trente sept mille trois cent francs CFA

4.2. Résultats issus de l'étude de faisabilité financière

4.2.1. Résultats des données collectées sur les ménages

Des données collectées sur les ménages, il en ressort que :

- La taille moyenne d'un ménage au Cameroun est de 5 membres (Annexe 4).
- La commercialisation du bois dans la région de l'Adamaoua est fonction de la saison et du lieu de production. Ce bois est soit vendu en petit tas, en fagot ou en tronc. Le système de tarification fixé par les paysans est très difficile à comprendre. Néanmoins, les résultats d'une enquête menée en 2009 et disponible à la délégation régionale de l'Environnement et de la protection de la nature de l'Adamaoua indique le prix moyen par Kg de la vente du bois de chauffe (Annexe 4).
- En ce qui concerne le pétrole lampant, le prix officiel est appliqué uniquement en zone urbaine. En zone rurale, il coûte généralement 500 FCA/l (Annexe 4).
- La région de l'Adamaoua est soumise à 2 saisons continues d'inégales durées : environ 7 mois de saison sèche et 5 mois de saison de pluie au cours d'une année.

- En zone urbaine, le gaz naturel est généralement commercialisé dans des bouteilles à gaz de 12,5 Kg. Ces bouteilles coûtent officiellement 30500 FCFA l'unité et le prix fixé et stabilisé par la Caisse de Stabilisation des Produits des hydrocarbures (CSPH) pour chaque réapprovisionnement vaut 6000FCFA. Les études menées par Tsochoua (2007) indiquent que chaque réapprovisionnement dure en moyenne trois semaines³ pour un ménage de 5 personnes.

4.2.2. Evaluation de la rentabilité du projet

4.2.2.1. Evaluation de la rentabilité du projet pour le premier scénario (zone rurale)

Pour un ménage en zone rurale, on évalue les dépenses annuelles dues à la consommation du pétrole à : $5 \times 12 \times 500 = 30000 \text{ FCFA par an}$

Les dépenses annuelles du même ménage dues à la consommation du bois de chauffe valent :

$$(180 \times 9 \times 7) + (300 \times 15 \times 5) = 33840 \text{ FCFA par an}$$

Les dépenses annuelles dues à la consommation des combustibles valent alors 63840 FCFA par an. Du point de vue économique, elles représentent des thésaurisations réalisées par un ménage qui n'utilisent que le biogaz donc les recettes annuelles à partir de l'année (2). Pour l'année (1), ces économies s'élèvent à 55600 FCFA parce que le biodigesteur ne produit effectivement le biogaz qu'après 60 jours qui est le temps de rétention hydraulique (TRH, voir figure 4b).

Dès lors, la liste des variables permettant d'établir les flux de trésorerie et ensuite de calculer les critères d'évaluation se présente ci-dessus :

- Coût d'investissement : 437300 FCFA.
- taux d'actualisation : 10%.
- Durée de vie : 10 ans.
- Dépenses formation et conseils : 12% du cout d'investissement
- Dépense pour achat appareil de cuisson : 10000 FCFA.
- Dépense pour achat appareil d'éclairage : 3500 FCFA.
- Recettes année 1: 55600 FCFA.
- Recettes année 2 à 10 : 63840 FCFA.

³ Agriculture périurbaine et construction d'une biodiversité anthropique dans la plaine de Marza (Cameroun), TCHOTSOUA M.

Tableau 7 : Echancier des cash-flows (Premier scénario)

Années	coût investissement	Recettes	Dépenses formation & conseils	Dépense achat app. De cuisson	Dépense achat app. D'éclairage	Cash-flow
0	437300		52476	10000	4000	-503776
1		55600				55600
2		63840				63840
3		63840				63840
4		63840				63840
5		63840				63840
6		63840				63840
7		63840				63840
8		63840				63840
9		63840				63840
10		63840				63840

Tableau 8 : Valeur Actuelle Nette (Premier scénario)

Années	Cash-flows	Coeff. D'act. 10%	Cash-flows actualisés	Cumul des CFK actualisés
n	CFK	$(1+0,1)^{-n}$	$CFK*(1+0,1)^{-n}$	
0	-503776	1	-503776	-503776
1	55600	0,9090909	50545,455	-453230,5
2	63840	0,8264463	52760,331	-400470,2
3	63840	0,7513148	47963,937	-352506,3
4	63840	0,6830135	43603,579	-308902,7
5	63840	0,6209213	39639,617	-269263,1
6	63840	0,5644739	36036,016	-233227,1
7	63840	0,5131581	32760,014	-200467,1
8	63840	0,4665074	29781,831	-170685,2
9	63840	0,4240976	27074,392	-143610,8
10	63840	0,3855433	24613,084	-118997,7
VAN(10%) = -118997,7		TRI = 4%		
d > 10 ans		IP = 0,7637884		

4.2.2.2. Evaluation de la rentabilité du projet pour le deuxième scénario (zone urbaine)

A partir de ce qui précède, l'on peut évaluer les dépenses annuelles d'un ménage en gaz naturel : soit

$$\frac{6000}{3} \times 4 \times 12 = 96000 \text{FCFA par an}$$

L'établissement des flux de trésorerie et les critères d'évaluation se feront à partir de variables suivantes :

- Coût d'investissement : 437300 FCFA.
- taux d'actualisation : 10%.
- Durée de vie : 10 ans.
- Dépenses formation et conseils : 12% du cout d'investissement.
- Dépense pour achat de bouteille de gaz naturel : 30500 FCFA.
- Recettes année 1: 80000 FCFA.
- Recettes année 2 à 10 : 96000 FCFA.
- Valeur Résiduelle : 30500 FCFA.

