



**ETUDE DE FAISABILITE SUR LA PRODUCTION DE
L'ELECTRICITE A PARTIR DU BIOGAZ A EDEA
(CAMEROUN)**

MEMOIRE REDIGE POUR L'OBTENTION DU

**MASTER SPECIALISE EN
GENIE ELECTRIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIE RENOUVELABLE**

Présenté et soutenu publiquement le **28 Mars 2013** par

Marcel Guillaume GWOGON

Travaux dirigés par :

Pierre Oscar MASSO

Chef de Département des Services Techniques de l'Aménagement et de l'Urbanisme à la
Communauté Urbaine d'EDEA

Dr. Yohan RICHARDSON

Chercheur Post-doctorant au LBEB des 2IE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Igor OUEDRAOGO

Membres et correcteurs : Dr. Yohan RICHARDSON.

Serge Eric NOUMI.

2011/2012

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé à la Communauté Urbaine d'Edéa (CUE) au Cameroun sous la direction de Mr Pierre Oscar Masso, Chef de Département des Services Techniques de l'Aménagement et de l'Urbanisme à la CUE en collaboration avec Dr Yohan RICHARDSON du Laboratoire Biomasse, Energie et Biocarburants (LBEB) du 2ie.

Je tiens à remercier le Délégué du Gouvernement auprès de la Communauté Urbaine d'Edéa (CUE) pour m'avoir accueilli dans son institution et m'avoir fait confiance. Je lui suis très reconnaissant.

Je remercie tout le personnel du Laboratoire d'Analyse des Sols, Plantes, Engrais et Eau (LASPEE) de l'Institut de Recherche Agronomique pour le Développement (IRAD) du Cameroun pour m'avoir permis de participer à la réalisation des diverses manipulations.

Je remercie le personnel de la Communauté Urbaine d'Edéa et de HYSACAM EDEA pour l'accueil irréprochable au sein du groupe.

A toute ma famille.

Mes camarades de promotion, pour les moments de joie et de dures épreuves que nous avons eu à partager.

Mes amis (es) notamment OTAM, NKANO, NYAMEN, GNENTEDDEM, BIALA, SIMO, EVINA pour ne citer que ceux là.

RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude technico-économique de la production de l'énergie à partir du biogaz produit par les déchets municipaux.

Nous avons commencé par la présentation du concept de méthanisation, par la suite nous avons continué par la méthodologie de dimensionnement des installations, de l'étude économique et environnementale puis nous avons terminé en montrant qu'avec un investissement de 1 390 000 000FCFA nous avons un bénéfice de 1 051 450 520 FCFA après 20 années qui est la durée du projet avec un taux d'intérêt de 8% par an pour le crédit contracté.

Mots clés : Méthanisation, biogaz, digesteur, énergie thermique et énergie électrique, analyse économique et environnementale.

ABSTRACT

The work presented in this thesis focuses on techno-economic study of the production of energy from biogas produced by municipal waste.

We started by introducing the concept of methanization thereafter we continued the design methodology of facilities, economic and environmental study and we ended showing with an investment of 1,390,000 000FCFA we have a profit of 1 051 450 520 FCFA after 20 years which is the duration of the project with an interest rate of 8% per annum for the loan contracted.

Keys words: Biogas, biogas digester, thermal energy and electrical energy, economic and environmental analysis.

ABREVIATION

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AES/SONEL: American electronic service/société nationale d'électricité

ALUCAM: Aluminium du Cameroun.

CEMAGREF : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement.

dB : Décibel.

CUE : Communauté urbaine d'Edéa.

CVA : Charge volumique appliquée.

CMA : Charge massique appliquée.

DCO : Demande chimique en oxygène.

DIGES : Digestion anaérobie et gaz à effet de serre.

DRANCO: Dry anaerobic composting.

HYSACAM : Hygiène et salubrité du Cameroun.

IRAD : Institut de recherche agronomique pour le développement.

LBEB : Laboratoire biomasse énergie et biocarburant.

MDP : mécanisme de développement propre.

MO : Matière organique.

MS : Matière sèche.

OWS: Organic waste systems.

Sommaire

INTRODUCTION.....	8
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA METHANISATION	10
1-1- DEFINITION.	10
1-2- LES ETAPES BIOLOGIQUES DE LA METHANISATION.....	10
1-3- MISE EN ŒUVRE DE LA METHANISATION EN DIGESTEUR.....	11
1-4- CARACTERISTIQUE DU BIOGAZ.	17
1-5- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA METHANISATION.	20
CHAPITRE 2: MATERIELS ET METHODES	24
2-1- CARACTERISATION DE LA BIOMASSE.	24
2-2- CHOIX DE LA TECHNOLOGIE.....	24
2-3- METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT DU DIGESTEUR ET SES EQUIPEMENTS ANNEXES.	25
2-4- ANALYSE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.....	28
CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSION	31
3-1- RESULTATS DE L'ANALYSE DE LA BIOMASSE EFFECTUEE A L'IRAD.....	31
3-2- CHOIX DU PROCEDE.....	31
3-3- EVALUATION DE LA PRODUCTION QUOTIDIENNE DE BIOGAZ, DE METHANE ET D'ENERGIE PRIMAIRE.....	32
3-4- DETERMINATION DES DIMENSIONS DE LA PRE FOSSE, DE LA FOSSE DE STOCKAGE ET DU DIGESTEUR.....	32
3-5- DETERMINATION DE LA QUANTITE D'ENERGIE PRODUITE.....	34
3-6- ANALYSE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.....	34
CONCLUSION.....	38
BIBLIOGRAPHIE	39
ANNEXES	41

Liste des Figures

Figure 1.....8

Figure 1-1 : Etapes biologiques de la méthanisation (HESS J. , 2007)..... 11

Figure 1-2 : Les différents types de digesteurs : (a) Procédés pour boues (semi-solide), (b) Procédés pour liquides, (c) Procédés pour solides 12

Figure 1-3 : Schéma de digesteurs en fermentation sèche : (1) Valorga, (2) Dranco, (3) Kompogas ; (4) et (5) Systèmes d'agitation utilisés en fermentation humide 14

Figure 1-4: Effet de la température sur le taux de croissance des méthanogènes. [HESS J., 2007]..... 15

Figure 1-5 : Valorisation thermique du biogaz. 18

Figure 1-6 : Valorisation électrique du biogaz [CHASLERIE T.,2002]..... 18

Figure 1-7 : Valorisation en carburant automobile du biogaz [CHASLERIE T.,2002]..... 20

Figure 2-1 : Centre d'enfouissement technique de HYSACAM à EDEA (Cameroun)..... 24

Figure 2-2 : Forme du digesteur. 25

Figure 2-3 : Vue en coupe du digesteur 26

Figure 3-1 :Schéma synoptique de notre projet 32

Liste des tableaux.

Tableau1-1 : Traitement à effectuer suivant le type de valorisation.....	17
Tableau 3-1 : Rapport d'analyse de la biomasse effectué à l'IRAD.....	31
Tableau 3-2 : Production quotidienne de biogaz, de méthane et d'énergie primaire.....	32
Tableau 3-3 : Récapitulatif des dimensions du digesteur, de la pré fosse et de la fosse de stockage.....	33
Tableau 3-4 : Utilisation de l'énergie produite.....	34
Tableau3-5 : Récapitulatif de l'analyse économique du projet.....	36

INTRODUCTION

Les questions touchant à la gestion des déchets urbains et, par extension à la salubrité urbaine, comptent parmi les plus complexes auxquelles doivent répondre les gestionnaires des collectivités territoriales des pays en voie de développement en raison de leurs effets sur l'environnement et le développement durable. La Communauté Urbaine d'Edéa (collectivité territoriale du Cameroun) qui n'échappe pas à cette problématique, a optée pour la collecte, l'évacuation, le stockage, et l'enfouissement des ordures municipales à 17 kilomètres de la ville à travers la société HYSACAM (HYgiène et SALubrité du CAMeroun). Mais cette dernière solution se heurte aux rejets des effluents liquides (lixiviats) qui sont en partie traités sur le site de stockage et aux rejets atmosphériques (biogaz) qui polluent l'atmosphère et détruisent la couche d'ozone. Dès lors plusieurs autres pistes peuvent être explorées notamment la valorisation énergétique (chaleur, électricité, ...) des ordures municipales à travers le biogaz.

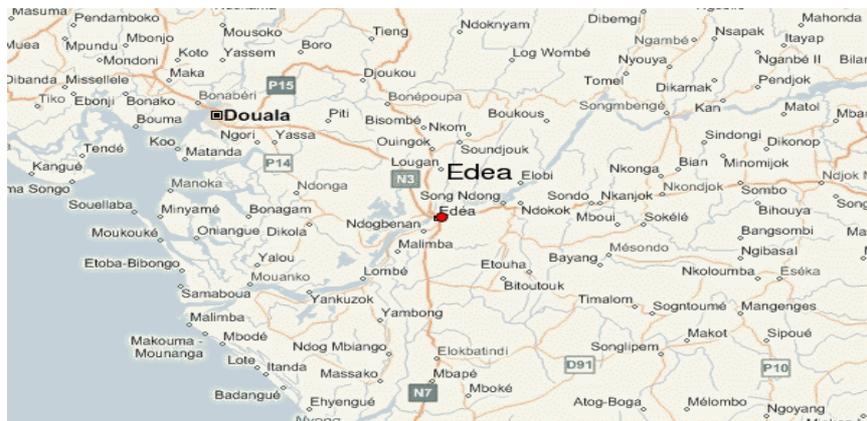


Figure 1 : Localisation de ville d'EDEA

En effet, les premières valorisations énergétiques du biogaz datent du dixième siècle avant Jésus Christ, où les Assyriens s'en servaient pour chauffer l'eau de leur bain. Puis après de nombreux développements technologiques, le procédé a franchi une étape avec l'utilisation de cuves appelées digesteurs qui permettaient de mieux contrôler le processus de fermentation anaérobie ou méthanisation des déchets dans les années 1930. Dans la décennie 1970-1980, suite aux deux crises énergétiques pétrolières, de nombreuses études poussées sur cette technologie ont permis le développement de nombreuses unités industrielles et agricoles à

travers plusieurs pays. Si pour diverses raisons la filière agricole s'est progressivement arrêté, au contraire au niveau industriel dépolluer tout en produisant une énergie utilisable a été et reste séduisant. Les principaux avantages liés à cette technologie résident dans la faible consommation énergétique du procédé (contrairement à la voie aérobie où l'on injecte de l'oxygène), l'implantation limité des équipements nécessaires rendant une unité de méthanisation bien plus petite que son homologue aérobie, le rendement d'épuration performant d'un digesteur et pouvant accepter des charges organiques élevés, la faible (voire inexistante) production de boue, la possibilité de valoriser une partie de l'énergie biogaz produite.

