



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



Valorisation Energétique des Tourteaux de Jatropha par Méthanisation

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE
L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT – INGENIEUR ZIE
OPTION : ENERGIE ET PROCEDES INDUSTRIELS.**

Présenté et soutenu publiquement le 14 juin 2011 par

Flaurant POUAN

**Travaux dirigés par : M. Arnaud CHAPUIS
Pr. Didier Lecomte**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Yézouma COULBALY

Membres et correcteurs : Pr. Didier LECONTE
Dr. Joël BLIN
Arnaud CHAPUIS

Promotion [2010/2011]

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- Mon père **POUAN NIBIRE** pour son suivi sans cesse dont il fait preuve pour que je réussisse.
- Ma mère **KARFO KELTOGUE** qui a toujours veillé sur moi par ses prières.
- Mes frères, sœurs et parents plus particulièrement à mon Tonton Professeur **KARFO KAPOUNI**, mon frère **POUAN LEBDEM** et ma sœur **POUAN ADELLE** pour leur encouragement et leur soutien.
- Tous ceux qui m'aiment et qui m'ont apporté leur soutien.

REMERCIEMENTS

Je tiens à présenter mes vifs remerciements et témoigner ma sincère reconnaissance à tous ceux ou celles, qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce projet. J'ai une dette de reconnaissance envers :

- Mon maitre de stage, **M. ARNAUD CHAPUIS**, qui m'a guidé et orienté par ses précieux conseils et explications lors du stage.
- Pr. **DIDIER LECOMTE** pour son entière disponibilité, ses précieux conseils et pour sa coordination.
- Tout le personnel du LBEB pour leur assistance.

Et enfin à tous mes camarades de promotion pour leur soutien inconditionnel.

RESUME

La présente étude qui s'inscrit dans le cadre de l'obtention de mon master en énergie a été réalisée en quatre parties.

La première partie a été consacrée à une revue de la littérature sur la filière méthanisation. Le but de cette partie est de fournir les bases sur la biologie de la méthanisation, les paramètres qui l'influencent et enfin les différents procédés de valorisation des déchets par méthanisation.

La deuxième partie concerne l'étude des possibilités de méthanisation des tourteaux de Jatropha (TJ). Dans un premier temps, nous avons analysé les résultats des études sur la méthanisation des TJ disponibles dans la littérature. Il en ressort que les TJ sont des substances adaptées pour la méthanisation et de meilleurs rendements seraient obtenus pour des mélanges avec d'autres substances ayant un rapport C/N plus élevé. Des expériences de digestion sèche (moins de 40% d'eau) des TJ révèlent de faible dégradation et semblent montrer que ce type de digestion n'est pas adapté. En revanche, des essais de digestion humide (au moins 40% d'eau) se sont révélés plus concluants.

La troisième partie a été consacrée à l'identification des différents procédés adaptés aux échelles de production de biogaz industrielle et artisanale/agricole. Des procédés adaptés aux différentes échelles de production ont été sélectionnés.

Enfin dans la dernière partie, nous présentons un exemple de dimensionnement appliqué au modèle agricole. Une étude de rentabilité et d'impacts environnementaux a été aussi réalisée dans ce sens.

Mots clés :

1. Méthanisation
2. Tourteau
3. Jatropha
4. Digestion
5. Biogaz

ABSTRACT

This study is the achievement of my master's degree energy. It contains in four parts. The first part was devoted to a literature review on the anaerobic digestion. The purpose of this section is to provide anaerobic digestion basics, then the parameters that influence it and the various processes of valorization of waste by anaerobic digestion.

The second part concerns the study of Jatropha oil cake (JC) potential in biogas. Initially, we analyzed the results of studies on the anaerobic digestion of (JC) in the literature. It shows that the (JC) are substances adapted for anaerobic digestion and better yields are obtained for mixtures with other substances with a higher C / N ratio. Dry digestion experiments (less than 40% water) and (JC) show low degradation and suggest that this type of digestion is not suitable. However, tests of wet digestion (at least 40% water) were more conclusive. The third part was devoted to identifying the various processes adapted to artisanal and industrial biogas. Adapted processes have been choosing to suit the two ways of productions.

Finally in the last section, we present an example of a design applied to the agricultural model. A feasibility study and environmental impacts has been performed in this direction.

Key words:

1. Methanisation
2. Seed Cake
3. Jatropha
4. Digestion
5. Biogas

LISTE DES ABREVIATIONS

➤ Sigles

TJ : Tourteaux de Jatropha

C/N : Rapport Carbone Azote

pH : potentiel d'Hydrogène

FB : Fumier de Bétail

LBEB : Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant

AGV : Acide Gras Volatile

UASB : Upflow Anaerobic Sludge Blanket

CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor

PCI: Pouvoir Calorifique Inférieur

DCO: Demande Chimique en Oxygène

MS : Matière Sèche

➤ Symbole chimique

CO₂ : Dioxyde de Carbone

CH₄: Methane

NH₃: Ammoniac

H₂: Dihydrogène

H₂S: Hydrogène Sulfureux

NO₂: Dioxyde Nitreux

SO₂: Dioxyde de Soufre

➤ Unité

mV: millivolt

°C: Degré Celsius

Kg: Kilogramme

atm : Atmosphère

kWh : KiloWatttheure

l: litre

m³: mètre cube

m³/kg **MS/j** : mettre cube/kilogramme de matière sèche/jour

SOMMAIRE

Dedicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des abréviations	v
LISTE DES TABLEAUX.....	4
Liste des figures	4
Introduction	6
Partie I- Eléments de connaissance sur la filière méthanisation- Etat de l’art	6
1 Notions générales	6
1.1 La biologie de la méthanisation.....	6
1.2 La mise en œuvre de la méthanisation en digesteur [2, 4-7]	8
1.3 Les principaux inhibiteurs de la méthanisation	9
1.4 Les différents procédés de valorisation énergétiques par méthanisation ^[3] ^[4]	10
1.5 Le biogaz	13
1.6 Valorisation énergétique du biogaz	14
Partie II-Etude des possibilités de Methanisation des tourteaux de jatropha.....	15
1. Objectifs.....	15
2. Procédés, produits et sous produits du Jatropha ^[3]	16
3. Littérature	17
3.1 Etude menée par NAFISA Ali et Al.....	17
3.2 Etude menée par Straumann et al. (1997).....	17
4. Test de potentiel méthanogène des tourteaux de Jatropha	19
4.1 Analyse élémentaire de nos tourteaux utilisés.....	19

4.2 Analyse élémentaire des fumiers de bétails utilisés	20
4.3 Matériels et méthode	20
4.4 Les paramètres de contrôle et détermination.....	22
4.5 Schéma de montage	23
4.7 1 ^{ères} Résultats et discussion.....	24
4.8 Deuxième expérience	25
PARTIE III-Identification des technologies de methanisation pour les echelles de production	29
1. Les modèles de production de biogaz.....	29
1.1 Technologies identifiées pour la production de biogaz à partir des tourteaux de Jatropha selon le modèle agricole.....	29
1.2 Technologies identifiées dans le modèle industriel pour la digestion des tourteaux de Jatropha. 33	
PARTIE IV : DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DES TOURTEAUX DE JATROPHA ET APPLIQUEE AU MODELE AGRICOLE ; ANALYSE FINANCIERE ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	37
1. Cadre de l'étude de cas : Descriptif.....	37
2. Estimation des besoins en biogaz de chaque ménage.....	38
3. Estimation du potentiel de production- substitution du bois	39
4. Protocole.....	40
5. Epuration du biogaz.....	40
6. Substitution du bois de feu dans un ménage.....	41
7. Coût de l'installation pour le ménage.....	41
7.1 Estimation du prix des deux cuves (en plastique)	41
7.2 Estimation du prix du ballon de stockage.....	42
7.3 Le brûleur	42

7.4 Prix des autres équipements sont représentés dans ce tableau ci-dessous :.....	42
8. Analyse environnementale	43
8.1 Situation avant la valorisation des tourteaux de Jatropha : Utilisation du bois pour la cuisson des aliments	44
8.2 Situation après méthanisation : Consommation du bois substituée.....	44
Recommandations	46
Conclusion.....	47
Bibliographie.....	48
AnnexeS	49
Annexe 1 : Procédure d'extraction d'huile des solides	50
Annexe 2 : masse des digesteurs	52
Annexe 3 : Protocole d'analyse du biogaz	54
Annexe 4: Protocole d'analyse immédiate	55
Annexe 5: Image d'un digesteur à sac remplis du digestat et du biogaz.....	58
Annexe 6 : Image d'un digesteur compact remplis de substrat et de biogaz.....	59
Annexe 7 : Comparaison de la composition du biogaz et du potentiel énergétique de différents substrats (source APESA, 2007)	60
Annexe 8: Rapport C/N de quelques plantes et animaux	61
Annexe 9: D'autres techniques plus sophistiquées d'épuration du biogaz	62
Annexe 10 : Chromatographie.....	63
Annexe 11 : Les différentes voies de valorisation du biogaz (source GDF).....	64
Annexe 12 : photo du brûleur (source : centre Songhaï Benin)	65
I.....	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Avantages et inconvénients des digesteurs à phase séparées	12
Tableau 2: Comparaison de la composition chimique des tourteaux de Jatropha et des fumiers de bétails.....	17
Tableau 3: Production du biogaz par les tourteaux de Jatropha.....	17
Tableau 4: Composition moléculaires des tourteaux de Jatropha	18
Tableau 5: Comparaison des rendements de production de biogaz dans trois réacteurs	19
Tableau 6: Résultats d'analyse des tourteaux de Jatropha au LBEB.....	19
Tableau 7: Résultats d'analyse élémentaire des fumiers de bétails utilisés.....	20
Tableau 8: Composition du substrat dans les digesteurs.....	22
Tableau 9: Valeur des pH dans les digesteurs	24
Tableau 10: Résultats de la 1ère expérience	24
Tableau 11: Résumé des caractéristiques du substrat et mode opératoire	26
Tableau 12: Résultats de la 2ème expérience.....	27
Tableau 13: Résultat d'analyse du biogaz (3 essais)	28
Tableau 14: Comparaison des digesteurs (1)	31
Tableau 15: Comparaison des digesteurs (2)	36
Tableau 16: Consommation de biogaz par certains appareils[11, 12]	38
Tableau 17: Production de biogaz de quelques plantes et animaux [11, 12]	39
Tableau 18: Coût des autres équipements	42
Tableau 19: Produits de combustion du bois	44
Tableau 20: Produits de combustion du méthane.....	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Les différentes étapes de la méthanisation	7
Figure 2: Equivalence énergétique du biogaz (source M.MOLETA, 2006).....	14
Figure 3: Procédés, produits et sous produits du Jatropha (source SOS FAIM, 2007).....	16
Figure 4: Image de tourteaux de Jatropha utilisés (A gauche: tourteau gras; A droite: tourteau très sec).....	21
Figure 6: Digesteurs exposés au soleil	23
Figure 5: Montage des installations	23
Figure 7: Appareils utilisés	24
Figure 8: Exemple de digesteur batch [1]	30
Figure 9: Schéma de principe 1[9]	30