Tableau 9 : Echancier des cash-flows (Second scénario)

Années	coût investissement	Recettes	Dépenses formation & conseils	Dépenses achat bouteille	Valeur résiduelle	Cash-flow
0	437300		52476	30500		-520276
1		80000				80000
2		96000				96000
3		96000				96000
4		96000				96000
5		96000				96000
6		96000				96000
7		96000				96000
8		96000				96000
9		96000				96000
10		96000			30500	126500

Tableau 10 : Valeur Actuelle Nette (Second scénario)

Années	Cash-flows	Coeff. D'act. 10%	Cash-flows actualisés	Cumul des CFK actualisés
n	CFK	$(1+0,1)^{-n}$	$CFK*(1+0,1)^{-n}$	
0	-520276	1	-520276	-520276
1	80000	0,909090909	72727,27273	-447548,7273
2	96000	0,826446281	79338,84298	-368209,8843
3	96000	0,751314801	72126,22089	-296083,6634
4	96000	0,683013455	65569,29172	-230514,3717
5	96000	0,620921323	59608,44701	-170905,9247
6	96000	0,56447393	54189,49729	-116716,4274
7	96000	0,513158118	49263,17935	-67453,24805
8	96000	0,46650738	44784,7085	-22668,53955
9	96000	0,424097618	40713,37136	18044,83182
10	126500	0,385543289	48771,22611	66816,05793

VAN(10%) = 66816,05793

TRI = 13%

d = 9 ans

IP = 1,128424255

V. DISCUSSION ET ANALYSES

5.1. Analyses et discussion des résultats issus de la faisabilité technique

- Modèle physique du digesteur proposé

Le modèle physique du digesteur proposé convient bien pour les installations familiales. Le digesteur à gazomètre combiné fixe a été préféré au digesteur à gazomètre séparé ou au digesteur à gazomètre combiné et flottant dans le but d'utiliser un seul réservoir au lieu deux, ce qui a pour conséquence d'amoinrir les coûts de l'installation.

Bien qu'inspirer des technologies BIOTECH et ARTI, il serait souhaitable dans un premier temps d'expérimenter ce modèle physique sur des petites installations dans lesquelles le volume des digesteurs n'excède pas 6m^3 . Au-delà, on étudiera la possibilité d'enfouir ces réservoirs ne serait-ce qu'en partie dans le sol.

- Evaluation des besoins en biogaz

La complexité de l'évaluation des besoins en biogaz des ménages est due à ce que plusieurs paramètres quantifiables ou non entrent en compte lors de cette évaluation. La technique utilisée supposait connus à l'avance les appareils d'utilisation et leurs temps de fonctionnement. Dans le cas contraire, cette évaluation pourra se faire au cas par cas.

- Dimensionnement du digesteur

Le dimensionnement du volume utile du digesteur a pu être fait sans aucune peine puisque l'équation utilisée à cet effet ($V = Q \cdot \text{TRH}$) est universelle au regard de la littérature.

Quant-au dimensionnement du gazomètre, l'équation (5) issue du modèle mathématique de Hashimoto a été utilisée 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. L'incertitude relative valait $\nabla_{Pv} = \frac{|30,4-34|}{100} = 0,036$ soit $3,6 \times 10^{-2}$. Non seulement, cette incertitude n'est pas de nature à remettre en cause le résultat issu du modèle mathématique de Hashimoto, mais il faut aussi noter que l'évaluation de Pv par la méthode empirique se fait sur un graphique pour une température (T) comprise entre 26°C et 28°C . Sachant que Pv est une fonction de (T), ce léger décalage peut être justifié par cette raison.

Les volumes des digesteurs obtenus bien que conformes, sont assez grands (1,5 m³ pour digérer 10 Kg de bouse, 6 m³ pour 40 Kg ...). Cette grandeur apparente et l'absence des connaissances sur la notion du pouvoir calorifique des combustibles crée parfois la confusion chez les non initiés qui veulent toujours faire un rapprochement direct entre le biogaz et le GPL ; La conséquence directe causée par cette confusion est le découragement des populations quant à l'adoption de cette biotechnologie.

5.2. Analyses et discussion des résultats issus de la faisabilité financière

Si les résultats montrent que la faisabilité technique de ce projet est possible, l'analyse financière quant-à elle présente des conclusions mitigées selon que l'on soit en présence du premier ou du second scénario.

En effet, les critères de la rentabilité calculés ci-dessus montrent que ce projet n'est pas rentable pour le premier scénario (zone rurale) car la VAN = -118997,7 < 0 ; IP = 0,7637884 < 1 ; TIR = 4% < i et d > n = 10 ans. Dans de telles conditions, et pour une durée de 10 ans, l'on ne saurait conseiller un paysan d'engager ses fonds propres dans un tel investissement. Mais en réalité, cette conclusion tirée sur la base des critères de rentabilité économique peut parfois ne pas refléter la réalité car le bois de chauffe qui a un prix très bas sur le marché est généralement sous évalué. En effet:

- le temps mis par les paysans pour abattre les arbres afin de collecter ce bois de chauffe n'est pas évalué en valeur monétaire ;
- Au Cameroun, l'exploitation du bois en particulier et l'exploitation forestière en général est subordonnée à l'obtention d'un agrément et aux procédures de l'inventaire d'exploitation préalable. Elle est soumise à la fiscalité de droit commun et à des prélèvements particuliers tels que la taxe d'abattage et la taxe de transfert pour ne citer que celles là. L'activité telle qu'exercée par les paysans, se fait en violation de la loi. La pauvreté qui sévit souvent dans les zones rurales amène les pouvoirs publics à s'abstenir d'appliquer les sanctions encourues par les contrevenants des régions sahéliennes tant que de véritables alternatives ne leur sont pas proposées. Par conséquent, ce bois est rarement taxé et donne l'impression de coûter moins cher.
- L'analyse faite a aussi ignoré la valeur ajoutée du fertilisant difficilement évaluable en valeur monétaire.