Le traitement des déchets municipaux par méthanisation a démarré à l'échelle industrielle en 1988 avec la première installation au monde à Amiens, traitant 80.000t/an de déchets ménagers et utilisant le digesteur mis au point par la société VALORGA. Depuis des améliorations sur la qualité du déchet collecté et/ou trié a permis un développement important de cette technologie en Europe et dans le Monde.

Dans le cadre des efforts pour la mise en place d'un développement durable, et de l'assainissement des villes, la méthanisation de par ses nombreux atouts notamment la valorisation électrique du biogaz produit, peut avoir une place prépondérante dans beaucoup de secteurs de l'économie et ainsi peser sur les stratégies de développement qui seront mises en place.

Ce travail qui s'est déroulé à la Communauté Urbaine d'EDEA et à HYSACAM EDEA pendant 3 mois était porté sur l'étude de faisabilité sur la production de l'électricité à partir du biogaz à EDEA et avait pour objectifs de :

- Dimensionner une installation de valorisation du biogaz.
- Effectuer une analyse économique et environnementale du projet.

Methodologie

Outre l'introduction et la conclusion, ce travail comprend trois chapitres à savoir :

Généralités sur la méthanisation : où il sera question de cerner le concept de production du biogaz, ses avantages et inconvénients.

Matériels et Méthodes : dont l'objectif est de dérouler la méthodologie de dimensionnement d'une installation de valorisation du biogaz et le coût d'une telle installation.

Résultats et discussions : ici il sera question de présenter les résultats et de les commenter.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA METHANISATION

1-1- DEFINITION.

La méthanisation ou **digestion anaérobie** est un processus biologique de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène et qui conduit à la formation d'un mélange gazeux (majoritairement formé de méthane (CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2)) et du digestat qui est le résidu contenant les matières non dégradées.

Son principe est le suivant :



La méthanisation peut s'appliquer à différentes matières¹ comme la fraction organique des déchets ménagers, les boues de fosses septiques, les déchets organiques d'élevage et d'agriculture (lisier de porc, fumier, pailles,...), les boues de station d'épuration, les résidus de distillation de vin, ... [1]

1-2- LES ETAPES BIOLOGIQUES DE LA METHANISATION.

La méthanisation se déroule en 4 étapes successives qui sont l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse ; les microorganismes spécifiques des premières étapes servent de substrats pour les étapes suivantes (Figure 1-1).

1-2-1- Hydrolyse.

Cette première série d'opérations va transformer les matières organiques complexes (polysaccharides, protéines, lipides,...) en molécules plus simples, comme des sucres, des alcools et des acides aminés.

1-2-2- Acidogénèse.

Les molécules obtenues sont transformées en acides gras volatils, en alcools (ex : éthanol), en acides organiques (ex : acide lactique), en hydrogène (H_2) et en dioxyde de carbone (CO_2)

1-2-3- Acétogénèse.

Les acides gras volatils sont transformés en acétate, hydrogène (H_2) et dioxyde de carbone

¹ Composées majoritairement de carbohydrates (cellulose et hémicellulose).

(CO₂).

1-2-4- Méthanogénèse.

La toute dernière étape permet la formation de méthane soit par dégradation de l'acétate (environ 70 % de la production), soit par réduction du CO₂ par l'hydrogène (environ 30 % de la production).

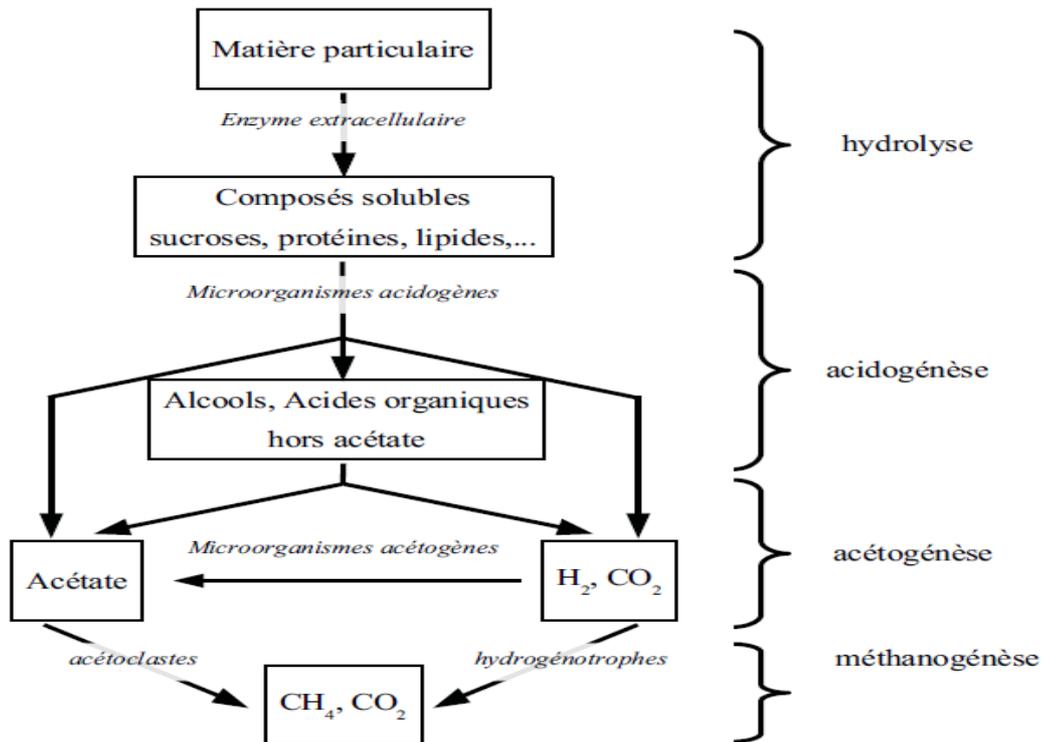


Figure 1-1 : Etapes biologiques de la méthanisation [2]

1-3- MISE EN ŒUVRE DE LA METHANISATION EN DIGESTEUR.

A l'état naturel, on observe la production de biogaz dans les marais, les rizières ou dans le tube digestif des ruminants. Le principe des unités de méthanisation est de recréer et d'optimiser ce phénomène dans des digesteurs puis de capter ce biogaz pour le valoriser énergétiquement. Cependant il est à noter que pour une bonne méthanisation, il faut effectuer un tri qui aboutit à la séparation des déchets (déchets dangereux, déchets valorisables, matières organiques.) si la collecte sélective des déchets ménagers n'est pas réalisée.

La mise en œuvre de la méthanisation en digesteur va dépendre de plusieurs paramètres, parmi les principaux nous retiendrons : le type de digesteur, la température, le pH, les substances inhibitrices, le mixage dans des proportions définies, le rapport C/N, le taux de charges organiques ...

1-3-1- Types de digesteurs.

Le digesteur, encore appelé fermenteur ou bioréacteur - anaérobie est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle différents microorganismes se côtoient pour dégrader et biochimiquement les déchets et effluents organiques et produire du biogaz. Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application visée. On peut classer les digesteurs selon [3] :

- Le mode d'alimentation : batch, continu ou semi-continu ;
- Le types de substrats : solide, semi-solide ou liquide ;
- Le nombre d'étapes : mono- ou bi-étape selon que la méthanogénèse et l'acidogénèse se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées.

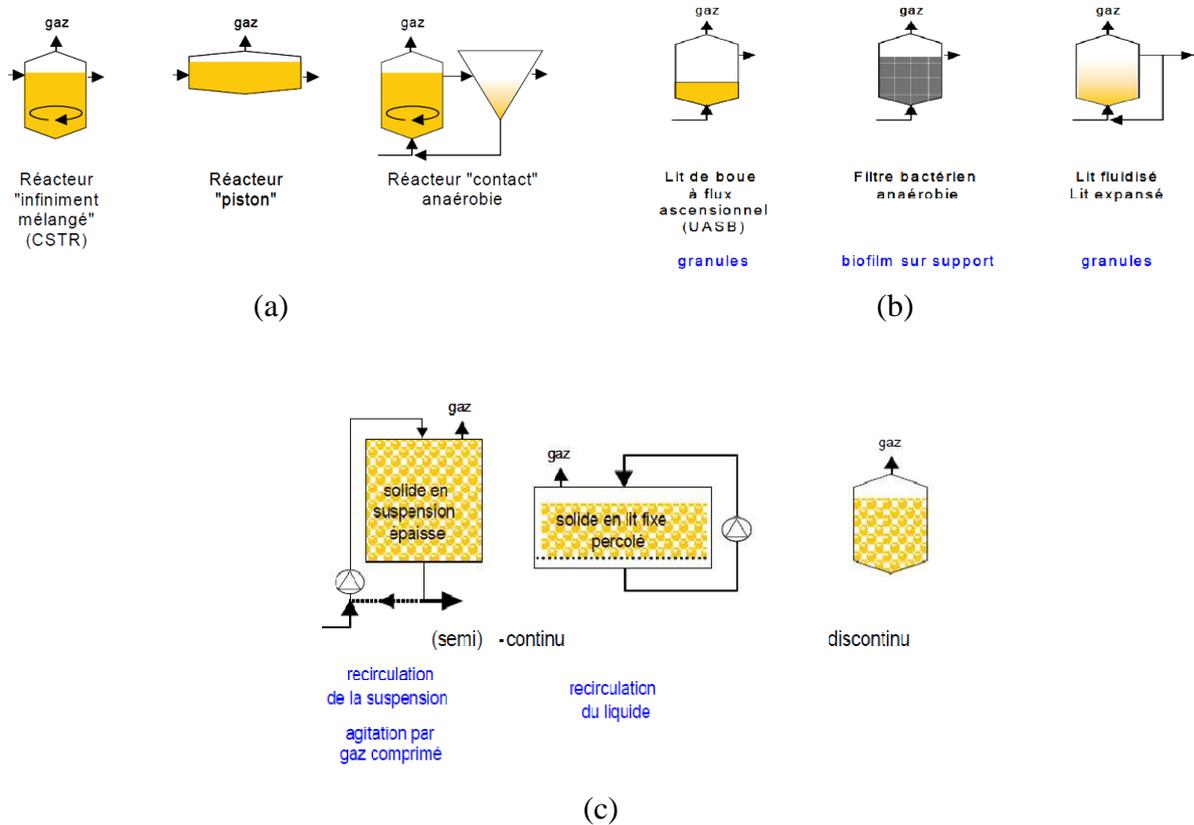


Figure 1-2 : Les différents types de digesteurs : (a) Procédés pour boues (semi-solide), (b) Procédés pour liquides, (c) Procédés pour solides [3]

A- Mode d'alimentation.