Figure 10: Schéma de principe 2 (ARTI,2009).....	31
Figure 11: Digesteur de type continu chinois.....	34
Figure 12: Digesteur de type indien	35
Figure 13: Digesteur à piston	35
Figure 14: Piégeage à eau.....	41

INTRODUCTION

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. Beaucoup de pays en voies de développement n'ont pas de sources d'énergie sûre, convenable et bon marché. En milieu rural les populations utilisent surtout le bois-énergie pour la cuisson et l'éclairage, mais force est de constater que ces combustibles sont devenus rares et chers, sans oublier le risque de déforestation qui va grandissant, entraîné par la coupe abusive des arbres. La consommation de ces sources d'énergie donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Afin de pouvoir résoudre ces problèmes, de nombreux pays notamment le Burkina Faso se tournent vers de nouvelles solutions de production d'énergie comme la filière agro-carburant à partir du Jatropha. Quelque soit le produit final (HVB ou Biodiesel) et l'échelle de développement considérée, la valorisation des coproduits, principalement les tourteaux issus de l'extraction des huiles, est un facteur clé pour la viabilité de la filière. A la différence de la plupart des autres oléagineux, les tourteaux de Jatropha sont toxiques et ne peuvent être utilisés directement pour l'alimentation du bétail. Les deux voies possibles de valorisation sont l'amendement des sols et la production d'énergie. L'objectif principal de notre étude est d'évaluer la faisabilité de la valorisation des tourteaux de Jatropha par méthanisation au sein d'une filière agro-carburant.

Le rapport commence par des éléments de connaissance sur la filière méthanisation qui met en évidence plusieurs procédés qui peuvent être utilisés pour valoriser les déchets suivant des échelles de production (1^{ère} partie). Nous étudierons ensuite les possibilités de valorisation des tourteaux de Jatropha par une détermination de leur potentiel méthanogène et des paramètres qui peuvent influencer sa production en biogaz (2^{ème} partie). Nous avons fait aussi une analyse technique des procédés identifiés (bilans matière/énergie en fonction des caractéristiques des tourteaux traités) pour chaque échelle de production (3^{ème} partie). Enfin nous terminerons par un exemple de dimensionnement d'un système appliqué au modèle agricole (4^{ème} partie).

PARTIE I- ELEMENTS DE CONNAISSANCE SUR LA FILIERE METHANISATION- ETAT DE L'ART

1 Notions générales

1.1 La biologie de la méthanisation

La digestion anaérobie – ou méthanisation - est un processus biologique de dégradation de la matière organique en un mélange gazeux de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) appelé biogaz. Le biogaz produit peut-être récupéré, stocké et valorisé pour la production de

chaleur et/ou d'électricité. La méthanisation est observé dans les milieux naturels pauvres en oxygène, et il existe trois types d'écosystèmes méthanogènes naturels:

Les sédiments marins et lacustres, les milieux inondés (marais, rizières), les boues et les digesteurs dans lesquels la matière organique est complètement dégradée ;

Les appareils digestifs animaux et humains qui dégradent partiellement la matière et conduisent à la formation de produits intermédiaires assimilés comme éléments nutritifs ;

Les eaux volcaniques, dans lesquelles la matière organique est absente et où seule la voie hydrogénéophile produit du biogaz.

La digestion anaérobie se déroule généralement à des pH voisins de la neutralité (6.5 à 8.5) et à des potentiels d'oxydoréduction très bas (-300 à -400mV). La température peut varier de 10 à 65°C. On distingue 3 familles de bactéries en fonction de la température de digestion anaérobie : les bactéries thermophiles (45 à 65°C), mésophiles (25 à 45°C) et psychrophiles (10 à 25°C).

La digestion anaérobie se déroule en quatre étapes principales qui sont présentées ci-après par la figure 1 [1-3].

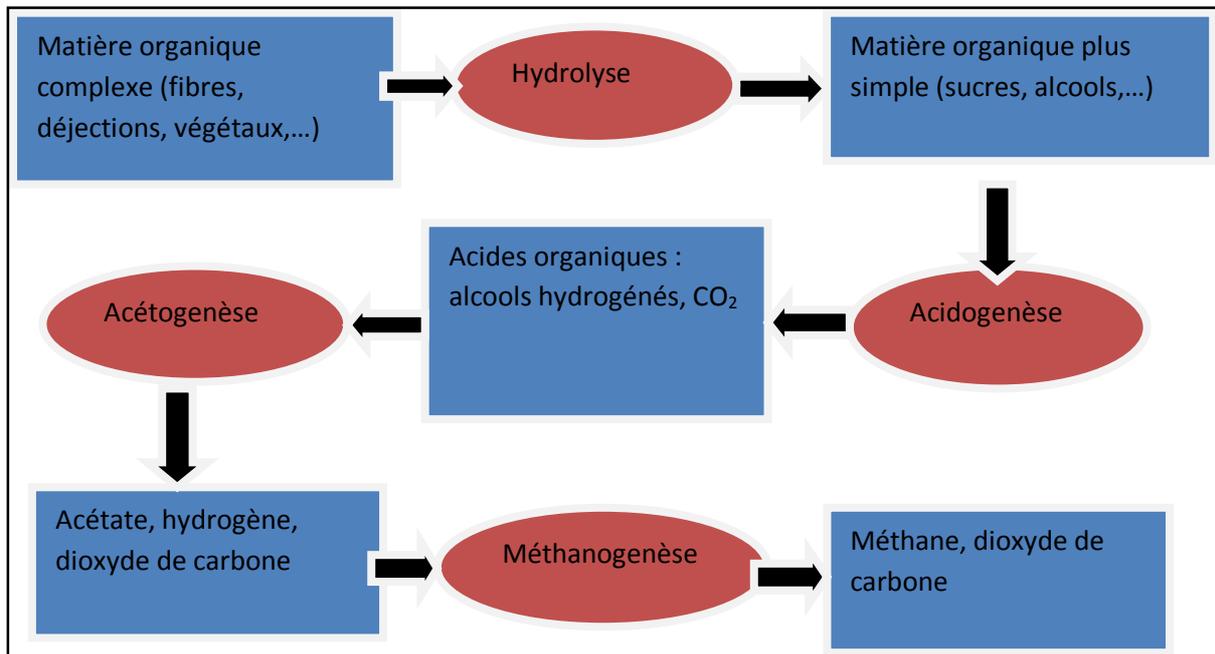


Figure 1: Les différentes étapes de la méthanisation

1.1.1 Hydrolyse et Acidogénèse

La première phase qui comprend l'hydrolyse et l'acidogénèse est assurée par des bactéries hydrolytiques. Ces bactéries transforment la matière organique complexe (cellulose, lipides,

amidon, protéines,...) en composés plus simples, à savoir des acides gras volatils (AGV) (acide acétique, acide propionique, acide butyrique,...) et des alcools (méthanols, éthanols,...). On observe la production d'une certaine quantité d'hydrogène (H₂) et de dioxyde de carbone (CO₂) résultant de la conversion des lipides et des protéines. Les bactéries responsables de l'acidogénèse sont extrêmement diverses, anaérobies stricts, ou facultatifs. Parmi ces bactéries, on retrouve *Clostridium*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Streptococcus*.

1.1.2 Fermentation acétogénèse

Les produits de l'acidogénèse sont convertis en acétates (CH₃COO⁻) et en hydrogène (H₂) au cours de la seconde phase dite acétogénèse. Cette phase est réalisée par des bactéries telles que *Pelobacter carbinolicus*, *Synthrophobacter wolinii*, *Synthrophomonas wolfei*. Le métabolisme de ces bactéries n'est cependant possible que si le H₂ produit (y compris celui de l'acidogénèse) est éliminé au fur et à mesure de sa formation. La pression partielle du milieu en H₂ doit être en effet toujours inférieure à 10⁻⁴ atmosphères. En revanche, cette pression partielle ne doit pas être inférieure à 10⁻⁶ atmosphères car une pression partielle de H₂ minimale est requise pour réaliser la réduction du CO₂ en CH₄ 10⁻⁶ atm. < Pression de H₂ < 10⁻⁴ atm.

1.1.3 Méthanogénèse

Le H₂ est normalement utilisé par la troisième communauté microbienne que sont les méthanogènes hydrogénophiles (*methanobrevibacter*, *methanobacterium*) pour réduire le CO₂ en CH₄ tandis que l'acétate est transformé par les méthanogènes acétoclastes (*Methanosarcina*, *Methanococcus* et *Methanosaeta*) en CH₄.

1.2 La mise en œuvre de la méthanisation en digesteur [2, 4-7]

La production de biogaz suppose des conditions particulières de température, de potentiel d'oxydoréduction, de pH, de concentrations en ammoniac (NH₃), de rapport C/N ainsi que l'absence d'inhibiteurs.

Explication du rapport C/N

Les micro-organismes chargés de la dégradation de la matière organique respirent de l'azote pour pouvoir utiliser le carbone pour la constitution de leurs structures (paroi, tissu,

membrane,...). Pour le bon développement de ces micro-organismes, la composition de la substance en carbone et en azote doit être de telle sorte que le rapport C/N soit compris entre 20 et 40. Au delà d'une certaine quantité d'azote, ce rapport C/N baisse et nuit dans ce cas le développement des micro-organismes.

1.2.1 Anaérobie

La digestion anaérobie et surtout la production de méthane ne peut se dérouler qu'en absence d'air et la présence de matières organiques fermentescibles est indispensable.