Par contre, pour le second scénario (zone urbaine), ce projet est bien rentable car VAN = 66816,05793 > 0 ; IP = 1,1284 > 1 ; TIR = 13% > i et d = 9 ans < n ; il ya retour d'investissement 9

ans après le lancement de ce projet. Au vu de ces indications, l'on doit encourager les citoyens des cités urbaines qui sont prêts à investir dans ces projets de biodigestion pour valoriser leurs déchets fermentescibles. Mais il ne faut pas perdre de vue que ces populations doivent disposer d'un potentiel d'ordures ménagères d'environ 40 Kg par jour !

Sur le plan global, l'on peut remarquer et indépendamment du scénario considéré, que l'investissement de départ tel que présenté par cette étude reste encore élevé. Ceci risque de décourager les citoyens qui veulent bien s'essayer dans un pareil projet pour leur propre compte ; l'idéal ici serait de suivre l'exemple des autres pays africains tels que l'Ethiopie, le Rwanda, l'Ouganda ou le Burkina-Faso où à partir d'améliorations technologiques opérées dans ce domaine et grâce à l'action conjuguée du gouvernement et des ONG l'on a réussi à réduire le coût d'un digesteur de 60000 FCFA/m³ à 30000 FCFA/m³ !

VI. CONCLUSION

Ce travail a permis d'atteindre globalement les objectifs fixés au départ. Les populations rurales et urbaines, principales cibles de cette étude sont désormais éclairées sur les problèmes de méthanisation : il a été passé en revue les aspects scientifiques et techniques de la digestion anaérobie, analysé l'intérêt économique de cette biotechnologie.

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

Des analyses faites sur le plan économique démontrent la rentabilité du projet en zone urbaine. Désormais pour leur cuisson, ces populations pourront produire et utiliser leur propre biogaz en remplacement du GPL.

Le caractère défavorable de la rentabilité du projet en zone rurale soulève la question de la léthargie des décideurs politiques associé à leur manque de volonté d'anticiper sur les conséquences qui pourraient advenir au niveau sociétal. Pourtant un soutien gouvernemental dans ce domaine procure sur le plan macroéconomique des intérêts qui sont de loin incomparables à eux conquis du côté microéconomique.

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 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.

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.

Dés lors, des discussions doivent être menées afin de déclencher les réflexions à même de sensibiliser et d'orienter les programmes politiques des décideurs gouvernementaux en faveur de cette forme de biotechnologie.

VII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

L'inefficacité du projet ci-dessus étudié dans les zones rurales du point de vue microéconomique ne doit pas détourner les différentes parties prenantes de cette biotechnologie car ces projets procurent d'immenses intérêts non évaluables sur le plan sociétal. A ce titre, les politiques économiques gouvernementales se doivent d'accompagner les citoyens afin de susciter en eux l'engouement d'y investir. Les intérêts macroéconomiques ne seront d'autant plus perceptibles que si ces projets sont largement installés sur le territoire national. Aussi les recommandations suivantes seront faites à l'endroit des différents acteurs de cette technologie et enfin suivront quelques perspectives d'amélioration.

7.1. Recommandations

- Au niveau gouvernemental :
 - inscrire les projets de méthanisation dans les programmes de développement ;
 - Accorder des subventions (aides publiques) aux porteurs de projets relatifs à la méthanisation ;
 - Instituer des programmes de formation techniques des futurs utilisateurs du biogaz ;
 - Instituer également des programmes de formation économiques des potentiels porteurs de projets de méthanisation ;
 - Signer les accords avec les ONG et les GIC afin que ceux-ci les accompagne dans ces programmes.
 - En qualité de pays membre ayant ratifié le protocole de Kyoto, recenser les microprojets individuels pour monter un projet national capable d'être éligible comme projet MDP
- Au niveau des populations :
 - Solliciter les micro-finances pour la recherche des capitaux ;
 - Amoindrir les coûts d'investissement en privilégiant la construction des installations communautaires.
- Dans un cadre général :

Compte tenu de la disparité des notations observées dans la littérature, nous recommandons une normalisation des symboles utilisés pour désigner les différents paramètres de la biométhanisation.

7.2. Perspectives

- Une perspective spécifique à cette étude va consister sur le plan technique à mener une étude de la résistance du matériau (RDM) du digesteur afin de dégager d'éventuelles

limites dues aux influences physiques telles que la température du milieu et la pression à l'intérieure du digesteur.

- Mettre en place pour le compte du GIC-AgroPastoral A2.PEV.D2, un prototype de digesteur issu de cette étude ; elle permettra de mener les analyses et de contrôler la qualité du biogaz produit.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

- Al Seadi T. Rutz D. Pressl H. Köttner M. Finstarwalder T. Volk S et Janssen R. (2008), biogas handbook, *University of southern Denmark*.
- Amahrouch A. (2010), Le biogaz, *Centre de développement des énergies Renouvelables (CDER)*, Royaume du Maroc.
- Blin J., Tattsidjodoung P. et Richardson Y. (2010), Cours de Biomasse énergie, Master en GEER/ER, fondation 2IE : Ouagadougou.
- Burke P.E. et Dennis. A. (2001), Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook, *Environmental Energy Company*.
- Coudure R. et Castaing J. (1997), Bilan de fonctionnement d'une unité de méthanisation de lisier de porc, *Journées Recherche Porcine en France*.
- Dana R. (2010), Micro-Scale Biogas Production : A Beginners Guide
- 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.
- Evina Ehongo J.M. (2008), Gestion des déchets d'abattoirs: Perspectives et contraintes, cas de l'abattoir de Yaoundé au Cameroun.
- FAO/CMS (1996), Biogas technology: a training manual for extension.
- Fulford D. (1998), Running a Biogas Programme : A handbook, *Intermediate Technologie Publications*, London, UK.
- 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).