Le digesteur batch ou discontinu : Il a l'avantage d'être d'une construction simple. Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, le temps de rétention étant fonction de la température et d'autres facteurs. A la fin de

la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ces systèmes, rustiques et d'une grande simplicité technique, sont avantageux pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière : au début du cycle, la fermentation du substrat ne venant que de commencer, la production de biogaz est lente. Elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute en fin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur.

Dans **un digesteur continu**, le substrat introduit de manière continue est digéré et déplacé soit mécaniquement, soit sous la pression des nouveaux intrants vers la sortie sous forme de digestat. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille. Il existe trois principaux types de digesteurs continus : système à cuve verticale, système à cuve horizontale et système à « cuves multiples ».

Le digesteur semi-continu fonctionne avec une combinaison des propriétés des deux précédents afin de tirer profit des avantages des deux extrêmes.

B- Type de substrats.

Cette classification des digesteurs est fonction de la teneur en matière sèche des matières organiques qui affecte leur consistance.

- ✓ *Solide* : teneur en matière sèche > 15%
- ✓ *Semi-solide ou pâteux* : teneur en matière sèche comprise entre 5 et 15 %
- ✓ *Liquide* : teneur en matière sèche inférieure à 5 %.

Selon que la teneur en matière en sèche des déchets soit supérieure ou inférieure à 15%, on parle de fermentation sèche dans le premier cas et de fermentation humide dans le second. Ainsi plusieurs constructeurs ont développé des procédés pour l'un ou l'autre cas : on parle alors des méthaniseurs horizontaux avec agitation mécanique pour la fermentation humide (Kompogas, Linde...) et verticaux sans agitation mécanique pour la fermentation sèche (Dranco, Valorga,...) [4], [5].

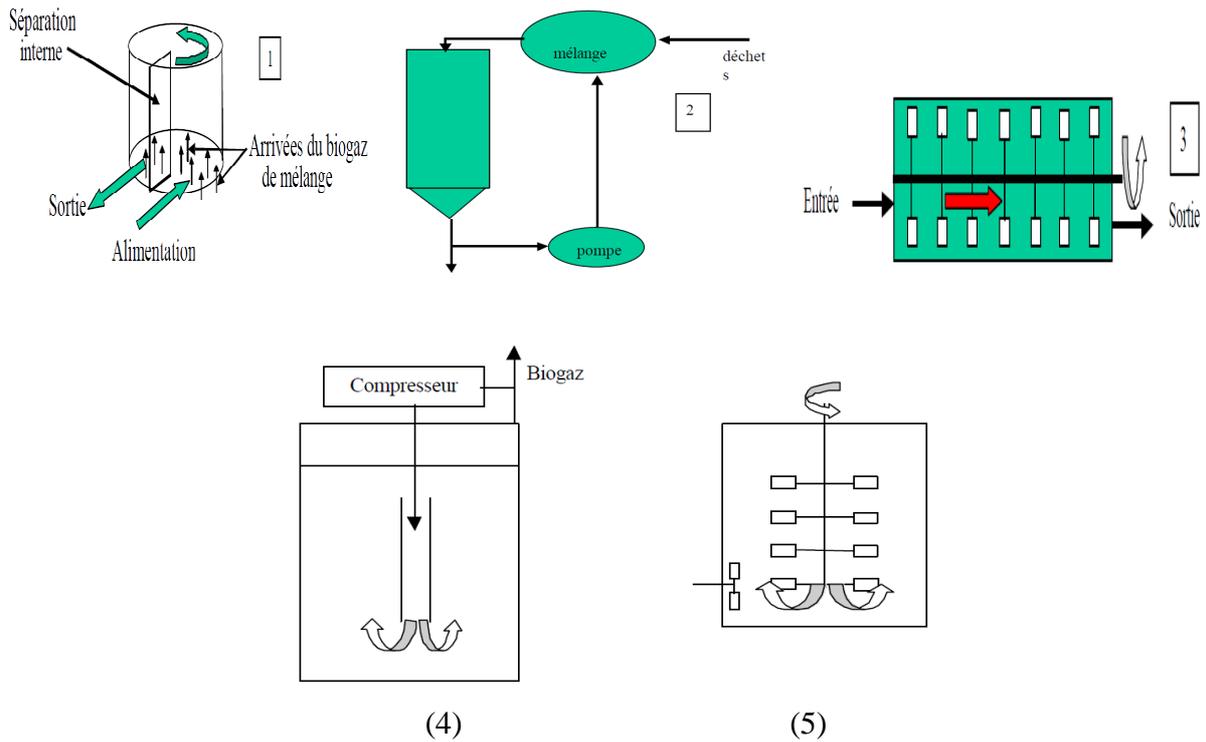


Figure 1-3 : Schéma de digesteurs en fermentation sèche : (1) Valorga, (2) Dranco, (3) Kompogas ; (4) et (5) Systèmes d'agitation utilisés en fermentation humide.[4]

C- Etapes.

Dans les **procédés mono-étapes**, toutes les étapes de la digestion ont lieu dans la même enceinte. Ils sont exploitables en continu ou en batch, et principalement appliqués pour des substrats allant jusqu'à 40 % de MS.

Les **procédés bi-étapes** sont caractérisés par le fait que l'hydrolyse et l'acidification sont nettement séparées de la phase suivante de méthanisation. La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée. L'avantage des procédés bi étape réside dans les courts temps de décomposition de la matière solide, de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases réduit le risque d'intoxication des cellules méthanogènes liée à la présence d'acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogénèse n'est pas complètement terminée car trop rapide par rapport à la capacité d'assimilation des micro-organismes méthanogènes.

Certains digesteurs sont dits **mixtes ou intégrés**. Plus exactement, c'est l'installation et non le digesteur qui est mixte. Le principe consiste à faire subir au substrat organique une digestion anaérobie et récupérer le sous-produit qui est ensuite stabilisé par l'étape de compostage. Ces procédés mixtes permettent la réduction des systèmes de traitement du

liquide issu du digesteur anaérobie, ce dernier servant en grande partie pour l'humidification du compost. Le second avantage est la stabilisation quasi totale du substrat organique en raison de la complémentarité des deux systèmes.

1-3-2- La température.

La digestion anaérobie se décline sous trois types différents suivant la température :

- lorsque la température est inférieure à 20°C, la digestion est de type psychrophile,
- lorsque la température est comprise entre 28 °C et 45°C, la digestion est de type mésophile,
- lorsque la température est supérieure à 45°C, la digestion est thermophile.

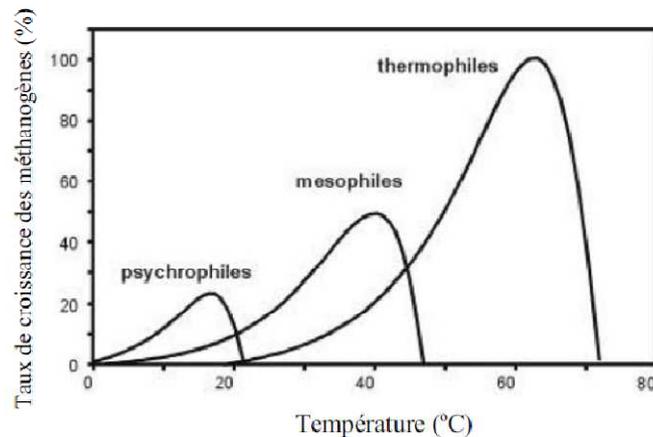


Figure 1- 4 : Effet de la température sur le taux de croissance des méthanogènes. [2]

1-3-3- Le pH.

C'est l'un des plus importants facteurs d'adaptation des populations bactériennes. Les bactéries acétogènes restent actives jusqu'à un pH de 5, mais les bactéries responsables de la méthanisation sont inhibées dès que le pH descend en-dessous de 6,2. C'est pourquoi la zone théorique optimale de pH à respecter s'étend de 6,8 à 7,2. Dans le cas d'une chute de pH due à une augmentation de la concentration en acides gras, un ajout de soude ou de chaux, au niveau de l'alimentation en boues fraîches épaissies ou directement dans le digesteur, permet le maintien du pH.

1-3-4- Le Taux de charges organiques.

On distingue deux types de charge :

- la charge volumique appliquée (CVA) qui correspond à la quantité quotidienne de matières organiques introduites par unité de volume du réacteur biologique. Les unités généralement utilisées sont des kg MO/m³.j (MO : Matière Organique) dans les domaines de l'agriculture et des collectivités, ou des kg DCO/m³.j (DCO : Demande Chimique en Oxygène) dans le domaine de l'agro-industrie.

- La charge massique appliquée (CMA) qui correspond à la quantité quotidienne de matières organiques introduites par quantité de biomasse présente dans le digesteur (kg DCO/kg MVS.j). Un taux de charge trop élevé peut amener à l'arrêt de la digestion anaérobie due à une présence trop importante d'acides gras.

1-3-5- Le mixage.

L'objectif du mixage dans un digesteur est de mélanger la matière fraîche entrante avec du digestat contenant des bactéries. De plus, le mixage empêche la formation d'une croûte et évite les gradients de température. Néanmoins un mixage excessif peut rompre les colonies bactériennes, c'est pourquoi un mixage lent est préférable.

1-3-6- Le rapport carbone/azote (C/N).

Le rapport carbone / azote (C / N) est une mesure de la quantité relative de l'azote et du carbone organique présent dans la charge. Si le rapport C / N est très élevé, les déchets utilisés comme substrat auront une carence en azote, ce qui est pourtant nécessaire pour développer des communautés bactériennes. En conséquence, la production de gaz sera faible. Si le rapport C / N est très faible, l'azote est libéré et s'accumule sous forme d'ammoniac. Cela permettra d'accroître la valeur du pH de la matière et un pH supérieur à 8,5 sera toxique sur les communautés bactériennes méthanogènes. Ainsi un rapport C/N de 20-30 est considéré comme optimal pour un digesteur anaérobie [6].

1-3-7- Les substances inhibitrices.

On distingue plusieurs types d'inhibiteurs de la digestion : Certains cations et les sulfures, et les éléments-traces.

Les éléments-traces affectent, en activateurs ou inhibiteurs, le procédé de digestion anaérobie :

- Ils sont nécessaires à la croissance de certaines bactéries, les bactéries méthanogènes par exemple.

- Ils inhibent la toxicité produite par les sulfures.

- Ils permettent la formation de phosphates et l'agrégation des bactéries.

Toutefois en trop grande concentration, les éléments-traces inhibent l'accroissement des bactéries et donc la production de méthane.

- Certains composés organiques : cyanures, phénols, phtalates.

- et d'autres tels que les antibiotiques, les détergents, les produits de désinfection les herbicides et insecticides, les solvants...

1-4- CARACTERISTIQUES DU BIOGAZ.