1.2.2 Température

La vie des bactéries dans le digesteur dépend rigoureusement de la température. Elle agit sur la vitesse de dégradation des substrats et de production de méthane. Dans la pratique, on distingue trois types de digestion associée à 3 familles de bactéries:

- ✚ Psychrophile, dans la gamme 10-25°C, elle est typique pour des marais et décharges ou du traitement du lactosérum, avec une production de gaz lente ;
- ✚ Mésophile, dans la gamme 35-45°C, elle est beaucoup plus utilisée pour la bio méthanisation à la ferme et le traitement d'effluents et de résidus (agro-) industriels ;
- ✚ Thermophile, dans la gamme 55-65°C, dont l'utilisation se développe, notamment dans le domaine des déchets ménagers ou de l'industrie agro-alimentaire ; les avantages attendus sont une meilleure destruction des agents pathogènes et une plus grande vitesse de production de gaz.

1.2.3 Autres paramètres chimiques

Les micro-organismes méthanogènes sont très sensibles au pH, qui doit rester proche de la neutralité. Certaines espèces chimiques sont également inhibitrices en trop grande concentration (NH₃, acides gras volatils,...). La nature des substrats et l'évolution de la digestion doivent donc être contrôlées.

Le pH optimum est compris entre 6.5-8. Si le pouvoir tampon du milieu en fermentation est insuffisant, il peut en résulter d'une acidification du milieu par accumulation d'acides gras volatils. Cette acidification inhibe la production du méthane.

1.3 Les principaux inhibiteurs de la méthanisation

De nombreux composés organiques ou inorganiques peuvent avoir un effet toxique sur les micro-organismes. Voici quelques principaux inhibiteurs de la digestion anaérobique.

- Le NH_3 : Certains déchets après la méthanisation peut contenir de l'azote en grande (effluents d'élevage, déchets agroalimentaires...) qui est réduit sous forme ammoniacale au cours de la méthanisation. Au delà de quelques grammes/litre, l'azote ammoniacal devient inhibiteur à la digestion.
- Le H_2S : Au cours de la méthanisation de certains effluents riches en sulfates et en protéines soufrés, le H_2S est produit par les bactéries sulfato réductrices qui en grande quantité devient inhibiteur à cette digestion.
- Les AGV : Ils provoquent une baisse de l'alcalinité et du pH. Cela se traduit par une diminution et parfois un arrêt de l'activité des micro-organismes. Les AGV sont dû à une surcharge organique (concentration de l'effluent...) dépassant les capacités de dégradation de l'écosystème microbienne.

1.4 Les différents procédés de valorisation énergétiques par méthanisation ^[3]^[4]

Les principales technologies rencontrées en bio méthanisation sont classées selon plusieurs critères :

- Les caractéristiques du substrat (il s'agit ici des différents modes de mise en contact entre les bactéries et la matière organique à traiter) ;
- La base de principe de fonctionnement (mode d'alimentation et de vidange des réacteurs);
- Le nombre d'étape, pouvant être à une étape (acidogenèse et méthanogenèse dans le même réacteur) ou à deux étapes (acidogenèse et méthanogenèse dans deux réacteurs successifs).

1.4.1 Procédés pour liquides

(ex : eaux résiduaires)

- ✚ Lit de boue à flux ascensionnel (UASB Upflow Anaerobic Sludge Blanket), à micro-organismes retenus sous formes de granules
- ✚ Filtre bactérien anaérobie, à micro-organismes retenus en biofilms attachés à des supports fixes.
- ✚ Lit fluidisé et lit expansé, à micro organismes attachés sur des petites particules maintenues en suspension.

1.4.2 Procédés pour boues

(Ex : lisiers, boue d'épuration,...)

- ✚ Réacteur mélangé (CSTR Continuous Stirred Tank Reactor) et à réacteur à écoulement <<piston>>, qui perdent les micro-organismes actifs avec l'effluent.
- ✚ Réacteur <<contact>> anaérobie, où les matières décantables, contenant les micro-organismes, sont séparées de l'effluent et recyclées dans le digesteur.

1.4.3 Procédés pour solides

(ex : fumiers, déchets ménagers,...)

Il existe deux familles de systèmes permettant de réaliser la digestion de ces produits : les procédés de digestion humide et les procédés de digestion sèche.

- ✚ Les procédés de digestion humide : Dans ces réacteurs, la teneur en eau est ajustée de manière à retrouver une teneur proche de 10-15% de matière sèche. Le digesteur proprement dit est généralement une cuve agitée.
- ✚ Les procédés de digestion sèche: Dans ce cas, on a une teneur en eau dans le réacteur comprise entre 20 et 40% donnant au milieu de fermentation une consistance pâteuse (ou semi-solide), avec une faible quantité d'eau libre.

1.4.4 Classification selon le principe de fonctionnement

- ✚ Digesteurs à phase unique

Les systèmes de gestion en continu ou en semi-continu

Ces procédés se caractérisent par une alimentation et une vidange simultanée et (semi) continues du digesteur.

L'alimentation du digesteur se fait par le sommet ou latéralement. Dans certains cas, Une partie du résidu au bas du réacteur est ré-circulé de manière à favoriser une homogénéisation de la matière au sein du réacteur.

Ce principe est généralement utilisé dans les installations de bio méthanisation dites agricoles. Pour compenser l'épuisement en matières fermentescibles du contenu du digesteur, un apport régulier en substrat frais est fait s'accompagnant d'un soutirage simultané d'une même quantité de substrat digéré (appelé digestat), de telle sorte que le volume utilisé dans le digesteur reste constant.

Il existe plusieurs procédés continus de biométhanisation. Les premiers à avoir été développés sont le système <<infiniment mélangés>> et le système <<piston>> (plug flow). Quoique largement utilisés encore, ces deux procédés présentent un inconvénient majeur : lors de l'évacuation du substrat digéré, une partie des bactéries responsables de la méthanisation est

également soutirée du digesteur. Leur concentration dans le digesteur est donc constamment ramenée à un niveau relativement bas, ce qui explique que les digesteurs de ce type présentent des productivités (volume de biogaz produit par m³ de digesteur et par jour) plus faibles. Ces digesteurs sont généralement rencontrés dans de grandes installations.

Les systèmes de digestion en batch

La matière à traiter est introduite en une seule fois dans une cuve étanche qui est ensuite fermée et maintenue aussi longtemps jusqu’à enregistrer suffisante d’une production de biogaz. Ces systèmes de digestion en batch fonctionnent par alimentation discontinue. Une fois la digestion terminée, le réacteur est ouvert, vidé et rempli à nouveau avec du substrat. Le système à l’avantage d’être simple mais il nécessite un post-traitement poussé de l’effluent.

Ces systèmes sont généralement rencontrés dans les fermes, petites installations, et sont actuellement presque abandonnés. Seules quelques très petites installations en industrie agroalimentaire fonctionnent encore selon ce principe.

 Digesteurs à phases séparées

La fermentation à phases séparées n’est à présent appliquée que pour des cas de fermentation à forte charge. Les phases d’acidogenèse (hydrolyse et acidification) et de méthanogenèse sont réalisées dans deux réacteurs différents montés en série. On parle de fermentation à deux phases.

Les avantages et les inconvénients des digesteurs à phase séparées

Tableau 1: Avantages et inconvénients des digesteurs à phase séparées

Avantages	Inconvénients
Possibilité d’optimisation des cinétiques de réactions biochimiques	Elimination de l’hydrogène produit par les méthanogènes hydrogénophiles
Volume réduit de digesteur	
Proportion de méthane augmentée	
Meilleure solution de l’heure aux problèmes d’accumulation des acides gras volatils en réacteur unique à forte charge	

Les digesteurs à phases séparés concernent principalement les installations de traitement de déchets solides comme la fraction organique des déchets ménagers ou certains résidus d'industries agroalimentaires, comme les chicorés.

Digestion mixte ou intégrée

Il est bon de signaler qu'un système mettant en œuvre une fermentation anaérobie à forte charge suivie d'un compostage aérobie a été développé au début des années 80.

Le principe du traitement consiste d'abord à faire subir au substrat organique une digestion anaérobie. Le sous-produit de digestion est ensuite stabilisé par l'étape de compostage. Cette seconde étape permet également la dégradation de la fraction de substrat peu digestible par voie anaérobie. Ces systèmes sont adaptés pour les installations de grandes puissances.

On retient des systèmes de traitement mixtes, deux avantages principaux :

- Réduction des moyens à mettre en œuvre pour le traitement du liquide issu du digesteur anaérobie, celui-ci étant en grande partie utilisé pour l'humification du compost.
- Stabilisation quasi complète du substrat organique en raison de la complémentarité des deux systèmes, en principe difficilement réalisée par l'une et l'autre méthode prise séparément.

On peut retenir des systèmes mixtes qu'ils ont l'avantage de récupérer de l'énergie par rapport au compostage seul et qu'ils permettent une bonne stabilisation aérée des résidus des digesteurs anaérobie. Ces genres de réacteurs sont beaucoup plus utilisés en Europe

Les tourteaux de toutes les filières oléagineuses en général et en particulier ceux de Jatropha étant des produits solides, ils sont valorisés suivant les procédés pour solides et en digestion humide ou soit en digestion sèche.

En Inde, trois types de réacteur ont été utilisés pour la méthanisation des tourteaux de Jatropha. Il s'agit des réacteurs à contact anaérobie, les réacteurs UASB et enfin les filtres bactériens.

1.5 Le biogaz

La composition du biogaz varie en fonction des sources de production, les molécules majoritaires seront le méthane (CH_4 , 50 à 75% v/v) et le dioxyde de carbone (CO_2 , 25 à 50% v/v) ^[10].

L'intérêt énergétique de ce biogaz réside dans sa forte teneur en méthane qui lui confère un pouvoir calorifique relativement élevé.