- Girault R., Rousseau P., Steyer J. P., Bernet N., Beline F. (2009), Combinaison d'expérimentations en réacteur continu et en réacteurs batch pour le calage du modèle ADM1: Application à la digestion anaérobie du lisier de porc, *STIC & Environnement 2009, 16-18 juin 2009, Calais*
- Guyot J. P. (1990), Etude de quelques interactions microbiennes lors de la digestion anaérobie de la matière organique par des cellules mixtes définies ou naturelles, Thèse de doctorat, Sciences, Biologie cellulaire – microbiologie, Université de Provence aix-Marseille 1.
- Jlaidi M. et Amahrouch A. (1995), Maintenance des digesteurs à Biogaz, volume 4, *Centre de développement des énergies Renouvelables (CDER), Maroc.*
- Lima Amarente J. A. (2010), Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux – Technologies disponibles et enjeux pour le Québec, diplôme de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Mazumdar A. (1982), Consolidation of information – Biogas Handbook, *General Information Programme and UNISIST, UNESCO, Paris.*
- Milán Z., Villa P., Sánchez E., Montalvo S., Boeja R., Ilangovan K., Briones R. (2003), Effet of natural and modified zeolite addition on anaerobic digestion of piggery waste
- Moletta R. (2002), Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agro-alimentaires, *collection Tec Doc Lavoisier*
- Nagamani B., Ramasamy K. (2003), Biogas production technology: An Indian perspective, *Fermentation Laboratory, Department of Environmental Sciences, Tamil Nadu Agricultural University, Coimbatore 641 003, India.*
- Pierrevelcin M. (2008), La méthanisation à la ferme, un exemple de diversification des activités agricoles.
- 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.*
- Rich D. (2010), Micro-Scale Biogas Production: A Beginners Guide, *National Center for Appropriate Technology (NCAT).*

- Rousseau P. (2009), Etude, modélisation et optimisation d'un procédé de traitement des lisiers de porcs par couplage de la digestion anaérobie et du traitement biologique de l'azote, Thèse de doctorat, Sciences de la matière, Université de Rennes 1.
- Rutz D. et Janssen R. (2008), *Biofuel Technology Handbook, Wip Renewable Energy*, Germany.
- 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 Coastal zones of countries of the indian ocean* (ProGeCo/ReCoMAP).
- 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.
- Trazie G. M. (2007), Etude technique d'une unité de biométhanisation destinée à l'électrification rurale : Application au monastère de Keur Moussa, Diplôme d'ingénieur de conception, Génie mécanique, Ecole Supérieure Polytechnique de Thies.
- 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.
- Vedrenne F., Béline F. & Bernet N. (2005) Evaluation of the methane production of livestock wastes: ultimate productivity and organic matter characterization, *4th international symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*, Copenhagen, 31 août - 02 septembre 2005, 23-28. Annexe 2 : Acte de colloque.
- 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 (2), 121 – 128.

Sites internet et dates de consultations

- www.ademe.fr (23 juin 2011)
- <http://fr.Wikipedia.org> (10 août 2011)
- www.eden-ener.org (17 juillet 2011)
- www.conservation-nature.fr (25 juillet 2011)
- www.camagref.fr (30 mai 2011)

ANNEXES

ANNEXE I. IMPACT DES RESIDUS SUR L'ENVIRONNEMENT	48
I.1. <i>Nature, origine, effets sur la santé et l'environnement des polluants de l'eau</i>	48
I.2. <i>Chaine d'abattage de l'abattoir municipale de Ngaoundéré.</i>	50
I.3. <i>Marché des bœufs de la ville de Ngaoundéré.</i>	50
ANNEXE II. <i>PROPRIETES DE QUELQUES SUBSTRATS</i>	51
ANNEXE III. PRESENTATION DE QUELQUES TYPES DE DIGESTEUR	52
III.1. <i>Digesteurs, échelle industrielle</i>	52
III.2. <i>Digesteurs, échelle familiale.</i>	52
III.3. <i>Adaptation des réservoirs de stockage d'eau en digestion anaérobie.</i>	54
ANNEXE IV. DONNEES COLLECTEES SUR LES MENAGES	55
IV.1. <i>Taille des ménages camerounais</i>	55
IV.2. <i>Consommation et cours du prix des combustibles</i>	56
ANNEXE V. QUELQUES EQUIPEMENTS D'UTILISATION DU BIOGAZ	57
V.1. <i>Cuiseurs et lampes à biogaz</i>	57
V.2. <i>Une idée sur la consommation de quelques équipements utilisant le biogaz.</i>	57
V.3. <i>Comparaison du pouvoir calorifique du biogaz à ceux des autres combustibles</i>	58
V.4. <i>Propriétés du biogaz et outils de calcul du diamètre de la conduite à biogaz</i>	58