Un des intérêts de la digestion anaérobie réside dans le biogaz produit qui est valorisable. Il est majoritairement composé de méthane (CH₄), de dioxyde de carbone (CO₂), et dans une moindre mesure de sulfure d'hydrogène (H₂S), di azote (N₂), voire de dihydrogène(H₂) et de composés volatils,...Ce mélange est en règle générale saturé en vapeur d'eau.

Les caractéristiques du biogaz étant proche de celle du gaz naturel, il peut aussi être valorisée comme ce dernier sous forme de chaleur, électricité, carburant, injecté au réseau de gaz, en cogénération ou en tri-génération à condition d'apporter le traitement adéquat [7].

Mode de valorisation	Chaleur	Electricité-cogénération	Injection au réseau local de distribution de gaz	Carburant
Composés à éliminer	Eau, H ₂ S	Eau, H ₂ S, Organo-halogénés	Eau, H ₂ S, Organo-halogénés, CO ₂ , Métaux, Oxygène	Eau, H ₂ S, Organo-halogénés, CO ₂ , Métaux

Tableau1-1 : Composés à éliminer selon le type de valorisation.

1-4-1- Valorisation thermique.

La combustion directe du biogaz pour produire de la chaleur (eau chaude ou air chaud) est la solution la plus facile à mettre en œuvre et la moins exigeante en termes de qualité du biogaz. Il est aisé d'adapter des chaudières au gaz naturel pour qu'elles puissent fonctionner avec du biogaz. Les modifications à apporter concernent essentiellement le brûleur pour lequel le système d'admission doit être agrandi et la prise d'air diminuée afin d'abaisser le rapport air/carburant. Le rendement typique de ces installations est de l'ordre de 90%. [8].

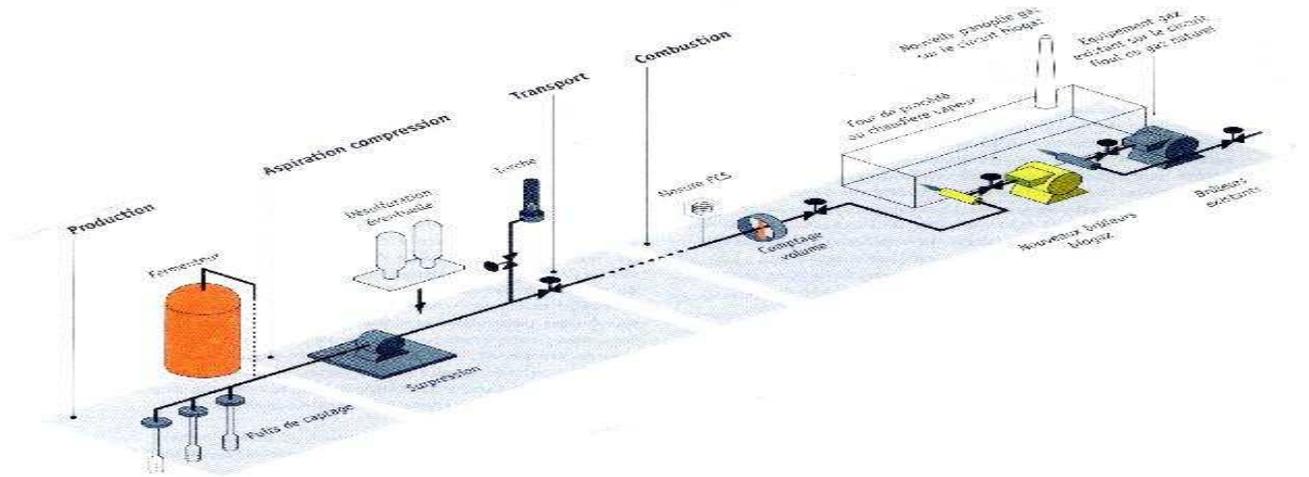


Figure 1-5 : Valorisation thermique du biogaz [8].

1-4-2- Valorisation électrique.

Lorsque le centre d'enfouissement technique ou les fermenteurs ne sont pas situés à proximité d'un industriel et lorsque les besoins thermiques locaux sont négligeables en regard de l'énergie biogaz disponible, une source de valorisation possible est la production d'électricité à partir d'un moteur ou d'une turbine à gaz qui entraînent un alternateur, avec autoconsommation locale ou revente partielle du surplus à l'opérateur local chargé de commercialiser l'électricité. Le rendement de ces installations reste tout de même faible de l'ordre de 35%. [8].

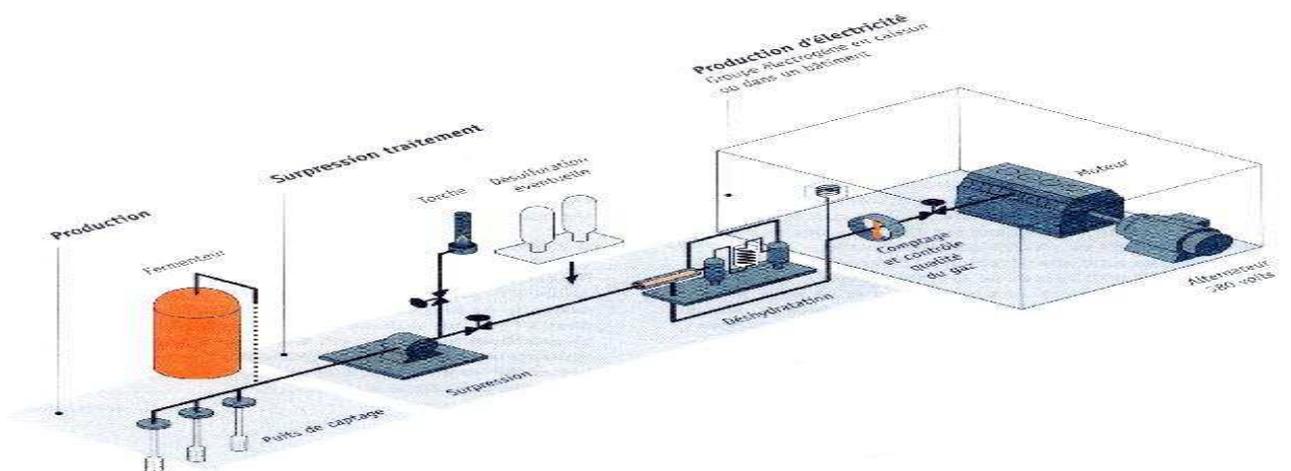


Figure 1-6 : Valorisation électrique du biogaz [8].

1-4-3- Cogénération et tri-génération.

A- Cogénération.

La cogénération permet de produire à la fois de l'énergie de travail (électrique ou mécanique), et de l'énergie thermique. Ce système de production d'énergie offre des rendements très élevés, de 80 à 95%. La cogénération permet avant tout de réaliser des économies d'énergie primaire. L'énergie mécanique est produite par un moteur ou une turbine, et plutôt que de perdre l'énergie thermique dans une tour de refroidissement, la chaleur est récupérée ; elle peut servir par exemple à chauffer des fermenteurs méthanogènes, à sécher des digestats, à produire de l'eau chaude, ou encore à alimenter un système de chauffage ou de climatisation. L'électricité peut être utilisée sur place, ou bien revendue lorsqu'elle est produite en excès. Il est à noter que la production d'électricité ou la cogénération se fait à l'aide d'un moteur à gaz ou d'une turbine à gaz.

B- Tri-génération

Les systèmes de tri-génération permettent de produire à la fois de l'énergie mécanique, et de l'énergie thermique sous forme de chaleur et de froid. La tri-génération saisonnière est une combinaison d'un système de cogénération chaleur-électricité pour l'hiver et froid-électricité pour l'été. Les hôpitaux, bureaux ou aéroports sont des clients pour cette technologie. La tri-génération permet de mieux rentabiliser une installation de cogénération grâce à une durée d'utilisation plus élevée sur l'année.

1-4-4- Biogaz carburant et injection dans le réseau local de gaz.

A- Biogaz carburant.

Le biogaz est une alternative aux carburants traditionnels ; il permet de réduire les émissions atmosphériques (20 à 30% de réduction des émissions de CO₂ d'origine fossile, réduction de l'émissions de particules,...). De nombreuses collectivités et entreprises ont investi dans des flottes de véhicules roulant au gaz naturel pour véhicule. L'utilisation de ce carburant est moins répandue chez les particuliers en raison du faible déploiement des stations de remplissage. Ce mode de valorisation est assez exigeant car les caractéristiques du biogaz doivent être similaires à celles du gaz naturel ; il est donc nécessaire d'augmenter les proportions de méthane jusqu'à 97%. Le biogaz devant être comprimé, il est essentiel de réduire sa teneur en vapeur d'eau pour éviter la formation de glace au moment de la compression. La rentabilité de ce mode de production dépend avant tout de la composition du biogaz brut, et du niveau de purification à lui apporter.

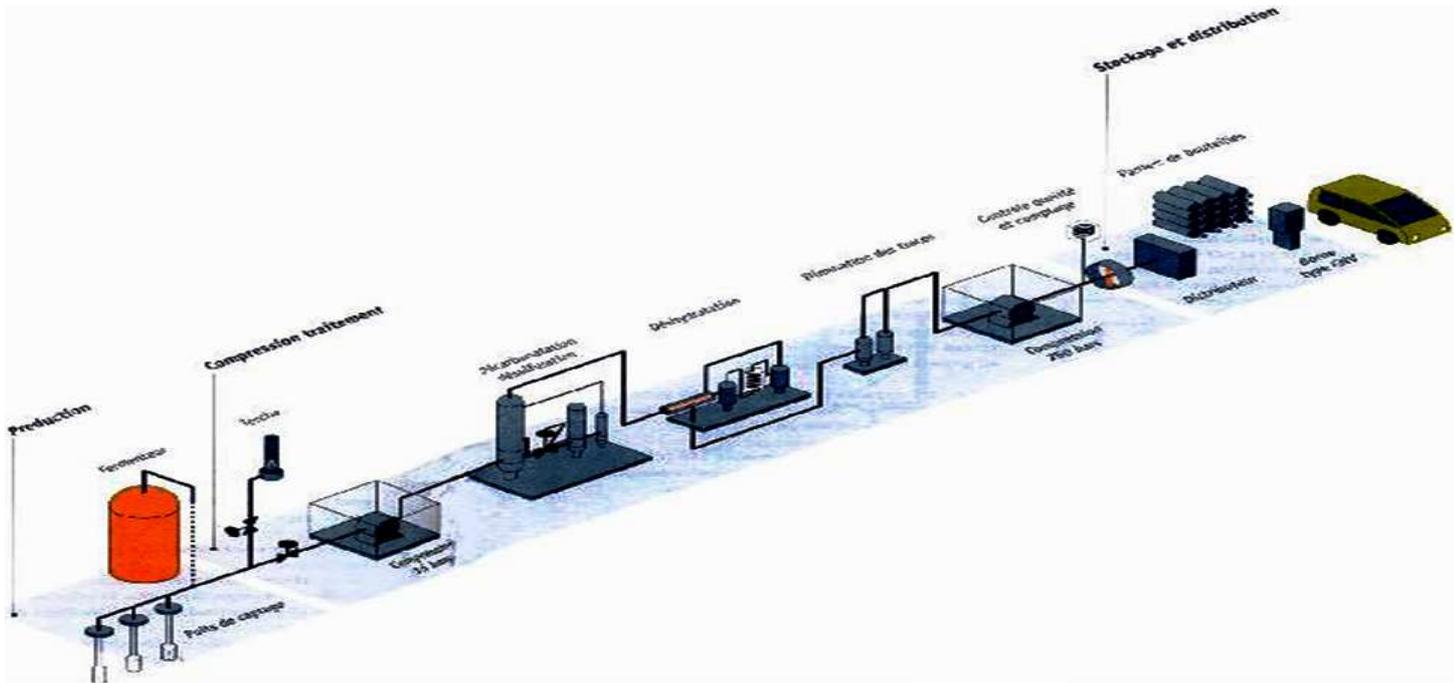


Figure 1-7 : Valorisation en carburant automobile du biogaz [8].