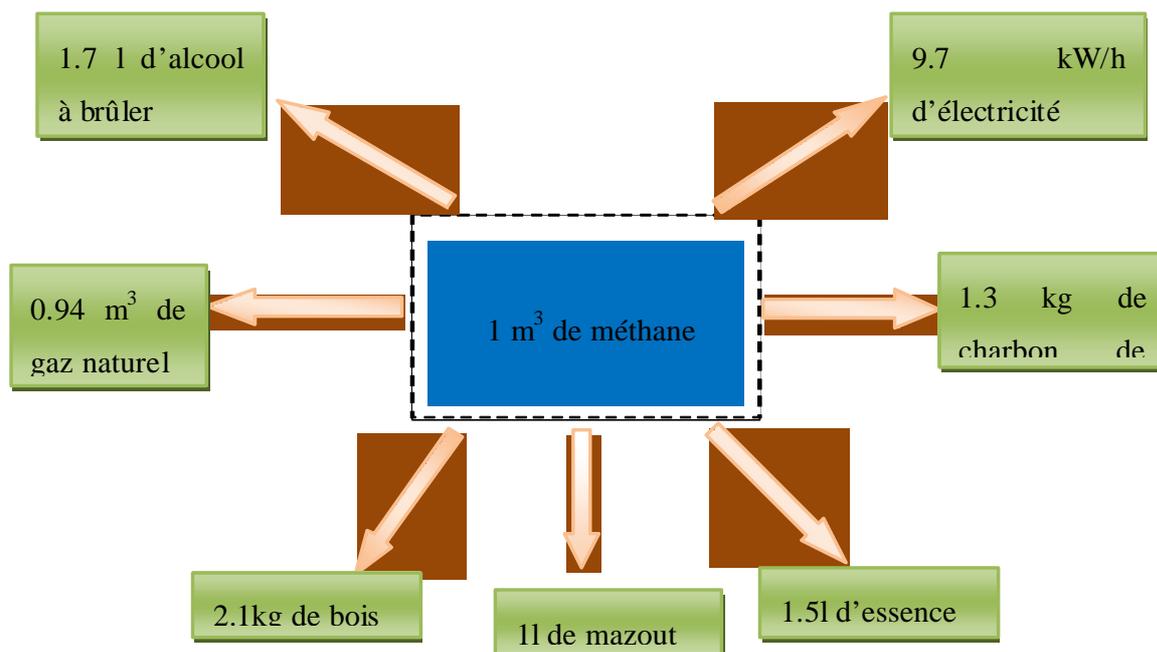


Figure 2:Equivalence énergétique du biogaz (source M.MOLETA, 2006)

Ainsi selon la source de matière organique utilisée la production de biogaz va varier tant en volume de biogaz produit qu'en teneur en méthane. Ces deux paramètres vont donc influencer le PCI final du biogaz. Il existe un test appelé potentiel méthanogène qui permet de déterminer l'intérêt d'un produit organique à être méthanisé et à produire du biogaz.

1.6 Valorisation énergétique du biogaz

1.6.1 Panorama des principaux usages actuels du biogaz

Le biogaz est convertible en pratiquement toutes les formes utiles d'énergie.

Certaines applications sont largement développées et l'offre industrielle et commerciale est solidement établie pour :

- l'utilisation directe en chaudière : production de chaleur, eau chaude ou de vapeur
- la production d'électricité
- la production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération
- gaz naturel après épuration
- carburant automobile après épuration et compression

- D'autres voies sont au stade de la recherche et développement : production d'hydrogène, pile à combustible, production de froid par absorption.

PARTIE II-ETUDE DES POSSIBILITES DE METHANISATION DES TOURTEAUX DE JATROPHA

1. Objectifs

Afin d'évaluer correctement un projet de méthanisation, l'une des premières étapes est de connaître la production de biogaz permise par les déchets produits. C'est l'objectif des travaux réalisés ci-après. Des tests de potentiel de méthanogène ont été réalisés pour deux types de tourteaux de conditions de pressage différentes. Deux types de tourteaux ont été utilisés pour nos tests.

1 : tourteau gras ; 2 : tourteau très sec.

Le rapport C/N est l'une des caractéristiques très importantes pour une bonne méthanisation. Pour les tourteaux de Jatropha, leur rapport est inférieur à 20 et ne situant pas dans la bonne fourchette (20 à 40) pour une bonne méthanisation. Nous avons décidé pour augmenter leur rapport en les mélangeant avec d'autres substances ayant un rapport élevé (forte teneur en carbone) comme les fumiers de bétails qui ont été choisis. En faisant le mélange, celui-ci n'a toujours pas le même rapport C/N selon la proportion utilisé. C'est la raison pour laquelle, plusieurs proportions ont été proposées afin de détecter celle qui produit mieux. Ces proportions sont présentées dans le tableau 8.

2. Procédés, produits et sous produits du Jatropha^[3]

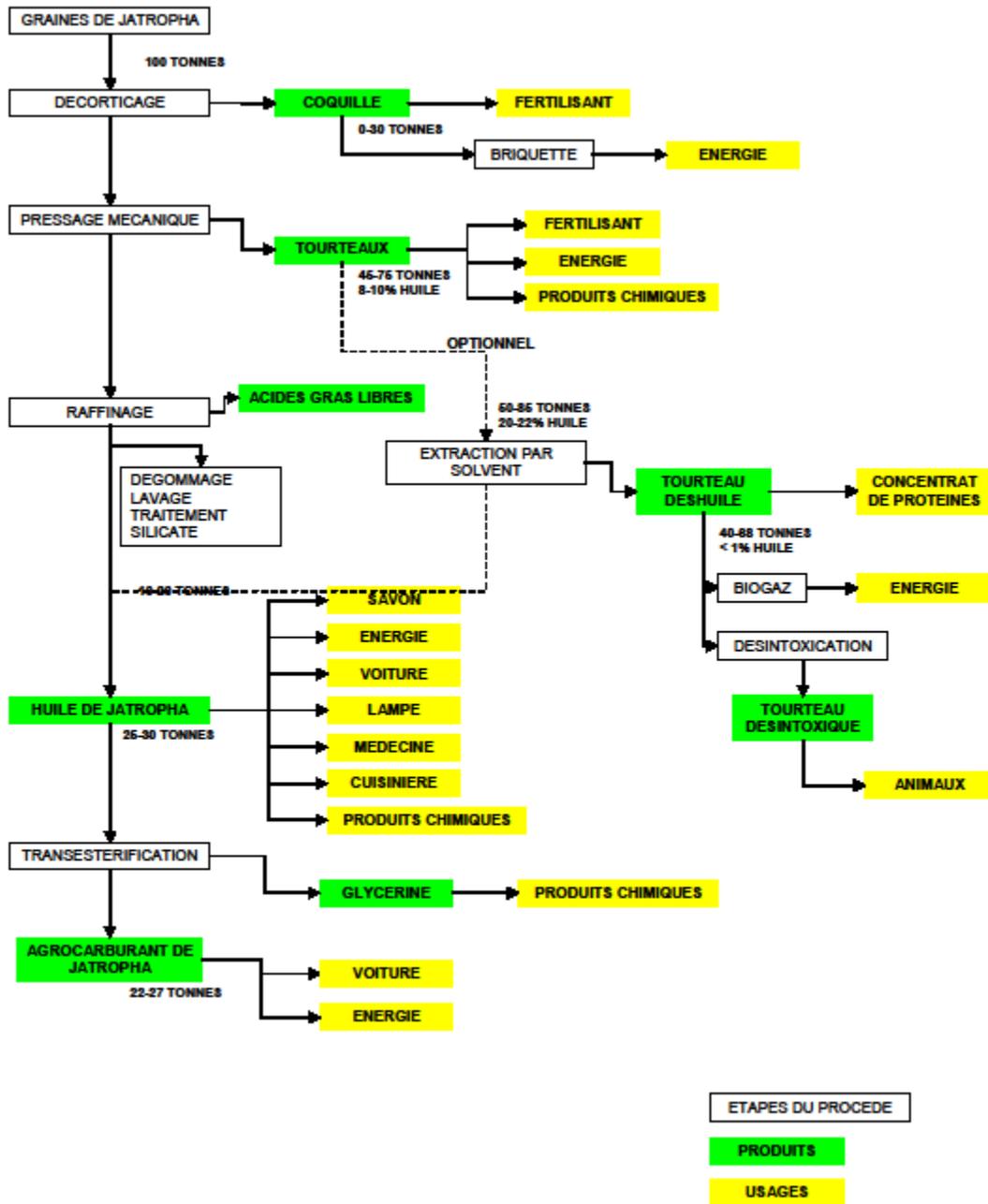


Figure 3: Procédés, produits et sous produits du Jatropha (source SOS FAIM, 2007)

Les tourteaux qui sont mal valorisés, constituent en grande majorité la composition des graines de Jatropha. Il y'a donc une forte raison pour nous de vouloir faire cette étude.

3. Littérature

Plusieurs études ont été faites sur méthanisation des tourteaux de Jatropha. Nous présentons ici les résultats de deux études menées dans ce sens.

3.1 Etude menée par NAFISA Ali et al

Ils ont axé leur étude sur l'influence du mixage avec d'autres substances sur la production de biogaz. Ils ont utilisé comme substance de mélange, les fumiers de bétail. Voici le résultat de leur étude présenté ici dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 2: Comparaison de la composition chimique des tourteaux de Jatropha et des fumiers de bétails

Substrat	TS (%)	VS (%)	C (%)	N (%)	P (%)	K (%)	ratio C/N	contenu d'huile (%)
FB	22.84	86.77	50.33	0.72	0.07	0.08	70 :1	0
TJ	90.89	78.56	45.56	5.73	1.75	0.94	8 :1	5.76

FB : Fumier de Bétail ;

TJ : Tourteaux de Jatropha

Les résultats de leur production en 10 jours sont consignés dans le tableau ci-après :

Tableau 3: Production du biogaz par les tourteaux de Jatropha

	100/100 Tourteaux	Mixage avec R=75:25	Mixage avec R=50:50	Mixage avec R=25:75	100/100 Fumier
Production de biogaz m ³ /kg MS	0.05	0.084	0.16	0.206	0.175

On remarque une augmentation moyenne de la production de biogaz de 0.051m³ jusqu'à un taux de Tourteaux/Fumiers =25/75 et une régression de la production au delà de ce taux.

3.2 Etude menée par Straumann et al. (1997)

Ces auteurs ont étudié la possibilité de production de biogaz par méthanisation des tourteaux de Jatropha et à partir de trois réacteurs différents. Ils ont aussi jugé nécessaire d'enlever les coques car ils se sont aperçus lors d'une expérience préliminaire qu'elles causaient l'obstruction des pipes et étaient à peine fermentescibles, probablement à cause de leur teneur en lignine.