ANNEXE I. IMPACT DES RESIDUS SUR L'ENVIRONNEMENT

I.1. NATURE, ORIGINE, EFFETS SUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT DES POLLUANTS DE L'EAU

Polluants		nature	Origine	Effet sur la santé	Effets sur l'environnement
Polluants Chimiques :	Les nitrates	Engrais azotés Déjections animales	2/3 agricole +élevage 1/3 industrie	Formation de methémoglobine (baisse d'oxygénation du sang) et de nitrosamin(cancérogène)	eutrophisation
	Ammonium	NH3, NH4+ (ion ammonium)	Industrie chimique, engrais, industrie textile, rejets d'origine humaine	PB de prolifération de m.o nuisibles (diminue l'efficacité du chlore) Se transforme rapidement en nitrates puis en nitrites.	eutrophisation
	Les phosphates	engrais déjections et détergents	Agricole industrie		eutrophisation
	pesticides	Organochlorés (DDT) (nsecticide : aldrine, dieldrine, heptachlore (termites), époxide d'heptachlore (insecticide à large spectre) Organophosphorés :toxique pour vertébrés Pyréthroides : toxiques pour organismes aquatique Carbamates : insecticides et fongicides Phyosanitaires : Atrazine (herbicide pour maïs) triazines	Agricole (herbicide) Industrie (bois, textile) Désherbage (voies ferrées)	Toxicité chronique+++ (tissus adipeux) : trouble du s.nvx et du foie voire effets cancérogènes Intoxication aiguës : + Troubles nerveux, digestifs, cardio- vasculaires, musculaires	Perturbation des écosystèmes Baisse de la biodiversité Bioaccumulation Diminution de la procréation (stérilité) mutation
<u>Polluants organiques :</u>		Organismes morts, excréments Protéines, lipides, glucides Détergent, hydrocarbure Fibres, bois médicaments	Ménage, collectivité Industrie agro alimentaire Ménage, pétrochimie Papeterie, industrie textile Industrie pharmaceutique		eutrophisation
<u>Polluants biologiques :</u>		Matières fécales, lisiers, purin Contamination microbienne (virale, bactérienne, parasitaire), modification des biocénoses par d'autres	Ménage, collectivités, station d'épuration	Gastro entérite	Baisse des phénomènes d'autoépuration des cours d'eau, rivières....

		espèces animales ou végétales (prolifération)			
Polluants physiques :	MES : Matière En Suspension	Matière organique...	Activités humaines , collectivités		eutrophisation Modification des conditions de vie de la faune et de la flore Perturbation de la photosynthèse pH<4 destruction des m.o, vertébrés et invertébrés
	Température	Rejet des eaux de refroidissement des centrales acide sulfurique et nitrique	Industrie, centrale thermique et nucléaire		
	Acidité)		Pollution de l'air, parc automobile, élevage industriel		
	Salinité		Mines, carrières, érosion des sols		
	Radioactivité		Centrale nucléaire		
Polluants métalliques : Métaux lourds / ETM (Eléments traces Métalliques)	plomb	Sels, Oligo-élément	Sidérurgie, industrie métallurgique	saturnisme (Pb), cancer, PB sur le s. nerveux, sanguin et rénal	Bioaccumulation
	Aluminium		Sels d'aluminium pour la floculation rejets industriels, érosions, lessivage des minéraux et de sols, contamination par poussières atmosphériques	encéphalopathie chronique (affection neurologique et psychique) pour des personnes, insuffisantes rénales chroniques et traitées par hémodialyse	
	Fer		traitement de l'eau sidérurgie	Symptôme digestif chez les enfants Effets indirects : neutralisation des désinfectants entraînant une prolifération de m.o	
	Sélénium	métalloïdes	industrie : préparation des colorants, verrerie, métallurgie, fabrication des insecticides, traitement textile, fabrication cellule photo électrique	Toxique thioloprive (bloque les processus d'oxydoréduction cellulaire) Exposition professionnelle Perte de cheveux, anomalie des ongles	

I.2. Chaîne d'abattage de l'abattoir municipale de Ngaoundéré.

Les déchets sont directement déversés dans un cours d'eau sans aucun traitement !



Photos amateurs Ph. Njampou

I.3. Marché des bœufs de la ville de Ngaoundéré.

Les déjections produites par les cheptels sont rarement collectées par quelques agriculteurs. La conséquence directe observée : Les riverains souffrent constamment des maladies respiratoires.



Photos amateurs Ph. Njampou

ANNEXE II. PROPRIETES DE QUELQUES SUBSTRATS

Properties of dung from typical animals (Fulford D. 1998)

<i>Animal</i>	<i>Wet Dung (kg/day)</i>	<i>Biogas (lit/day)</i>	<i>Total Solid (%)</i>	<i>Volatile Solid (%TS)</i>
Buffalo	14	450–480	16–20	77
Cow	10	280–340	16–20	77
Pig	5	280–340	25	80
100 hens	7.5	420–510	48	77
Human	0.2	11– 14	15–20	90

Production indicative en méthane de différentes matières. (Vade mecum version 06-2003)

M.F.	% M.S.	% M.O. (de la M.S.)	% M.O. (de la M.F.)	C/N	Litres CH ₄ /kg M.O.
------	--------	------------------------	------------------------	-----	------------------------------------

Effluents d'élevage

Lisier bovin	8,5 (6 - 11)	76,5 (68 - 85)	6,5	10 - 17	230 (200 - 260)
Fumier bovin frais	18,5 (12 - 25)	75 (65 - 85)	13,9	14 - 25	250 (200 - 300)
Lisier porcin	6,1 (2,5 - 9,7)	72,5 (60 - 85)	4,4	5 - 10	355 (260 - 450)
Lisier de poules	19,5 (10 - 29)	76 (75 - 77)	14,8		300 (200 - 400)
Fientes de poules diluées	10,3 (7 - 13,5)	74,9 (70 - 80)	7,7		350 (250 - 450)
Fumier de mouton (frais)	27,5 (25 - 30)	80	22	14	450 (400 - 500)
Fumier équin (frais)	28	75	21	18	350 (300 - 400)

Déchets agricoles

Ensilage d'herbe	44 (26 - 62)	82,5 (67 - 98)	36,3		500
Trèfle	20	80	16	12	450 (400 - 500)
Paille de céréales	87,5 (85 - 90)	87 (85 - 89)	76,1	70 - 165	450 (300 - 600)
Paille de maïs	86	72	61,9	30	650 (600 - 700)
Feuilles de betteraves	16,5 (15 - 18)	79 (78 - 80)	13	15 - 16	450 (400 - 500)
Fanes de pommes de terre	25	79	19,8	16 - 25	550 (500 - 600)