B- Injection dans le réseau local de gaz.

L'injection du biogaz dans le réseau de gaz de ville est la dernière filière de valorisation. Les contraintes en termes de qualité du biogaz sont dictées par le gestionnaire du réseau. Ces spécifications portent avant tout sur la teneur en méthane, et les composés organo-halogénés.

1-4-5- Le digestat.

Au cours de la digestion, les 2/3 de la matière organique biodégradable sont transformés en biogaz. Le tiers restant constitue le digestat, composé de matière organique humidifiée (la lignine a été totalement conservée), d'éléments fertilisants et d'eau. Les avantages de la digestion pour le traitement des effluents et des déchets est de réduire les odeurs de ceux-ci et de produire du biogaz pouvant servir de sources d'énergie. Ce procédé de traitement permet de réduire fortement la teneur en acides gras volatils, principaux responsables des odeurs désagréables des effluents d'élevage. Le digestat obtenu est homogène, ce qui facilite l'épandage. Par rapport à la biomasse de départ, le digestat présente un rapport C/N plus faible, principalement dû à la mobilisation des atomes de carbone pour la production du biogaz. Le digestat est donc plus pauvre en matière organique.

1-5- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA METHANISATION.

1-5-1- Avantages.

Hors mis les avantages cités plus haut on peut encore noter [9] :

- Diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Lors de la biométhanisation, le méthane, qui a un impact sur le réchauffement climatique 21 fois plus important que le CO₂, n'est plus libéré de façon incontrôlée dans l'atmosphère.

Une double réduction des émissions de GES est réalisée d'une part en évitant les émissions de méthane et d'autre part en évitant les émissions en CO₂ résultant de la combustion d'énergie fossile, grâce à la valorisation énergétique du biogaz.

- Réduction des odeurs.

Une grande partie des odeurs émises par les effluents organiques sont dues à la présence de matière organique en décomposition et spécialement aux acides gras volatils.

Dans les déchets biométhanisés, toute la matière organique facilement dégradable a été détruite. En conséquence, la biométhanisation permet de désodoriser partiellement les substrats.

De plus dans ce type d'installation, les déjections restent en permanence confinées à l'abri de l'air ce qui limite les émissions d'odeurs.

- Hygiénisation

En terme d'hygiénisation, la biométhanisation permet de réduire en partie la teneur en germes pathogènes, ainsi que de détruire les graines d'adventices qui peuvent être présentes dans les déjections, les fumiers ou les plantes énergétiques.

1-5-2-Inconvénients.

- Investissement important.

Le principal inconvénient de la biométhanisation réside dans la lourdeur des investissements à consentir qui, malgré des frais de fonctionnement très faibles, sont économiquement assez dissuasifs, Il est estimé pour les projets « à la ferme », des investissements de l'ordre de 270 000 € (176 850 000 FCFA) pour une puissance de 30 kW, 800 000 € (524 000 000 FCFA) pour 150 kW et de 1,3millions d'euros (851 500 000 FCFA) pour 250 KW [10];

- Pas de diminution de la charge polluante.

La biométhanisation ne constitue pas une solution définitive aux problèmes de la charge polluante des élevages. En effet, les excédents en azote et phosphate provenant des élevages ne sont pas éliminés et le volume des effluents n'est que faiblement diminué.

1-6-Evaluation des impacts environnementaux.

Outre les effets favorables de la filière biométhanisation sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre, il y a lieu d'évaluer les impacts de la mise en œuvre d'une unité de biométhanisation sur l'environnement naturel et humain.

➤ Impact paysager.

Une unité de biométhanisation de type agricole occupe une superficie de 30 à 80 ares et rassemble au maximum :

- une fumière couverte ou non servant au stockage de fumier ;
- une pré-fosse ou pré-digester, un digester, un post-digester et une cuve de stockage final.

Ceux-ci peuvent être totalement enterrés, semi-enterrés ou hors sol, de forme ronde ou rectangulaire, en béton, en acier ou bardés de bois, présentant des impacts paysagers variables.

Les volumes des digesteurs, cuve finale, sont variables de $\pm 500 \text{ m}^3$ à 3000 m^3 ce qui peut présenter des dimensions maximales de l'ordre de 10 à 25 m de diamètre et 8 m de haut.

Les cuves sont couvertes soit de béton (rarement) soit d'une géomembrane noire qui se gonfle sous la pression du biogaz ;

- un bâtiment technique renfermant le bloc moteur, le circuit de chaleur, les compteurs, ...

Considérant :

- la possibilité, en fonction du type de sol et sous-sol, d'enterrer les cuves ;
- la mise en place de bardage et finition autour des parties hors sol ;
- la nécessité de clôturer le site et des plantations ;
- la situation en zone agricole ou en zone d'activité économique éloignées des zones d'habitat ;

Les impacts paysagers sont peu importants.

➤ Impact olfactif.

A l'exception du transport du fumier et du stockage de celui-ci au niveau de la fumière couverte ou non, il n'y a aucun impact en matière d'odeur, le processus étant totalement hermétique tant au niveau des digesteurs, post-digester que du stockage des effluents liquides et du digestat.

Au niveau des moteurs, il y a lieu de signaler dans le cas de moteur fuel un petit dégagement

de fumée et CO₂, mais relativement faible.

➤ Bruit.

Tant le processus de dégradation des matières organiques que la production d'électricité et de chaleur n'engendrent aucun bruit, le moteur étant placé dans un local technique totalement insonorisé.

Les niveaux de bruit relevés sur des sites en activité sont de l'ordre de 35 dB.

➤ Charroi.

L'activité, en fonction de sa taille et du type de matière biométhanisée engendre du charroi mais en quantité relativement faible.

A titre d'exemple, pour une unité traitant 6000 tonnes de fumier, le nombre moyen de passages journaliers est de 8, résultant de l'apport des matières organiques et de la reprise du digestat.

➤ Sécurité.

Les risques inhérents au stockage du biogaz et son utilisation au niveau des moteurs sont pratiquement nuls. Il y a toutefois lieu de faire vérifier l'unité par le service incendie, de prévoir des événements en cas d'explosion au niveau du bâtiment de maintenance des moteurs. Le biogaz stocké au niveau des digesteurs est évacué dans l'atmosphère en cas de surpression.

CHAPITRE 2

MATERIELS ET METHODES

2-1- CARACTERISATION DE LA BIOMASSE.

Comme biomasse, nous nous sommes intéressés uniquement aux déchets biodégradables (résidus de transformation des aliments, résidus de déchets urbains,...) qui ont été prélevés au centre d'enfouissement technique (Figure 2-1) de la société HYSACAM à 17 km de la ville d'EDEA. Dans un premier temps, nous avons tout d'abord prélevé des échantillons à plusieurs endroits dans la décharge ensuite nous avons creusés plusieurs trous de 30 à 40 cm de profondeur pour prélever d'autres échantillons. Après homogénéisation, nous avons obtenu un échantillon final que nous avons conditionné dans un emballage en plastique. Notre échantillon final a été transféré deux jours plus tard à l'IRAD de Yaoundé. Il a été ensuite analysé selon la norme NF ISO 11645 pour déterminer sa teneur en matière sèche, puis selon la norme NF ISO 14235 pour déterminer sa teneur en matière organique et en carbone et enfin selon une méthodologie décrite dans [11] pour déterminer sa teneur en azote.



Figure 2-1 : Centre d'enfouissement technique de HYSACAM à EDEA (Cameroun).

2-2- CHOIX DE LA TECHNOLOGIE.

Le choix du procédé utilisé sera fonction des résultats de l'analyse effectuée à l'IRAD. Une fois ce choix effectué nous dimensionnerons les équipements entrant dans notre projet.

2-3- METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT DU DIGESTEUR ET SES EQUIPEMENTS ANNEXES.

2-3-1- Evaluation de la fraction fermentescible des déchets collectés.

La société HYSACAM collecte en moyenne 80 tonnes de déchets par jour dans la ville d'EDEA. La quantité d'ordures biodégradables sera prise à 50% des déchets collectés [12].

2-3-2- Evaluation de la production quotidienne de biogaz, de méthane et d'énergie primaire.

Connaissant la masse de déchets disponible par jour M , la composition en matière organique des déchets MO et la productivité du biogaz P on a [13] :

$$\text{production quotidienne de biogaz} = \frac{M * P}{100} * MO$$

M est en tonne par jour et P en m^3/t de matière organique et sera prise à $450 m^3$ /tonnes de matières organiques [Tchouate et al, 2003].

En supposant que le biogaz est composé à 60% de Méthane on obtient :

$$\text{production quotidienne de méthane} = \text{production quotidienne de biogaz} * \frac{60}{100}$$

Connaissant le PCI du méthane qui est de $9.94 \text{ KWh}/m^3$, la production quotidienne d'énergie primaire est donnée par :

$$\text{production quotidienne d'énergie primaire} = \text{production quotidienne de méthane} * 9.94 \text{ KWh}/m^3$$

Car $1m^3$ de $CH_4 = 9,94 \text{ KWh}$ d'énergie primaire

2-3-3- dimensionnement de la pré fosse.

En estimant la densité des substrats à $1000 \text{ kg}/m^3$, le volume de la pré fosse est donnée par :

$$\text{le volume de la pré fosse} = 2 * \text{volume quotidien de substrats (en } m^3)$$

2-3-4- dimensionnement de la fosse de stockage.