Nous consignons dans le tableau ci-dessous, la composition (%) des tourteaux de Jatropha utilisés. ^[5]

Tableau 4: Composition moléculaires des tourteaux de Jatropha

	Avec coquilles (%)	Sans coquilles (%)
Poids sec	90.86	91.40
endre	6.03	6.55
Poids sec des matières organiques	84.83	84.92
protéines	24.54	53.11
Matière grasse	6.40	6.32
Fibres	32.26	5.60
Amidon	0.63	0.68
Sucres	0.71	9.36
Hémicellulose	5.55	1.94
Cellulose	20.30	6.43
Lignines	19.46	0.53

Les trois types de réacteurs utilisés sont: un réacteur UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), un biodigester de type contact anaérobie et un réacteur filtre anaérobie, d'un volume de 110 l chacun. La meilleure production en biogaz de 0.35m³/kg MS a été obtenue avec le filtre anaérobie. D'après les auteurs, le réacteur UASB ne serait pas adapté pour la fermentation des tourteaux. Ce dernier a en effet montré une certaine instabilité durant le procédé, qu'ils attribuent à la teneur en éléments solides du substrat, conduisant à la formation de « boues granuleuses ». Concernant la qualité du biogaz produit, les indicateurs sont la teneur en méthane et en sulfure d'hydrogène (H₂S). Dans le cas du filtre anaérobie, la teneur en méthane mesurée en moyenne est de 70 % : en comparaison, le biogaz obtenu à partir de déchets de coton a une teneur en méthane de 67 %. La moyenne de la teneur en H₂S mesurée est de 0.39 % : elle ne doit pas dépasser 0.2 % avant combustion si l'on veut éviter la corrosion métallique.

Tableau 5: Comparaison des rendements de production de biogaz dans trois réacteurs

	Réacteur UASB	Procédé à contact	Filtre
Taux de production [m ³ /kg MS]	0.14	0.19	0.35
Abattement (%)	-	-	75

On note une meilleure production de biogaz de 0.35m³/kg MS avec les digesteurs de type filtre anaérobique.

Conclusion partielle :

- Les tourteaux sont aussi de substances fermentescibles avec un potentiel méthanogène pouvant atteindre 0.35m³/kg MS [7], mais on obtiendrait toujours de meilleurs rendements de production de biogaz quand on les mélange avec d'autres substances de rapport C/N élevé.
- Les tourteaux contenant des coques sont difficilement fermentescibles à cause de la forte proportion en lignine.
- Les digesteurs de type filtre anaérobie sont plus performants que ceux en batch et sont adaptés aux tourteaux de Jatropha.

4. Test de potentiel méthanogène des tourteaux de Jatropha

4.1 Analyse élémentaire de nos tourteaux utilisés

Avant de commencer à faire nos expériences, il est impérieux de connaître les caractéristiques de nos tourteaux. L'analyse élémentaire a été faite au CIRAD. Quant à la détermination de la teneur en huile, elle a été faite au LBEB. Le protocole d'extraction d'huile est présenté à l'annexe 1. Nous consignons les résultats d'analyse dans le tableau suivant.

Tableau 6: Résultats d'analyse des tourteaux de Jatropha au LBEB

tourteaux	% C	% H	% N	% Humidité	% Huile	% Cendre	% MV	C/N
1	48.74	5.94	3.58	6.3	-	8.56	69.99	13.61
2	44	5.83	3.10	5.7	-	9.44	67.40	14.21
3	46.75	6.40	3.42	6.10	12.11	7.04	71.07	13.68
4	54.02	7.75	3.06	4.80	18.70	5.27	79.28	17.66
5	44.49	6.05	3.44	6.00	-	7.36	70.82	13.00

1 : tourteaux granulés ; 2 : tourteaux granulés avec coques ; 3 : tourteaux secs et fins ; 4 : tourteaux gras ; 5 : tourteaux très secs.

%H₂O : taux d'humidité ; %MV : taux de matières volatiles ; %MM : taux de matières minérales ou de cendres ; %CF : taux de carbone fixe ; %Huile : teneur en huile.

Les tourteaux selon la qualité de pressage, n'ont pas les mêmes compositions suivant les conditions de pressage. Ils diffèrent par leur teneur en huile, leur taux d'humidité, de carbone, azote... Il en est de même de leur rapport C/N qui est un facteur très important pour la méthanisation.

Nous constatons que nos tourteaux ont dans tous les cas un rapport C/N plus élevé que ceux vus dans la littérature. Cela s'explique par le fait que nos tourteaux ont une plus forte proportion en carbone à cause de la forte teneur en huile.

4.2 Analyse élémentaire des fumiers de bétails utilisés

Nous donnons aussi dans ce tableau ci-après, les résultats d'analyse des fumiers de fumiers utilisés. Ce sont des fumiers que nous avons ramassés chez un fermier à Kamboinsé.

Tableau 7: Résultats d'analyse élémentaire des fumiers de bétails utilisés

	% C	% N	% H	Rapport C/N
FB	18.65	0.77	7.86	24

Nos fumiers utilisés ont aussi un faible rapport C/N par rapport à ceux vus dans la littérature car les notre ont une faible proportion en carbone. L'analyse des fumiers a été aussi faite à l'université de Montpellier.

NB : Nous n'avons pas tenu compte des résultats d'analyse des fumiers car le LBEB n'est pas encore en mesure d'effectuer une analyse élémentaire des composés et au moment nous avons effectué la première expérience, les résultats d'analyse ne nous étaient pas parvenus. Les données vues dans la littérature ont été utilisées pour cette raison. Mais dans la deuxième expérience, ces résultats sont pris en compte.

4.3 Matériels et méthode

Voici en image les deux qualités de tourteaux utilisées dans notre expérimentation.

Tourteaux de type 4 (tourteaux très gras) et les tourteaux de type 5 (tourteaux très secs).



Figure 4: Image de tourteaux de Jatropha utilisés (A gauche: tourteau gras; A droite: tourteau très sec)

Pour les tests de production de biogaz, des réacteurs batch de capacité 0.02m^3 (20l) sont utilisés en présence d'un inoculum microbien adapté (boue de station d'épuration du site du 2ie Ouaga). Fermés hermétiquement (conditions anaérobies), ces fermenteurs sont tous exposés au soleil dans le but de leur imposer des conditions thermophiles et sont agités régulièrement (chaque deux jours).

Pour chaque type de tourteau, cinq tests ont été réalisés. Ce qui nous donne au total 10 réacteurs utilisés (les réacteurs sont des bidons de 20l).

Nous avons choisi de tester une digestion sèche avec les tourteaux de Jatropha comme on avait le choix entre les deux afin d'éviter une grande consommation d'eau quant on sait que le BURKINA FASO est un pays sahélien où les problèmes d'eau sont récurrents.

Les quantités de matières sèches dans chaque digesteur

Les digesteurs utilisés sont des digesteurs batch. En optant pour une digestion sèche, le mélange va être composé d'au plus 60% de la matière de sèche ; le reste étant de l'eau ^[4]. Pour notre étude, nous avons utilisé 60% de matière sèche pour le mélange.

Afin de mieux maîtriser notre production, nous avons utilisé seulement 2 kg de matière sèche dans chaque digesteur. Cette matière sèche pouvant être uniquement des tourteaux ou un mélange entre les tourteaux et les fumiers à des proportions bien déterminées. Nous rappelons que l'humidité moyenne des tourteaux est de 5% et que l'humidité moyenne des fumiers utilisés est de 44%. En fonction donc de l'humidité moyenne de la substance, la quantité d'eau à ajouter dans chaque digesteur peut être revue à la baisse Nous avons aussi pris un rapport C/N d'environ 60 pour les fumiers de bétail.

Toutes ces quantités seront données dans le tableau ci-après.

Tableau 8: Composition du substrat dans les digesteurs

	Tourteau de type 4					Tourteau de type 5				
Contenance	100/100 tourteau + 40% d'eau	Mélange tourteau + fumier 75/25+ 40% d'eau	Mélange tourteau + fumier 50/50+ 40% d'eau	Mélange tourteau+ fumier 25/75+ 40% d'eau	Mélange tourteau + Boue 60/40+ 40% d'eau	100/100 tourteau + 40% d'eau	Mélange fumier +tourteau 75/25 + 40% d'eau	Mélange tourteau + fumier 50/50+ 40% d'eau	Mélange tourteau+ fumier 25/75 + 40% d'eau	Mélange tourteau+ boue 60/40 + 40% d'eau
Quantité d'eau (l)	1.23	1.05	0.84	0.64		1.23	1.05	0.84	0.64	
Rapport C/N	16	29	38	49		13	25	37	48	

Eau utilisée : eau du barrage

Ensemencement des digesteurs : 1l de boue dans les 3 premiers bidons contenant chaque type de tourteau). On fait l'ensemencement dans le but de multiplier les bactéries et accélérer la digestion au démarrage.

4.4 Les paramètres de contrôle

La quantité de biogaz produite par jour et sa concentration en CH₄ sont les paramètres que nous allons contrôler. Il est prévu des sacs en plastique de 0.05m³ pour pouvoir récupérer le biogaz produit. Des tuyaux de 3m et de diamètre intérieur d'environ 1centimètres sont chargés d'acheminer le biogaz des bidons vers les sacs. Pour quantifier le biogaz produit, nous pouvons ainsi récupérer ainsi avec soin les sacs contenant le biogaz et nous faisons passer le gaz à travers un compteur volumétrique qui nous donnera automatiquement son volume. Cette méthode a été jugé non fiable car les sacs utilisés ne sont pas adaptés. On ne pourra donc pas déterminer avec exactitude la quantité de biogaz produite dans chaque bidon à cause du manque d'étanchéité au niveau des sacs. La méthode utilisée consistait à peser chaque jour la masse des réacteurs. La perte de masse observée correspond à la quantité de biogaz. Le volume du biogaz produit chaque est donnée par la formule suivante : $V = \frac{P_m}{\rho_b}$

V (m³) est le volume du biogaz; P_m(kg) la perte de masse et ρ_b(kg/m³) la masse volumique du biogaz.

Pour l'analyse du gaz, nous allons faire un petit prélèvement dans un autre sac bien étanche et adapté pour cela. L'appareillage utilisé est un chromatographe en phase gazeuse (Micro-GC Varian490-GC) équipé de deux voies analytiques constituées d'un micro-injecteur, d'un four,

d'une colonne analytique et d'un détecteur à conductibilité thermique (TCD). Les deux colonnes analytiques, Molsieve 5A et Poaplot Q, utilisent respectivement l'argon et l'hélium comme gaz vecteurs. Les espèces identifiées sont N_2 , O_2 , H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 et C_2H_6 .