Déchets agro-industriels

Pulpe de pommes	2,9 (2 - 3,7)	94,5 (94 - 95)	2,7	6	330
Pulpe de pommes de terre	13,5 (12 - 15)	90	12,2	3 - 9	250
Fruits broyés	45 (40 - 50)	61,5 (30 - 93)	27,7	30 - 50	400
Drêches de brasseries	18 (15 - 21)	90	16,2	9 - 10	380 (370 - 390)
Mélasses	80	95	76	14 - 27	300
Déchets de légumes	12,5 (5 - 20)	83 (76 - 90)	10,53	12 - 27	600

Déchets communaux

Déchets ménagers organiques	27,5 (40 - 75)	50	28,8	25 - 80	400 (200 - 600)
Herbe fauchée (taïche...)	29,5 (22 - 37)	94,5	27,9	23	500
Boues flottantes (station d'épuration)	14,5 (5 - 24)	90,5	13,1		700 (600 - 800)

ANNEXE III. PRESENTATION DE QUELQUES TYPES DE DIGESTEUR

III.1. Digesteurs, Echelle industrielle



Disposition horizontale (Al Seadi et al. 2008)



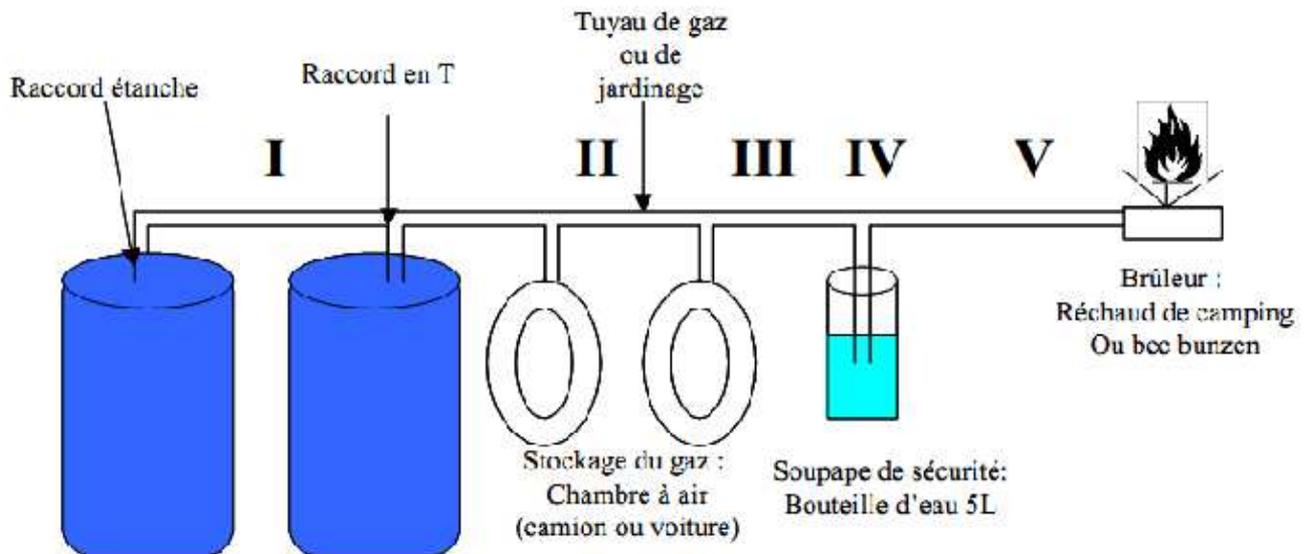
disposition verticale (Ricard M. A. et Al. 2010)

III.2. Digesteurs, Echelle familiale

Dana R. (2010) Micro-Scale Biogas Production : A Beginners Guide



Digesteur à film plastique



Digesteur de démonstration et application (digesteur en bidons PVC et à gazomètres séparés)

III.3. Adaptation des réservoirs de stockage d'eau en digestion anaérobie



Réservoirs de 1 m³



Réservoirs utilisés pour le stockage d'eau



Réservoir de 250 l



Réservoir de 3 m³

Photos amateurs, Ph. Njampou



Digesteur ARTI (gazomètre de 800 litres)



Digesteurs BIOTECH

ANNEXE IV. DONNEES COLLECTEES SUR LES MENAGES
IV.1. Taille des ménages camerounais

Répartition (en%) des ménages par sexe du chef de ménage et taille du ménage selon la zone de résidence, Cameroun 2009

Caractéristique. Socio-démographique	Milieu de Résidence		
	Urbaine	Rurale	Ensemble
Sexe du chef de ménage			
Masculin	71,9	77,1	76,0
féminin	25,1	22,9	24,0
Total	100,0	100,0	100,0
Nombre de membres			
1	19,4	15,4	17,5
2	14,1	12,4	13,3
3	11,1	11,7	11,4
4	10,9	11,8	11,4
5	10,7	11,0	10,8
6	9,1	9,7	9,4
7	7,2	7,2	7,2
8	5,6	5,8	5,7
9+	11,3	14,3	12,7
Total	100,0	100,0	100,0
Effectifs des ménages	5374	5088	10462
Taille moyenne	4,5	5,0	4,8

Source : ECAM (Enquête Camerounais Auprès des Ménages)

VI.2. Consommation et cours du prix des combustibles

Consommation finale d'énergie en unité physique (en tonnes métriques)

Sources d'énergie	2004	2005	2006	2007	2008
Bois de feu	11 357 284	11 684 273	11 979 580	12 303 369	12 303 930
Charbon de bois	213 860	219 641	225 578	231 676	237 938
Sciure et copeaux	301 571	309 723	318 094	326 693	335 523