Le volume de la fosse de stockage dépend de la fréquence d'épandage, dans notre cas nous la prendrons à 30 jours. Le volume de la fosse de stockage est alors donné par la formule

$$\text{le volume de la fosse de stockage} = 30 * \text{volume quotidien de substrats (en } m^3)$$

2-3-5- Dimensionnement du digesteur.

Le digesteur est modélisé par une cuve de forme cylindrique et ayant à sa base inférieur une demi-sphère (Figure 2-2).



Figure 2-2 : Forme du digesteur.

Le volume total de notre digesteur est calculé comme suit :

volume total = temps de séjour des substrats * volume quotidien de substrats (en m³)
 et volume total = volume de la partie cylindrique + volume de l'hémisphère.

✓ Cas de la partie cylindrique.

Connaissant le volume de la partie cylindrique, on peut déterminer la surface interne minimale y correspondant. Cette surface est mathématiquement connue pour H=2*R. C'est donc ce ratio entre le rayon et la hauteur du digesteur qui va permettre d'avoir le moins de pertes par conduction possible.

Ce ratio n'est cependant pas toujours réaliste. En choisissant la relation entre le rayon et la hauteur H = X*R, il est possible de calculer la surface correspondante.

En effet : H = X*R (en m) et $R = \sqrt[3]{\frac{\text{volume du cylindre}}{\pi * X}}$ (en m)

Il est dès lors possible de faire varier le rapport entre le rayon et la hauteur pour connaître la surface et estimer le réalisme d'une telle construction, en prenant en compte la construction et les pertes thermiques correspondantes.

✓ Cas de la partie hémisphérique.

Quant à la partie hémisphérique, son diamètre sera le diamètre du cylindre.

2-3-6- Evaluation des besoins en énergie thermique.

✓ Cas des pertes par conduction pour le digesteur.

On suppose que le digesteur est composé de deux couches de matériaux permettant d'assurer la rigidité et l'isolation de la cuve.

Les caractéristiques de ces deux couches autorisent alors le calcul des volumes et surfaces externes, mais aussi le calcul des pertes thermiques par diffusion (les pertes par convection sont estimées être négligeables).

Le digesteur est alors modélisé de la façon suivante (Figure 2-3) pour le calcul des pertes :

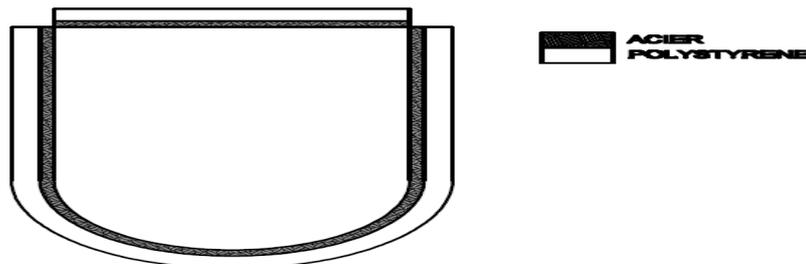


Figure 2-3 : Vue en coupe du digesteur

Connaissant la conductivité thermique de l'acier K_a , du polystyrène K_p , l'épaisseur du polystyrène e et l'épaisseur de l'acier a , on peut déterminer les résistances thermiques de la manière suivante :

➤ Partie cylindrique.

$$R_{th.lat.acier} = \frac{1}{K_a} \left[\frac{\ln \left(\frac{R_{int+e+a}}{R_{int+e}} \right)}{2\pi(H_{cylindre+e+a})} \right] \text{ et } R_{th.lat.polystyrène} = \frac{1}{K_p} \left[\frac{\ln \left(\frac{R_{int+e}}{R_{int}} \right)}{2\pi(H_{cylindre+e+a})} \right]$$

$$R_{th.haut.acier} = \frac{1}{K_a} \left[\frac{a}{\pi R_{int}^2} \right] \text{ et } R_{th.haut.polystyrène} = \frac{1}{K_p} \left[\frac{e}{\pi R_{int}^2} \right]$$

➤ Partie hémisphérique.

$$R_{th.hémi.polystyrène} = \frac{1}{2K_p} \left[\frac{\left(\frac{1}{R_{sphère}} - \frac{1}{R_{sphère+e}} \right)}{4\pi} \right] \text{ et}$$

$$R_{th.hémi.acier} = \frac{1}{2K_a} \left[\frac{\left(\frac{1}{R_{sphère+e}} - \frac{1}{R_{sphère+a+e}} \right)}{4\pi} \right]$$

La résistance thermique de conduction est alors donnée par :

$$R_{th.conduction} = \frac{1}{\frac{1}{R_{th.hémi.acier} + R_{th.hémi.polystyrène}} + \frac{1}{R_{th.haut.acier} + R_{th.haut.polystyrène}} + \frac{1}{R_{th.lat.acier} + R_{th.lat.polystyrène}}}$$

Connaissant la différence de température entre l'extérieur du digesteur et l'intérieur (température de digestion), on peut calculer les pertes thermiques :

➤ $Puissance_{pertes} = \frac{T_{digestion}^{\circ} - T_{extérieure}^{\circ}}{R_{th \text{ de conduction}}} (W)$

➤ $Energie \text{ des pertes} = Puissance_{pertes} * 24 (Wh/jour)$

✓ Cas du chauffage des substrats entrants dans le digesteur.

Connaissant le volume quotidien de substrat, et sa chaleur massique spécifique (en J/kg/°C), on peut calculer l'énergie comme suit :

$$Energie \text{ de chauffage substrats} = volume \text{ quotidien} * (T_{digestion}^{\circ} - T_{extérieure}^{\circ}) * \frac{chaleur \text{ massique}}{3600} (Wh/jour)$$

✓ Cas de la fosse de stockage.

Notre fosse de stockage aura une forme parallélépipédique

2-3-7- Dimensionnement de la pompe.

Cette pompe doit vaincre une hauteur H et les pertes de charges de 10%, soit une hauteur $H_m = 1,1 * H$.

$$\text{Puissance hydraulique de la pompe } P_H = \frac{\rho * g * H_m * Q}{\eta}$$

Où ρ est la masse volumique des ordures ; g l'accélération de la pesanteur ; Q le débit volumique de sortie des ordures du digesteur et η le rendement.

2-3-8- Détermination de la quantité d'énergie produite.

Nous utiliserons la cogénération étant donné que nous aurons besoin de l'énergie thermique pour chauffer la biomasse à l'intérieur du digesteur.

La production d'énergie est influencée par la disponibilité du gaz et celle de la machine. En effet, il arrive qu'il n'y ait plus d'arrivée de gaz du fait d'une défaillance en amont. Sur une installation avec un digesteur, elle peut être provoquée par un retard au niveau de l'alimentation du digesteur en biomasse par exemple. Sur une décharge, on voit souvent des variations dans le débit et le taux de méthane du fait de la variété des déchets enfouis. La disponibilité du biogaz est en général comprise entre 98 % et 90 %.

Les machines qui produisent l'électricité ne sont pas non plus toujours disponibles, que ce soit des moteurs ou des turbines. Les arrêts pour maintenance ou pour réparation impactent la production d'électricité. Chaque heure où la machine est à l'arrêt est une heure de production d'électricité en moins. En général, la disponibilité des moteurs à gaz est comprise entre 97 % et 90 %.

✓ Production de l'énergie électrique.

Connaissant la quantité quotidienne d'énergie primaire et le rendement électrique on en déduit que :

$$E_{\text{électrique}} = \text{Dispo}_{\text{gaz}} * \text{Dispo}_{\text{machine}} * \eta_{\text{électrique}} * \text{production quotidienne d'énergie primaire.}$$

✓ Production de l'énergie thermique.

Elle sera donnée par :

$$E_{\text{thermique}} = \text{Dispo}_{\text{gaz}} * \text{Dispo}_{\text{machine}} * \eta_{\text{thermique}} * \text{production quotidienne d'énergie primaire}$$

2-4- ANALYSE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.

2-4-1- Analyse environnementale.

De nos jours, l'impact environnemental constitue un critère de décision dans le choix d'une technologie. Afin d'évaluer l'impact environnemental de notre projet, nous allons évaluer la quantité de CO_2 que l'on évitera annuellement à l'aide du logiciel DIGES

développé par l'ADEME et le CEMAGREF.

Pour déterminer la quantité de CO₂ évitée, le logiciel prend en compte la nature des substrats, de la distance parcourue, du mode de valorisation, ... Le bilan des émissions nettes est calculé de la manière suivante [14] :



Avec FE=Facteur d'Emission (calculé par le logiciel à partir des paramètres d'entrés) et GES=Gaz à Effet de Serre. Ainsi, des émissions nettes négatives correspondent à une économie de CO₂.

Les valeurs obligatoires à renseigner sont la composition des déchets, leur quantité et la distance de provenance. Les caractéristiques de l'installation et la substitution de l'énergie thermique peuvent être précisées par l'utilisateur ou données par défaut par le logiciel.

Cette quantité de CO₂ évitée pourrait constituer un projet de Mécanisme de Développement Propre (MDP) et pourrait donc être un crédit carbone vendable sur le marché de Kyoto. Il coûterait : $Coûts (FCFA) = 10€ * 655 * Quantité\ CO_2\ évitée\ par\ an * durée\ du\ projet$

On peut aussi noter que le digestat après maturation peut être vendu sur le marché local sous forme de compost à raison de 1000 FCFA par sac de 50 Kg, ce qui coûterait :

$$coûts\ de\ vente\ du\ compost = 1000 * Quantité\ de\ compost * durée\ totale\ du\ projet$$

2-4-1- Analyse économique.

L'analyse économique de notre projet sera fonction de plusieurs paramètres à savoir :

- ✓ Le coût d'investissement.

Il sera calculé à raison de 3000 € par KWe [13]. Donc nous aurons :

$$Coût\ d'investissement = 3000 * 655 * nombre\ de\ KWe$$

- ✓ Le coût d'opération et de maintenance.

Il sera calculé à raison de 1,5 centime € par KWh [15]. On aura alors :

$$Coût\ d'opération\ et\ de\ maintenance = 655 * 0,015 * 365 * nombre\ de\ KWh$$

- ✓ Les recettes.

Elles seront au nombre de trois : la vente de l'électricité, la vente du compost et la vente des crédits carbones.

Les revenus dûs au compost et aux crédits carbones seront calculés comme ci-dessus

et la vente du prix de l'électricité sera fonction de l'achat de celui-ci par AES/SONEL. Ainsi

$$\text{Prix de vente de l'électricité} = \text{prix d'achat du KWh} * \text{nombre de KWh}$$

Il est à noter que dans les calculs, les divers impôts et taxes n'ont pas été pris en compte de même que le coût du raccordement de notre réseau au réseau d'AES/SONEL ce qui sera fait par ce dernier.