4.5 Schéma de montage

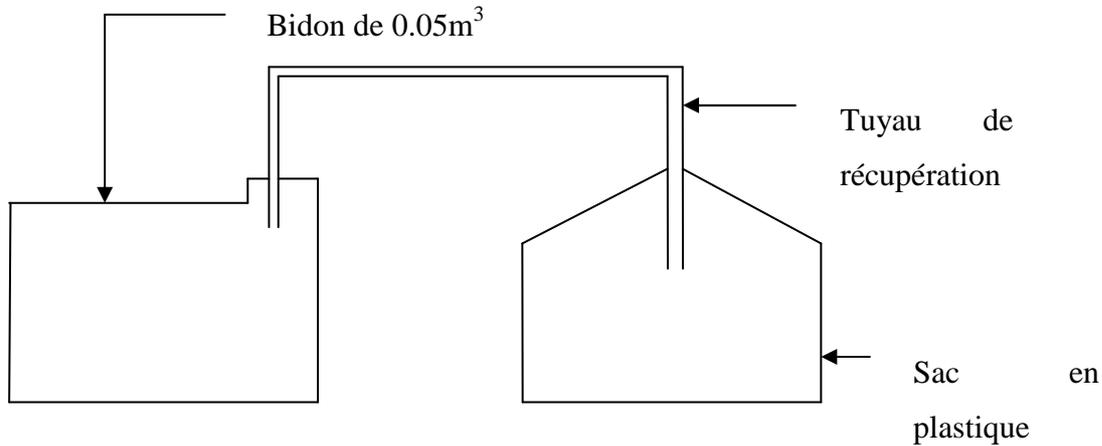


Figure 5: Montage des installations

- ❖ Bidon utilisé comme digesteur ;
- ❖ Tuyau utilisé en cheminer le gaz du digesteur vers la burette ;
- ❖ Colle utilisée pour faire l'étanchéité entre le bidon et le tuyau ;
- ❖ Récipient utilisé pour contenir l'eau ;
- ❖ Burette utilisée pour récupérer les bulles de gaz.



Figure 6: Digesteurs exposés au soleil

Nous montrons ci-dessous, quelques appareils et matériels utilisés



Figure 7: Appareils utilisés

4.7 1^{ères} Résultats et discussion

Après quelques jours d’attente, nous avons fait un petit prélèvement de substrat dans les digesteurs afin de déterminer le pH.

Tableau 9: Valeur des pH dans les digesteurs

Codification	41	42	43	44	45	51	52	53	54	55
pH	5.60	5.77	5.64	6.00	6.20	5.91	6.12	6.23	5.94	6.14

Le 1^{er} chiffre correspond au 1^{er} type de tourteau et le 2^{ème} chiffre correspond au numéro du digesteur

Nous constatons que la valeur de pH dans chaque digesteur est inférieure aux valeurs souhaitées pour un bon déroulement de la digestion. Ceci est une caractéristique des milieux acides, ce qui ne favorise pas le développement des bactéries dans les réacteurs et pouvant même interrompre la digestion. Cela peut être dû à une surproduction d’H₂ lors de la troisième étape qui est l’acidogenèse.

Tableau 10: Résultats de la 1ère expérience

Résultats	
Production de biogaz	0.014m ³
Potentiel méthanogène	

Taux de dégradation	19 jours
Temps de dégradation	
Teneur en CH ₄	

Ce test révèle une faible dégradation du substrat. Seulement une faible proportion de la matière organique est dégradée en 19 jours.

Les valeurs de pH dans les digesteurs montrent qu'il y'a une accumulation d'AGV et d'H₂ provoquée par une surcharge organique. Cette surcharge organique est une concentration élevée de l'effluent à cause de la forte teneur en huile qui est composé en grande majorité d'acides gras. La digestion a été interrompue quelques temps après le démarrage. Il fallait donc une plus grande quantité d'eau pour diluer ces huiles et diminuer la concentration de l'effluent. Nous concluons que cette faible quantité d'eau dans le mélange qui est une caractéristique de la digestion sèche n'est pas adaptée pour les tourteaux de Jatropha.

La digestion sèche n'étant pas adaptée pour les tourteaux de Jatropha, nous recommençons nos expérimentations en adoptant une digestion humide dans les lignes qui suivront.

4.8 Deuxième expérience

Dans cette partie nous reprenons le test comme le premier ne s'est bien pas déroulé mais cette fois-ci en adoptant une digestion humide (plus de 40% d'eau) des tourteaux de Jatropha. Il s'agit de déterminer seulement le seuil de quantité d'eau à ajouter pour que la digestion des tourteaux de Jatropha soit meilleure. Les expériences se dérouleront comme décrit dans le protocole ci-dessous.

Tableau 11:Résumé des caractéristiques du substrat et mode opératoire

Caractéristiques du substrat									
Tourteau 4					Tourteau 5				
Origine : Belwett SA Humidité : 5% Quantité de MS : 2kg/bidon Observation : tourteau très gras					Origine : Belwett SA Humidité : 4% Quantité de MS : 2kg/bidon Observation : tourteau très sec				
Mode Opérateur									
Tourteau 4					Tourteau 5				
Nombre d'essai : 5 Caractéristique d'inoculum : Fumier de vache Condition de température : thermophile					Nombre d'essai : 5 Caractéristique d'inoculum : Fumier de vache Condition de température : thermophile				
Teneur en eau									
41	42	43	44	44	51	52	53	54	55
42%	49%	56%	63%	70%	42%	49%	56%	63%	70%

4.9 2^{èmes} résultats d'expérience et discussion

La perte de masse observée au niveau des bidons correspond à la production de biogaz. Connaissant la perte de masse et la masse volumique du biogaz, nous déterminons le volume du biogaz produit chaque jour.

m est la différence de masse d'un bidon; ρ est la masse volumique du biogaz ($1.1\text{kg}/\text{m}^3$);

V est le volume. [8]

Le tableau ci-dessous résume la composition du substrat dans chaque digesteur, la production totale de biogaz et le potentiel méthanogène. Les pertes de masse de chaque bidon sont présentées en annexe2.

Tableau 12: Résultats de la 2ème expérience

	Tourteau de type 4					Tourteau de type 5				
Codification	41	42	43	44	45	51	52	53	54	55
Masse tourteau (kg)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Masse fumier (kg)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Masse MS (kg)	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49
Masse totale mélange (kg)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Eau ajouté(l)	3.26	3.98	4.96	5.92	6.5	3.26	3.98	4.96	5.92	6.5
% d'eau	42.18%	49.18%	56.18%	63.18%	70.18%	42.18%	49.18%	56.18%	63.18%	70.18%
Temps de rétention	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours
Production totale (m ³)	0.1139	0.119	0.221	0.272	0.493		0.085	0.086	0.238	
Potentiel méthanogène moyenne (m ³ /kg MS)	0.045	0.047	0.088	0.109	0.197		0.034	0.0345	0.095	

Nous constatons que la production de biogaz est intéressante lorsque la quantité d'eau augmente jusqu'à 70% de la matière sèche. Elle est aussi intéressante pour les tourteaux plus gras. Nos résultats sont comparés avec ceux du digesteur (littérature) présenté dans la troisième colonne du tableau 3, car nos substrats ont presque les mêmes caractéristiques que ceux de ce même digesteur. Nous avons eu une production un plus faible et ceci peut s'expliquer par plusieurs points :

- Nos fumiers utilisés avaient un rapport C/N très faibles comparativement à ce qui a été vu dans la littérature.
- Nous avons exposé nos bidons au soleil espérant les imposer des conditions thermophiles pour avoir jouer sur la vitesse et le rendement de production de biogaz. Des mesures de température dans les bidons donnent une moyenne de 38°C dans la journée et 32°C la nuit. Les bidons sont dans ce cas en condition mésophile et nous disons que cela a aussi agit sur la production du biogaz.

Dans l'ensemble, les tourteaux de Jatropha présentent un potentiel méthanogène plus élevé que certaines substances (annexe 7) comme les fumiers de bovins, les déchets de légumes...

Résultat d'analyse du biogaz

Les principaux gaz formés lors de la méthanisation des tourteaux de Jatropha ont été analysé par chromatographie en phase gazeuse au LBEB.

Nous avons analysé le biogaz produit dans trois bidons et nous avons constaté qu'il n'y avait pas une grande différence entre les résultats de ces bidons. Nous présentons ici les résultats pour un bidon dans le tableau ci-après. Le chromatographe sera présenté en annexe 10.

Tableau 13: Résultat d'analyse du biogaz (3 essais)

	1 ^{er} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai	Moyenne
% H ₂	1.72	1.70	1.73	1.71
% N ₂	67.46	67.39	67.54	67.46
% CH ₄	2.43	2.43	2.36	2.39
% CO ₂	10.00	10.00	9.82	9.91
Autres	-	-	-	18.53

Nous constatons une faible proportion de méthane dans le biogaz. Il en est de même que le CO₂. Cela n'est pas normal car dans la littérature, le CH₄ et le CO₂ constituent les principales composantes et représentent plus de 90% du biogaz. En revanche notre biogaz a une composition plus importante en N₂ qui n'est rien que de l'air et une petite quantité de l'H₂. Cela peut s'expliquer par plusieurs points :

- Les sacs utilisés pour la récupération du biogaz ne sont pas adaptés. L'étanchéité n'est donc pas assurée et comme le méthane a une densité faible (0.55), il s'échappe plus facilement et laisse la place aux autres gaz comme l'air qui arrivent à pénétrer.
- Il y'a peut être aussi eu une entrée d'air du prélèvement jusqu'à l'analyse du biogaz
- La présence de l'H₂ montre qu'il y'a toujours une petite surcharge organique et il faut toujours diluer pour la faire disparaître totalement dans les digesteurs.

PARTIE III- LES ECHELLES DE PRODUCTION DE BIOGAZ - IDENTIFICATION DES TECHNOLOGIES DE METHANISATION

1. Les modèles de production de biogaz

Deux modèles de production de biogaz sont envisageables en fonction de son utilisation finale : le modèle agricole et le modèle industriel.

Dans le modèle agricole, le biogaz produit est utilisé soit directement dans la cuisine pour la cuisson des aliments, soit pour le chauffage des maisons (en Europe). Ce modèle est beaucoup plus rencontré dans les fermes et aussi dans les ménages. Quant au modèle industriel, il est plutôt rencontré dans les industries agro-alimentaires et autres où les déchets produits sont utilisés pour la méthanisation. Le biogaz produit est traité et souvent utilisé dans les turbines ou moteurs à gaz pour la production d'électricité.

1.1 Technologies identifiées pour la production de biogaz à partir des tourteaux de Jatropha selon le modèle agricole

Dans ce modèle de production, plusieurs technologies peuvent être utilisées pour la digestion des tourteaux. On peut avoir entre autres, les digesteurs batch ou discontinus, les digesteurs en sac, les digesteurs compacts de biogaz (compact biogas digester)...