Source : MINEE

Evolution des cours moyens du Brent et des prix des produits pétroliers (en fcfa/litre sauf gpl en fcfa/kg)

Produits pétroliers & Brent	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Super	438	443	439	448	487	513	576	580	584	589
Gasoil	350	357	363	393	404	463	534	534	535	540
Pétrole	190	190	190	213	251	293	363	364	365	350
GPL	344	344	344	400	400	440	480	480	480	480
Brent (\$/bbl)	29	24	25	29	38	54	66	72	97	59

Source : CSPH

Consommation finale d'énergie en zone rurale par ménage (5 membres),
par mois, par saison et prix des combustibles pour la Région de L'Adamaoua

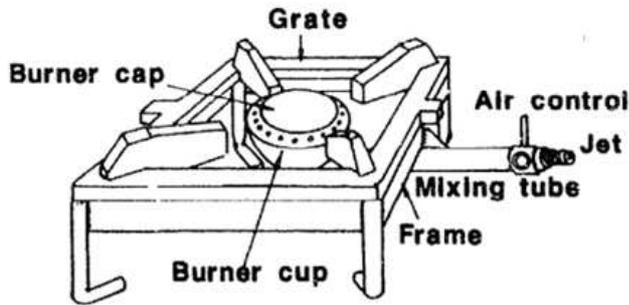
Saison	Cuisson		Eclairage	
	Bois de chauffe (Kg)	Prix (FCFA/Kg)	Pétrole lampant (l)	Prix (FCA/l)
Sèche	180	9 _ 16	2	350 _ 500
Pluvieuse	300	15 _ 22	2	350 _ 500

Consommation finale d'énergie en zone rurale par ménage (5 membres),
par mois, par saison et prix des combustibles pour la Région de L'Adamaoua

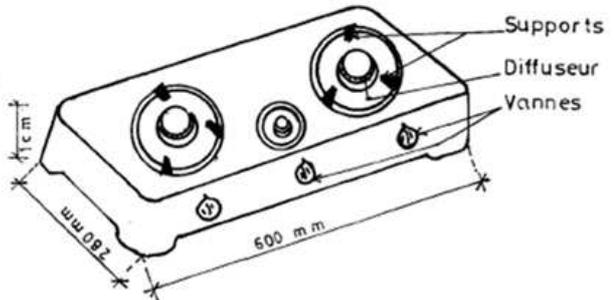
Saison	Cuisson		Eclairage	
	Bois de chauffe (Kg)	Prix (FCFA/Kg)	Pétrole lampant (l)	Prix (FCA/l)
Sèche	180	9 _ 16	2	350 _ 500
Pluvieuse	300	15 _ 22	2	350 _ 500

ANNEXE V. QUELQUES EQUIPEMENTS D'UTILISATION DU BIOGAZ

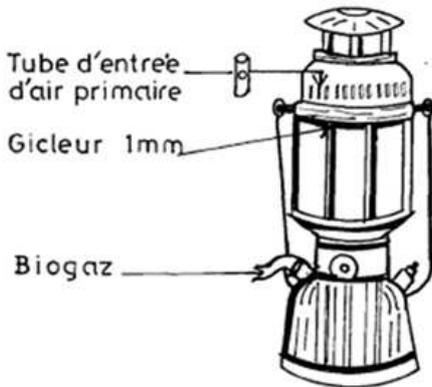
V.1. Cuiseurs et lampes à biogaz



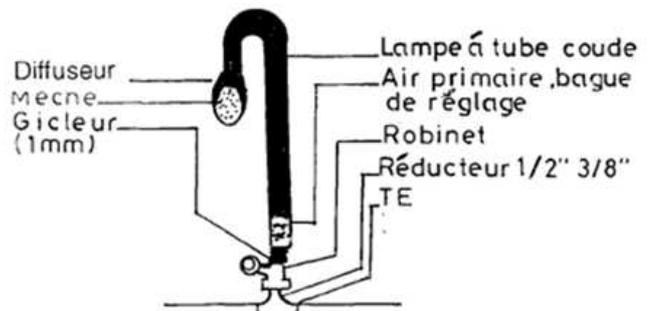
Biogas stove designed in DCS.
(Fulford D. 1998)



BRÛLEUR A BUTANE ADAPTE AU BIOGAZ
(Jlaidi M. et al 1995)



LAMPE A BIOGAZ (à pétrole)
(Jlaidi M. et al 1995)



LAMPE A BIOGAZ (à tube coudé)
(Jlaidi M. et al 1995)

V.2. Une idée sur la consommation de quelques équipements utilisant le biogaz.

Gas consumption of various appliances at 75mm WG. (Fulford D. 1998)

Biogas appliance	Biogas consumption (75mm WG)		
	litre/min	m ³ /hour	ft ³ /hour
Gas lamp (per mantle)	2.4	0.14	5
Refrigerator burner	2.4	0.14	5
Domestic burners (stoves)	4 to 15	0.2 to 0.9	8 to 32
Commercial burners	20 to 50	1 to 3	40 to 100
Dual fuel engines (per kW)	9	0.56	20
Spark engines (per kW)	11.5	0.7	26

V.3. Comparaison du pouvoir calorifique du biogaz à ceux des autres combustibles.