La valeur actuelle nette (VAN) sera calculée de la manière suivante :

$$\text{VAN} = - I_0 + \text{CF}_1(1+i)^{-1} + \text{CF}_2(1+i)^{-2} + \dots + \text{CF}_k(1+i)^{-k} + \dots + \text{CF}_n(1+i)^{-n}$$

Où CF_k est le cash-flow généré en année k ; i : taux d'actualisation ; n : durée de vie du projet et I₀ : l'investissement initial.

CHAPITRE 3

RESULTATS ET DISCUSSION

3-1- RESULTATS DE L'ANALYSE DE LA BIOMASSE EFFECTUEE A L'IRAD.

Le rapport de l'analyse de la biomasse effectué à l'IRAD est donné dans le tableau ci-dessous.

Echantillon	MS (%)	MO (%)	C(g/kg)	N(g/kg)
Biomasse	35,99	41,071	238,23	19,25

Tableau 3-1: Rapport d'analyse de la biomasse effectué à l'IRAD.

Nous constatons que ces valeurs sont proches de celles rencontrées dans la littérature [6]. Le rapport C/N étant égal à 12,37, notre milieu est riche en azote ce qui fera augmenter son pH et par conséquent une diminution des bactéries méthanogènes sera constatée. Pour y remédier nous préconisons un mélange des ordures collectées avec les boues des stations d'épuration ou encore du fumier qui ont un rapport C/N élevé.

3-2- CHOIX DU PROCEDE.

Nous choisissons le procédé DRANCO de la société O.W.S. qui fut spécialement développé pour la biométhanisation anaérobie de déchets organiques, contenant un taux de matières solides relativement élevé. Le procédé consiste en une conversion anaérobie de substrats organiques sous conditions thermophiles (50-55 °C), suivie directement d'un post-compostage aérobie du digestat. De cette conversion de matières organiques résultent du biogaz et un résidu solide semblable au compost, nommé humotex. Les fractions organiques appropriées à la biométhanisation sont principalement la part organique des ordures ménagères, des déchets de restaurant et d'industrie [3] [16].

Mode d'alimentation	Type de substrat	Nombre d'étape	Température	Temps de séjour
Continu	Solide	Monophase	Thermophile (55°C)	25

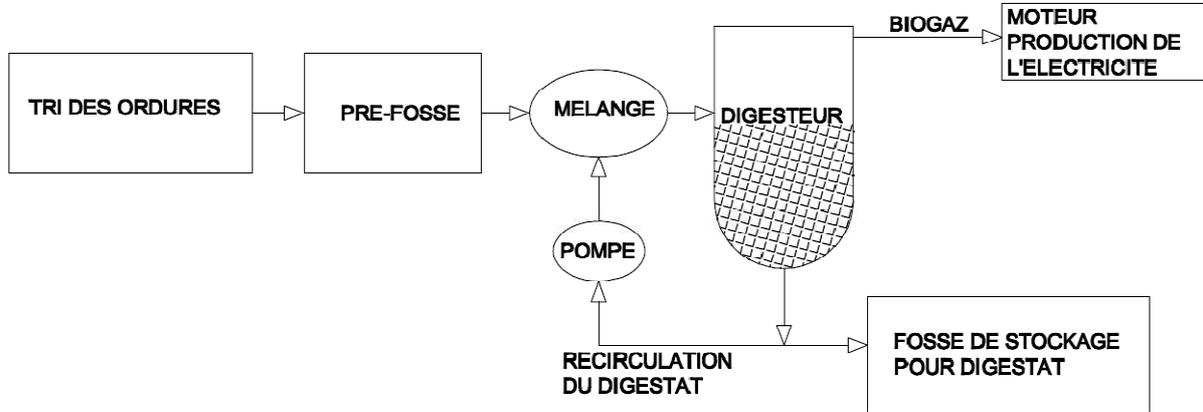


Figure 3-1 :Schéma synoptique de notre projet

3-3- EVALUATION DE LA PRODUCTION QUOTIDIENNE DE BIOGAZ, DE METHANE ET D'ENERGIE PRIMAIRE.

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Masse des déchets collectées par jour (en tonnes)	Masse des déchets biodégradables collectées par jours(en tonnes)	Composition en matière organique des déchets (%)	Production quotidienne de biogaz (m ³)	Production quotidienne de méthane (m ³)	Production quotidienne d'énergie primaire (KWh)
80	40	41,07	7392,78	4435,67	44090,56

Tableau 3-2 : Production quotidienne de biogaz, de méthane et d'énergie primaire.

Nous choisirons un moteur à gaz car le pourcentage de méthane dans notre biogaz a été pris 60 % > 39 %, et le débit est supérieur à 75 m³/h (184,82 m³/h) [7].

3-4- DETERMINATION DES DIMENSIONS DE LA PRE FOSSE, DE LA FOSSE DE STOCKAGE ET DU DIGESTEUR.

3-4-1- Dimensionnement de la pré-fosse.

Le volume de la pré fosse est donné par l'expression :

$$\text{le volume de la pré fosse} = 2 * \text{volume quotidien de substrats} = 140 \text{ m}^3$$

Nous allons prendre une pré fosse en forme de parallépipède rectangle de dimensions longueur = 7m, largeur= 5m et hauteur = 4m.

3-4-2- Dimensionnement de la fosse de stockage.

Le volume de la fosse de stockage est donné par l'expression :

$$\text{le volume de la fosse de stockage} = 30 * \text{volume quotidien de substrats} = 1200 \text{ m}^3$$

Nous allons prendre une pré fosse en forme de parallélépipède rectangle de dimensions longueur = 15m, largeur= 10m et hauteur = 8m.

3-4-3- Dimensionnement du digesteur.

En prenant un temps de séjour des substrats de **25 jours**, le volume de la partie cylindrique est donné par l'expression :

$$\begin{aligned} \text{volume totale} &= \text{temps de séjour des substrats} * \text{volume quotidien de substrats} \\ &= 1000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

On choisit comme *volume du cylindre* = 750 m³ et *volume de l'hémisphère* = 250 m³

➤ Cas de la partie cylindrique.

En procédant comme décrit dans le chapitre précédent, on prend x=2, donc H=2R et on en

déduit : $R = \sqrt[3]{\frac{\text{volume du cylindre}}{2*\pi}} = 4.92 \text{ m}$ et H = 9.84 m. Nous prendrons H =9.9 m.

➤ Cas de la partie hémisphérique.

Elle a un rayon de 4.92m

Dimensions de la pré fosse			Dimensions de la fosse de stockage			Dimensions du digesteur		
						Partie cylindrique		Partie hémisphérique
Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Rayon (m)	Hauteur (m)	Rayon (m)
7	5	4	15	10	8	4,92	9.9	4,92

Tableau 3-3: Récapitulatif des dimensions du digesteur, de la pré fosse et de la fosse de stockage.

3-4-4- Dimensionnement de la pompe.

La puissance hydraulique de la pompe est donnée par l'expression $P_H = \frac{\rho * g * H_m * Q}{\eta}$

Sachant que notre moteur fonctionnera de 8h à 18h soit pendant 10h de temps nous aurons Q= 0,0011 m³/h. Comme H= 14,82m on aura Hm= 16,302m.

$$P_H = \frac{1000 * 9,81 * 16,302 * 0,0011}{0,8} = 191,91 \text{ W.}$$

3-4-5-Détermination de l'énergie utilisée par le digesteur.

épaisseur acier	épaisseur polystyrène	conductivité thermique acier	conductivité thermique polystyrène
0,008	0,1	52	0,03

Connaissant les paramètres ci-dessus et la température de digestion qui est 55°C on trouve :

- $Puissance_{pertes} = 8019,49 \text{ Wh/jour}$
- $Energie\ des\ pertes = 192467,83 \text{ Wh/jour}$
- $Energie\ de\ chauffage\ substrats = 1382,22 \text{ Wh/jour}$

3-5- DETERMINATION DE LA QUANTITE D'ENERGIE PRODUITE.

Nous allons prendre la disponibilité des machines égale à la disponibilité du biogaz égale à 95 %. Les rendements électriques et thermiques de notre moteur à gaz seront $\eta_{\text{électrique}} = 38 \%$ et $\eta_{\text{thermique}} = 40 \%$ [15]. Notre installation aura donc un rendement de 78%.

$$E_{\text{quotidienne électrique}} =$$

$$Dispo_{\text{gaz}} * Dispo_{\text{machine}} * \eta_{\text{électrique}} * production\ quotidienne\ d'énergie\ primaire$$

$$= 15\ 120,86 \text{ KWh/jour}$$

$$E_{\text{quotidienne thermique}}$$

$$= Dispo_{\text{gaz}} * Dispo_{\text{machine}} * \eta_{\text{thermique}} * production\ quotidienne\ d'énergie\ primaire$$

$$= 15916,69 \text{ KWh/jour}$$

Nous choisirons donc un moteur de puissance $\frac{15\ 089,8*365}{8760} = 663,19 \text{ KWe}$ soit

700KWe avec un rendement de **78%**.

	quantité produite par an	vendue 97%	Consommée sur place 3%
Energie électrique (KWh)	5519113,9	5353540,48	165573,42
Energie thermique (KWh)	5809591,85	0	174287,76

Tableau 3-4 : Utilisation de l'énergie produite

3-6- ANALYSE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.

➤ Analyse environnementale

✓ Cas du compost.

Le compost que l'on peut obtenir est estimé au tiers de la masse de substrats disponible

$$\text{coûts de vente du compost par an} = 1000 * \frac{40000}{3} = \mathbf{13\ 333\ 333\ FCFA/ an}$$

✓ Cas du CO₂ évité.

Le logiciel DIGES nous fournit une quantité évitée de 3519,6 tonnes équivalent de CO₂.

Donc :

$$\text{Coûts} = 10\text{€} * 655 * \text{Quantité CO}_2 \text{ évitée par an} = \mathbf{23\ 053\ 380\ FCFA / an}$$

➤ Analyse économique.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Nous avons pris le taux d'actualisation à **0,08%**.