1.1.1 Description des différentes technologies

- **Les digesteurs batch ou discontinus** (décrit un plus haut : partie 1)



Figure 8: Exemple de digesteur batch [1]

▪ **Les digesteurs en sac**

Ce genre de système est composé d'un sac d'une forme ovale de rapport longueur : largeur d'environ 5 : 1. La matière de base humide entre dans l'un des côtés du sac et sort de l'autre côté après la digestion (digestat); il est monté dans un fossé un peu profond qui soutient le sac contenant la substance. Le biogaz produit s'échappe du sac et est récupéré dans la partie supérieure à travers un tuyau qui l'achemine vers le réservoir.

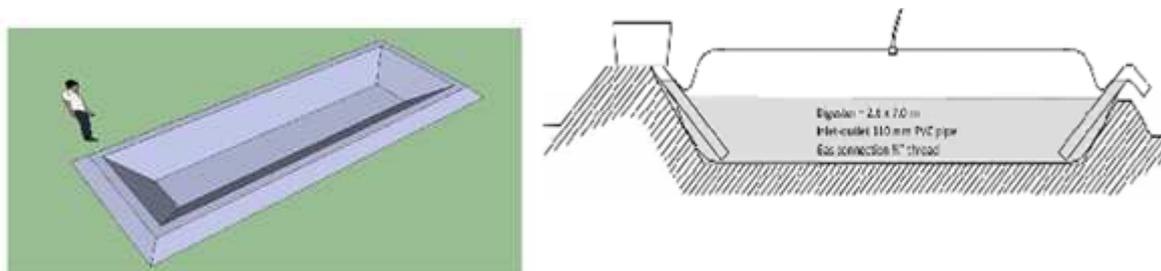


Figure 9: Schéma de principe 1[9]

Cette technologie opte pour une digestion humide avec une teneur en eau de plus de 60% du volume du mélange de base. Les digesteurs issus de cette technologie sont des digesteurs continus (alimentation continue en substrat).

▪ **Les digesteurs compacts de biogaz**

Le principe consiste à utiliser deux barils (l'un ayant un diamètre plus petit que l'autre) dont le dessus est coupé. Le plus petit est renversé et emboîté dans le plus grand contenant le substrat. Le plus grand sert de digesteur et le plus petit contient le biogaz produit. Une pipe flexible un peu plus longue est montée du côté inférieur du petit baril. Un entonnoir est fixé à son extrémité libre pour introduire le substrat. Au début, le petit baril est partiellement immergé. Dès la production du biogaz, il monte sous l'effet de la pression. Le biogaz est

ainsi récupéré du coté supérieur du petit baril à travers un tuyau et acheminé pour être utilisé ou stocké.

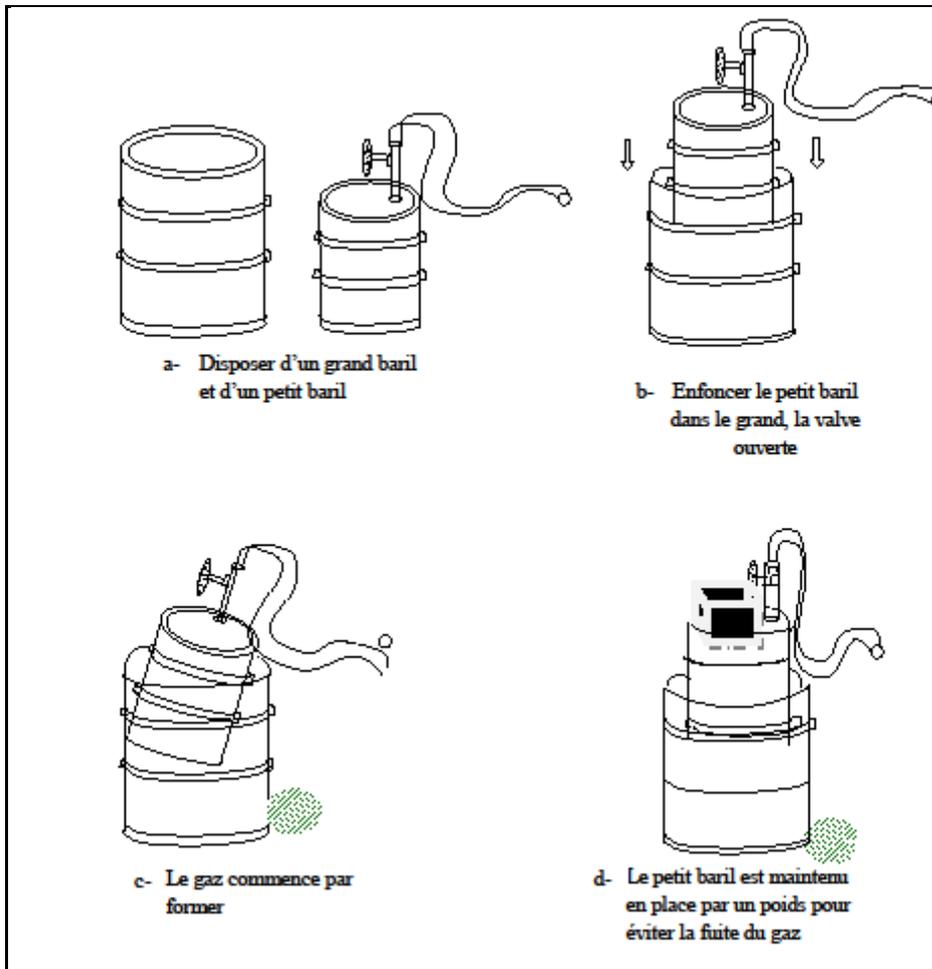


Figure 10: Schéma de principe 2 (ARTI, 2009)

1.1.2 Avantages et inconvénients de ces différentes technologies

Tableau 14: Comparaison des digesteurs (1)

	Avantages	Inconvénients
Digesteurs batch	<ul style="list-style-type: none"> • Une flexibilité d'approvisionnement au cours de l'année. • Un besoin en terme de process faible. • Peu d'éléments techniques (pas de pompe, brasseur, agitateur) d'où une réduction des coûts d'entretien et d'énergie sur ce poste. • Production d'un digestat 	<ul style="list-style-type: none"> • Un temps de séjour global relativement long (qui ne permet pas finalement de réduire les volumes de digestion par rapport à l'infiniment mélangé) • Un travail de manipulation amont et aval de la matière très important (charge en main d'oeuvre et en fuel) • Des mesures de sécurité

	stockable en tas et épandable avec un épandeur à fumier.	importante à prendre pour l'ouverture et la fermeture des digesteurs. <ul style="list-style-type: none"> • Des coûts d'investissement encore élevés car il existe peu d'installation de ce type (pas de standardisation/concurrence). • Certains dispositifs sont encore en phase de test. • Technologie pratiquement abandonnée
Digesteurs en sac	<ul style="list-style-type: none"> • Production continue de biogaz 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de séjour relativement long (50 jours) • Un travail de manipulation amont et aval de la matière très important • Risque d'explosion • Technologie récente
Digesteurs compacts	<ul style="list-style-type: none"> • Pas besoin d'un nombre important de personnes pour la réalisation • Risque d'explosion réduit • Utilisable dans n'importe lequel ménage. • Maintenance réduite • Possibilité d'utilisation de matériels locaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Des odeurs. • Risques de surcharge pouvant être inhibiteur à la réaction

1.1.3 Choix de la technologie

Comme décrit dans le tableau ci-dessus, il existe plusieurs technologies de méthanisation des tourteaux de Jatropha selon le modèle agricole. Les digesteurs compacts présentent plus d'avantages car ils ont un coût très réduit, ils ont un temps de rétention plus court (25 à 32 jours) et un taux de dégradation satisfaisant (au moins 60% de la matière organique). C'est la raison pour laquelle nous avons choisis cette technologie pour la digestion des tourteaux de Jatropha en production agricole. Il faut signaler que ces digesteurs sont des digesteurs continus et fonctionnent en digestion humide.

1.1.4. Stockage du biogaz

Le stockage du biogaz est un véritable problème à prendre au sérieux (problèmes d'explosion du aux fuites de gaz). Des sacs très adaptés et beaucoup plus utilisés ont été proposés pour le stockage du biogaz. Les caractéristiques de ces sacs sont les suivantes :

Marque : PUXIN

Type de sac : PX-2.5

Prix : 1-100 dollars selon le volume

Durée de vie : plus de 10ans

1.2 Technologies identifiées dans le modèle industriel pour la digestion des tourteaux de Jatropha.

Dans l'industrie, les besoins en gaz sont généralement continus et les digesteurs de type continu sont généralement utilisés pour cette raison. Ils sont les plus utilisés et les plus développés actuellement.

Dans la sous région ouest-africaine, les digesteurs continus les plus utilisés sont les digesteurs de type chinois et les digesteurs de type indien en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur faibles coût. En plus de ces deux types de digesteurs, Les digesteurs à piston sont adaptés pour la production industrielle.

1.2.1 Les digesteurs de type chinois (à dôme fixe)

Les digesteurs de types chinois ont la souplesse de convertir toutes les matières organiques biodégradables et offre l'avantage d'un entretien facile et d'une durée de vie assez longue (25 ans au moins). Ils se construisent entièrement sous le sol et comportent :

- Un compartiment de fermentation parfaitement étanche à l'air et à l'eau et constitué de briques, pierres et du béton banché. La pression est fonction de la production et de l'utilisation du gaz. Le gaz produit s'accumule dans l'enceinte et lorsque la pression augmente, elle pousse en partie les déchets vers la décharge automatique qui est fermée par une trappe rendant le digesteur hermétique. Quand la pression diminue suite à la consommation du biogaz, le volume des déchets a diminué et de nouveaux substrats s'introduisent dans l'enceinte pour une nouvelle fermentation.
- Des orifices d'entrée et de sortie, débouchant à mi-hauteur dans la cuve de fermentation.
- Un couvercle déplaçable permettant des interventions humaines dans la cuve de fermentation.
- Un tuyau d'évacuation du gaz.