GAS PROPERTIES, CALORIFIC VALUES AND GAS CONSUMPTION (Sasse L. et al, 1988)

Properties of combustible gases						
Gas	Constituent value	Composition to air kwh/m ³	Calorific speed= 1	Density requirement cm/sec.	Combustion m ³ /m ³	Air
Methane	CH ₄	100	9.94	0.554	43	9.5
Propane	C ₃ H ₈	100	25.96	1.560	57	23.8
Butane	C ₄ H ₁₀	100	34.02	2.077	45	30.9
Natural Gas	CH ₄ ; H ₂	65;35	7.52	0.384	60	7.0
City Gas	H ₂ ; CH ₄ ; N ₂	50;26;24	4.07	0.411	82	3.7
Biogas	CH ₄ ; CO ₂	80 40	5.98	0.940	40	5.7

Biogas compared with other fuels (Sasse L. et al, 1988)

Fuel	Unit u	Calorific value kwh/u	Applicat ion	Efficiency %	Biogas equivalent m ³ /u	u/m ³ biogae
Cow dung	kg	2.5	cooking	12	0.09	11.11
Wood	kg	5.0	cooking	12	0.18	5.56
Charcoal	kg	8.0	cooking	25	0.81	1.64
Hard coal	kg	9.0	cooking	25	0.59	1.45
Butane	kg	13.6	cooking	60	2.49	0.40
Propane	kg	13.9	cooking	60	2.54	0.39
Diesel	kg	12.0	cooking	50	1.83	0.55
Diesel	kg	12.0	engine	30	2.80	0.36
Electricity	kwh	1.0	motor	80	0.56	1.79
Biogas	m ³	6.0	cooking	55	1	1
Biogas	m ³	8.0	engine	24	1	1

Examples of Biogas consumption

Household burner: 200 - 500 l/h

Some figures of gas consumption from India: Boiling 1 l of water: 40 l; boiling 5 l of water 165 l; cooking 500 grice: 140 l; cooking 1000 g rice: 175 l; cooking 350 g pulses: 270 l; cooking 700 g pulses: 315 l

Industrial burner: 1000 - 3000 l/h

Refrigerator (100 l volume): 30 - 80 l/h

Gas lamp: 120 - 180 l/h

Generation of 1 kwh electricity: 700 l

Biogas/Diesel engine per bhp: 420 l/h

Pouvoir calorifique du biogaz
(Pierrevelcin M. (2008))

	1 m3 de biogaz (60% CH4 en moyenne - 6 000 kcal)
Essence	0,8 L
Mazout et gas oil	0,7 L (0,6L)
Charbon de bois	1,4 kg
Bois	2,7 kg
Energie électrique	7 kWh (6 kWh)
Méthane (gaz naturel)	0,7 m3
Propane	0,3 m3
Butane	0,2 m3

V.4. Propriétés du biogaz et outils de calcul du diamètre de la conduite à biogaz

Properties of biogas (Fulford D. 1998)

Biogas: assumed 58% CH₄ and 42% CO₂ saturated with water vapour at 30°C and standard pressure. (Range of values)

Calorific value	21.5kJ/l	(20.1 to 25.9)
Effective molecular weight	27.35/	(24 to 29)
Density	1.0994 kg/m ³	(0.96 to 1.17)
Specific gravity	0.94	(0.82 to 1.00)
Viscosity	1.297 × 10 ⁻⁵ kg/sec/m	
Optimum air to fuel ratio	5.5:1 (15% biogas)	
Flammability limits	9% to 17% biogas in air	
Wobbe number	22.2 kJ/l	
Burning velocity	0.25 m/sec in air	

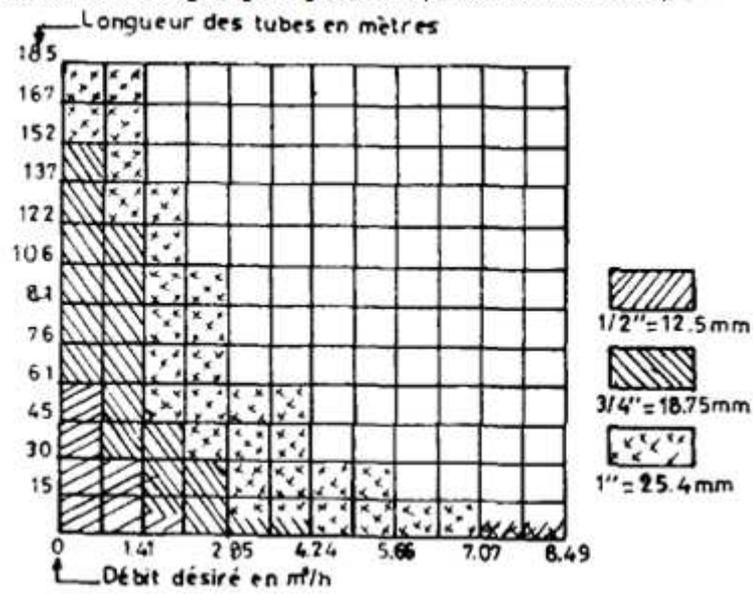
Pipe lengths used with drum plants (Fulford D. 1998)

Maximum pipe length (m)	Flow rate (litre/min)				
	10	20	30	40	50
<i>Gas pipe sizes</i>					
16mm ID (1/2in. GI)	73	31	12	–	–
21mm ID (3/4in. GI)	215	107	71	26	16
27mm ID (1in. GI)	589	294	196	100	59
35mm ID (1 1/2in. GI)	1665	832	555	416	237

Note: Pressure drop is 10mm WG (water gauge) in 60mm WG.

The size of pipe required in any installation depends on the length of the pipeline, the volume flow rate of the gas and the permissible pressure drop along the pipe. The pressure drop is caused by the friction of the gas flowing along the pipe and can easily be calculated (Appendix II). The gas pressure from a drum plant is low (40mm to 80mm water gauge) so only a small pressure drop is acceptable (10mm WG; Table 6.1). The higher

Choix du diamètre de la canalisation du biogaz en fonction de sa longueur et du débit du biogaz qui le parcourt (Jlaidi M. et al 1995)



Diametre de canalisation pour une pression de 10 cm de colonne d'eau