Années	Coût investissement	Prix de vente du KWh l'électricité	Prix de vente de l'électricité	crédit carbone et compost	recettes	dépenses d'exploitation	cash-flows avant impôt	coeff. D'actualisation	cash-flows actualisé
0	1375500000						-1375500000	1	-1375500000
1		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,925925926	228879880,7
2		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,85733882	211925815,5
3		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,793832241	196227606,9
4		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,735029853	181692228,6
5		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,680583197	168233545
6		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,630169627	155771801
7		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,583490395	144233149
8		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,540268885	133549212,1
9		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,500248967	123656677,8
10		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,463193488	114496923,9
11		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,428882859	106015670,3
12		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,397113759	98162657,69
13		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,367697925	90891349,71
14		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,340461041	84158657,14
15		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,315241705	77924682,54
16		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,291890468	72152483,83
17		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,270268951	66807855,4
18		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,250249029	61859125,37
19		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,231712064	57276967,93
20		50	264917467,2	36386713	301304180,2	54113909,03	247190271,2	0,214548207	53034229,57
								VAN	1051450520

Tableau 3-5 : RECAPITULATIF DE L'ANALYSE ECONOMIQUE DU PROJET

En utilisant l'outil de la valeur cible d'Excel on trouve un taux de rentabilité interne de 17, 18 % qui est supérieur à notre taux d'actualisation de 8 % ce qui est correct pour notre projet. On constate qu'au bout de la 8^{ème} année la totalité des investissements est récupérée.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de dimensionner une installation de valorisation de l'électricité à partir du biogaz produit par la fraction fermentescible des déchets municipaux. Après avoir recueilli les informations concernant les déchets municipaux au travers de la société HYSACAM (quantité d'ordures collectée par jour, lieu du traitement, méthodologie pour le traitement des ordures,...) nous avons analysé la biomasse à l'IRAD ce qui nous a permis de dimensionner toutes les composantes de notre projet digesteur, pompe, fosse de stockage,... et nous a montré que nous allons utiliser un moteur de cogénération de **700KWe** avec un rendement de **78 %**.

L'analyse environnementale de notre projet nous a montré que celui-ci pouvait être éligible au mécanisme de développement propre et nous permettrait d'éviter des émissions de 3519,6 tonnes équivalent de CO₂, valeur trouvée à l'aide du logiciel DIGES, en nous rapportant en moyenne 23 053 380 *FCFA* / an.

L'analyse économique nous a permis de constater que pour un investissement de 1 390 000 000 *FCFA* nous aurons un bénéfice de 1 051 450 520 *FCFA* au bout de 20 années de fonctionnement de notre projet en vendant le KWh à 50 *FCFA* à AES/SONEL, somme qui correspond à la vente par ce dernier du KWh à la tranche de la population la plus défavorisée. Il est à noter que la quasi-totalité de l'énergie thermique n'est pas valorisée et une éventuelle valorisation de cette dernière au travers de la société ALUCAM permettra d'augmenter la rentabilité du projet. Notons tout de même que notre analyse économique s'est faite en ne tenant pas en compte les diverses taxes et impôts et frais d'études du projet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ANGELIQUE L., (2002)**, *Biométhanisation*, Laboratoire de Génie Chimique, Département de Chimie Appliquée, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège – Haute Ecole Charlemagne – Hemes.
- [2] **HESS J., (2007)**, *Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation*, thèse de doctorat, Université de Nice - Sophia Antipolis – UFR Sciences.
- [3] **TCHOUATE HETEU P. et MARTIN J. (2003)**, *Conversion biochimique de la biomasse : Aspects technologiques et environnementaux*, Working Paper n°3, UCL Université Catholique de Louvain.
- [4] **TSM, 2006**, *Vade-Mecum du porteur de projet de méthanisation des déchets des collectivités*, TSM numéro 4 - 2006 - 101e année.
- [5] **RECORD, (2003)**, *Traitement des déchets organiques - état de l'art*, ETUDE N° 01-0221/1A et 01-0408/1A
- [6] **USAMA ZAHER, DAE-YEOL CHEONG, BINXIN WU ET SHULIN CHEN, (2007)**, *Producing Energy and Fertilizer From Organic Municipal Solid Waste*, Washington state department of ecology, Washington state university.
- [7] **RECORD, (2009)**, *Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse*, 253 p, n°07-0226/1A.
- [8] **CHASLERIE T., (2002)**, *Techniques de bioconversion : La biométhanisation*, IUT Génie Thermique et énergie 2001-2002, Projet tuteuré de première année.
- [9] **IRCO Sprl Bureau d'études, (2001)**, *Vade-mecum technique et administratif relatif à la biométhanisation de biomasse humide en Région wallonne pour les installations d'une puissance maximale de 10 MWth*.
- [10] **LE GUEN G., (2003)**, *L'accompagnement des projets de méthanisation : Comment faire émerger des projets de méthanisation agricole dans le contexte actuel ?*, Mémoire de fin d'études à l'Esitpa, Ecole d'ingénieurs en agriculture.
- [11] **TCHUENTE F., SCHALK B., (1988)**, *Methods of the EKONA laboratory for soil, plant, water and fertilizer analysis*, Ministry of Higher Education Computer Services and Scientific research (MESIRES), FAO/UNDP project CMR/83/001, Institute of Agronomic research (IRA), National Soil Centre (NSC) EKONA Station.
- [12] **MOLETTA R., (2003)**, *La digestion anaérobie des déchets municipaux*, Moletta Méthanisation.

[13] MAURER M., GENDRE R., (2004), *Le BIOGAZ en Alsace : Potentiel, étude économique*, énergivie, Programme l'Alsace dit oui aux énergies renouvelables !

[14] BARRIATOU LAH A., (2011), *Guide de bonnes pratiques pour les projets de méthanisation*, Club Biogaz, ATEE (Association technique Energie Environnement)

[15] LEJEUNE C., (2008), *Valorisation électrique et thermique du biogaz de méthanisation*, PRO2, Formation EFE – Biomasse pour les usages énergétiques

[16] <http://www.ows.be> consulté le 23 décembre 2012,

Annexes I : Rapport d'analyses effectué à l'IRAD

Annexe2 1 PRG- LAB-18	Version 2	RAPPORT D'ANALYSES PLANTES – SORTIE LASPEE	Date d'application 22/02/2012	P. 1/1
--------------------------	-----------	---	----------------------------------	--------



Nom du Client : GWOGON Marcel
 Email :
 Téléphone :
 Date d'entrée 14/12/12

Cadre Administratif
laspeeirad@yahoo.fr

Date de sortie : 19/12/12

Echantillons	Biomasse																		
N° Labo	790																		
MS (%)	35.99																		
MO (g/kg)	410.71																		
C (g/kg)	238.23																		
N (g/kg)	19.25																		

Le présent rapport d'analyse ne concerne que l'échantillon soumis à l'essai

(Signature)
 NGOROU

CHEF DE LABORATOIRE DES
 SOLS MOLEISSON

R.O



Annexe II : Quelques données météorologiques de la ville d'EDEA.

[SSE](#)
[Homepage](#)

[Find A Different Location](#)

[Accuracy](#)

[Methodology](#)

[Parameters](#)
[\(Units & Definition\)](#)



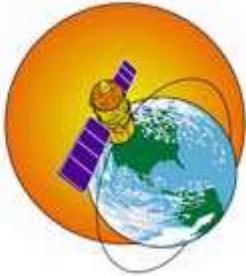
NASA Surface meteorology and Solar Energy: [RETScreen](#) Data



Latitude **3.783** / Longitude **10.217** was chosen.

	Unit	Climate data location
Latitude	°N	3.783
Longitude	°E	10.217
Elevation	m	339
Heating design temperature	°C	19.65
Cooling design temperature	°C	28.43
Earth temperature amplitude	°C	5.29

December	23.9	82.2%	5.04	97.2	1.3	24.0	0	439
Annual	23.9	83.5%	4.43	97.3	1.5	24.2	0	5138
Measured at (m)					10.0	0.0		



[Back to SSE Data Set Home](#)
[Page](#)

Responsible NASA *Official:* John M. Kusterer
Site Administration/Help: NASA Langley [ASDC](#) User
 Services (larc-asdc-uds@lists.nasa.gov)
[\[Privacy Policy and Important Notices\]](#)
 Document generated on Thu Dec 13 06:20:47 EST 2012

Annexe III : Résultats de DIGES.

Installation : Valorisation du Biogaz à EDEA

RECAPITULATIF DES DONNEES MODIFIABLES PAR L'UTILISATEUR

Les déchets traités par digestion anaérobie

14600 tonnes de biodéchets ménagers

composés de

% MS	N (kg / t MB)	% MO/MS	% MO/MB	Pot méth (m3 CH4/t MO)	Pot méth2 (m3 CH4/t MB)	MO_biod
39,0	19,3	105,3	41,1	450,0	135,0	64,6

Couverture des aires de stockage			
	Couvert, avec récupération du biogaz	Couvert, sans récupération du biogaz	Non couvert, sans récupération du biogaz
Pré-stockage des substrats			oui
Post-stockage du digestat	oui		

énergie annuelle valorisée	kWh
électrique	5 519 113,9
thermique	5 809 591,5

puissance installée	m ³ CH4 valorisé/h
<i>KW_é : 688</i>	129,8
<i>KW_th : 725</i>	

Sources énergétiques utilisées antérieurement		
	pour l'énergie thermique consommée sur place (%)	pour l'énergie thermique vendue (%)
essence	0,0	0,0
gazole ou fioul domestique	0,0	0,0
fioul lourd	50,0	50,0
gaz naturel	50,0	50,0
électricité	0,0	0,0
charbon	0,0	0,0

GPL	0,0	0,0
-----	-----	-----

utilisation de l'énergie valorisée						
	autoconsommé		vendue		consommée sur place	
	kWh	%	kWh	%	kWh	%
électrique	110 382,28	2,00	5 353 540,48	97,00	55 191,14	1,00
thermique	174 287,75	3,00	0,0	0,00	5 635 303,76	97,00

RESULTATS

pré-stockage du déchet		digestion anaérobie		post-stockage - traitement		épandage du digestat	
N2O	CH4	N2O	CH4	N2O	CH4	N2O	CH4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	263,2	8,7
						271,9 tonnes éq. CO2	

substrat	digestat
éq. CO2	éq. CO2
7,2	159,6
166,9 tonnes éq. CO2	

Emissions évitées en tonnes éq. CO2 :									
stockage		traitement		épandage		CSD		incinération	
N2O	CH4	N2O	CH4	N2O	CH4	N2O	CH4	N2O	CH4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1 376,8	0,0	0,0
						1 376,8 tonnes éq. CO2			

Emissions évitées - transports effectués par le traitement de référence en tonnes éq. CO2 :	
substrats	
éq. CO2	
40,9	
40,9 tonnes éq. CO2	

Energie électrique :				Energie thermique :			
valorisée (MWh)	vendue (MWh)	sur place (MWh)	GES évités (t CO2)	valorisée (MWh)	vendue (MWh)	sur place (MWh)	GES évités (t CO2)
5 519,11	5 353,54	165,57	400,7	5 809,59	0,0	5 693,4	1 400,5
Emissions évitées - énergie :				1 801,2 tonnes éq. CO2			

<i>Emissions évitées - fabrication d'engrais minéral :</i>	
	739,4 tonnes éq. CO2

Nous attirons votre attention sur l'interprétation des résultats.

Par exemple, une incertitude de 20% a pu être obtenue en faisant varier les seuls paramètres de composition des substrats

Emissions nettes :	-3 519,6 tonnes éq. CO2
---------------------------	--------------------------------