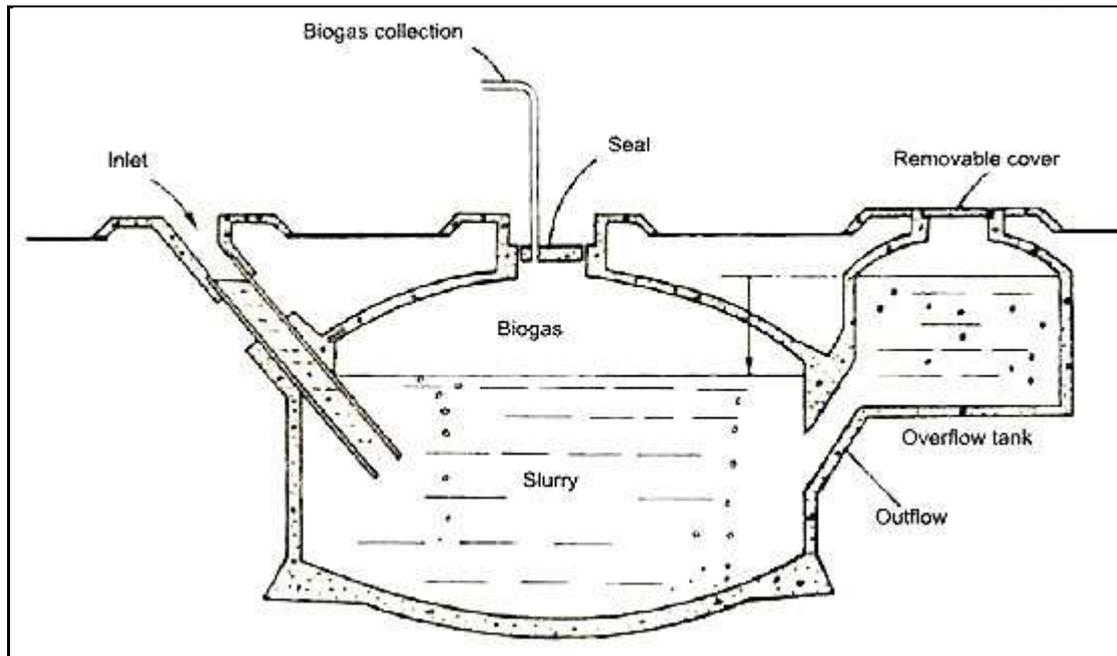


Figure 11: Digesteur de type continu chinois[6]

1.2.2 Les digesteurs de type indien

Ces digesteurs conviennent aux déjections animales et plus particulièrement à la bouse de vache. Ils ont composés :

- D'une cuve de fermentation étanche à l'air et l'eau, à l'intérieur duquel se produit la digestion anaérobie.
- D'un gazomètre métallique incorporé au digesteur et coulissant le long d'un axe central fixe. Le gazomètre s'élève sous l'effet de la production de gaz et permet d'avoir une pression constante de celui-ci.
- De deux orifices d'entrée et de sortie des matières débouchant à mi-hauteur dans la cuve de fermentation.
- D'un tuyau de récupération du gaz produit.

Ces digesteurs ne sont pas préconisés pour une installation de taille élevée sauf si l'on possède de grands équipements de fermentation.

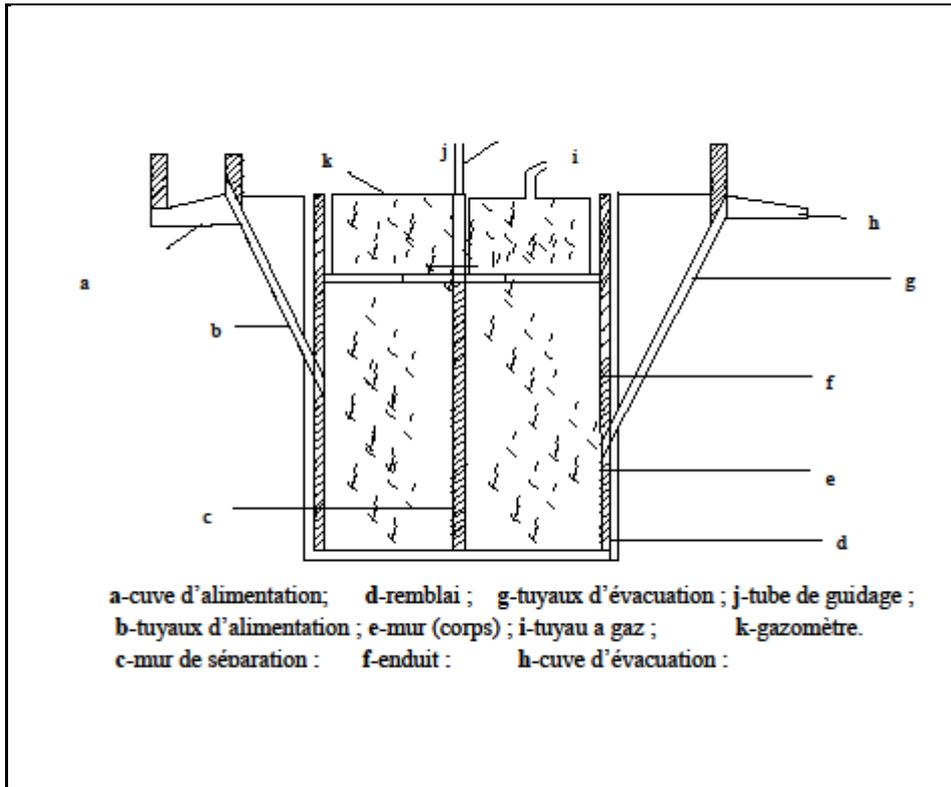


Figure 12: Digesteur de type indien[6]

1.2.3 Les digesteurs à piston

Ce sont des systèmes cylindrique où le substrat avance sous l'influence des pâles qui tournent au tour d'un axe horizontal. Il a un caractère piston dans l'axe horizontal et mélangé dans l'axe vertical. Un schéma est représenté sur la figure dessus.

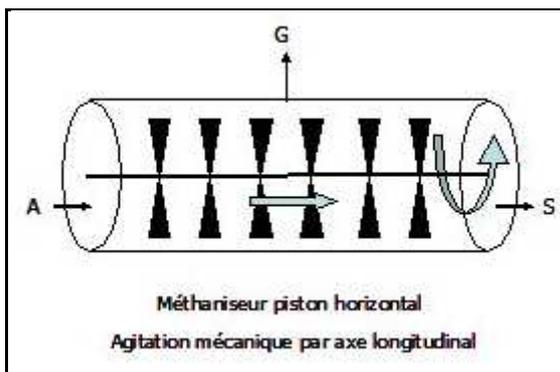


Figure 13: Digesteur à piston[2]

1.2.4 Comparaison des digesteurs

Tableau 15: Comparaison des digesteurs (2)

Type de digesteur	Comparaison	
	Avantages	Inconvénients
Modèle chinois	<ul style="list-style-type: none"> • Sa construction est simple, ne nécessite pas de métal et requiert 40% moins de mains d'œuvre que celle du type indien • Des artisans locaux peuvent être facilement formés à la construction du digesteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un savoir-faire pour construire le dôme et rendre étanche le digesteur
Modèle indien	<ul style="list-style-type: none"> • Le savoir-faire requis pour la construction de la partie principale du digesteur est relativement simple 	<ul style="list-style-type: none"> • Beaucoup de main d'œuvre est requise pour la construction de ce type de digesteur. • Nécessite un équipement pour la construction du gazomètre.
Type piston	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure agitation du substrat dans le digesteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un investissement lourd au départ.

1.2.5 Choix du système

Les modèles chinois et indien peuvent être utilisés dans ce cas car ces digesteurs sont presque similaires et sont beaucoup plus utilisés en Afrique de l'ouest. Dans notre étude, le modèle chinois est choisi pour sa simplicité et sa longue durée de vie (25 ans au moins). Il a aussi la souplesse de convenir à toutes les matières organiques biodégradables.

PARTIE IV : DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DES TOURTEAUX DE JATROPHA ET APPLIQUEE AU MODELE AGRICOLE ; ANALYSE FINANCIERE ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.

1. Cadre de l'étude de cas : Descriptif

Le LBEB a réalisée une étude au BURKINA FASO en vue du développement des agrocarburants suite à des analyses sur les consommations et les applications techniques liées à l'usage des hydrocarbures. Ils ont envisagés plusieurs scénarios crédibles, techniquement réalisables, de développement des biocarburants au niveau national qui sont[9] :

- Scénario 1 : Filière courte, production locale d'huile végétale brute (Jatropha, autres oléagineux) pour force motrice/électrification rurale (plate-forme multifonctionnelle).
- Scénario 2 : Substitution d'huile végétale brute (Jatropha, autres oléagineux) au gas-oil et au DDO pour la production d'électricité.
- Scénario 3 : production centralisée, substitution d'éthanol à l'essence ou de biodiésel au gas-oil pour les transports.

Dans la filière courte (Scénario 1), il s'agit donc de produire localement de l'huile végétale (huile de Jatropha) qui fournira de l'électricité pour les villages. Kinfangué est un village qui a bénéficié de cette plate-forme multifonctionnelle. La production d'huile générant des tourteaux qui ne sont souvent pas valorisés à cause de leur toxicité, nous voulons à partir de cette étude voir s'il serait bénéfique de valoriser ces tourteaux par méthanisation pour la substitution de la consommation du bois dans tout le village.

Hypothèses

- A cause des moyens et des risques qui existent dans le transport du biogaz, nous choisissons une production décentralisée, c'est à dire l'implantation d'un digesteur pour chaque ménage.
- Nous prenons un pouvoir méthanogène des tourteaux de Jatropha de $0.02\text{m}^3/\text{kgMS}/\text{j}$
- La production de biogaz par les déjections des animaux est trop faible. Nous proposons de mélanger les tourteaux avec des tiges de maïs pour la production de biogaz (tableau 17).
- Quantité d'eau : 70% du mélange

- Inoculum : 20% de la matière sèche qui peut être des boues ou des déjections d'animaux.
- Type de digesteur choisit : digesteur compact

2. Estimation des besoins en biogaz de chaque ménage

Kinfangué est situé à une quinzaine de km au sud de OUAGADOUGOU sur la route de Léo. C'est un village de 2014 habitants ou 152 ménages (recensement de 1996) soit en moyenne 15 personnes par ménage[10].

Afin de répondre au besoin énergétique du ménage et d'éviter l'exploitation excessive des ressources ligneuses qui peut entraîner des problèmes à court terme d'approvisionnement en ressource ligneuse et des déséquilibres de l'écosystème, l'installation d'un digesteur de production de biogaz est une solution envisageable et pour cela l'installation d'un bruleur adapté est nécessaire. D'après le tableau ci-dessous, la demande énergétique est estimée de la manière suivante :

Tableau 16: Consommation de biogaz par certains appareils[11, 12]

Utilisation	Besoin en Biogaz (PCI _{biogaz} compris entre 6000 et 7000 kcal/m ³)
Cuisson des aliments	<ul style="list-style-type: none"> • 0.22 à 0.45 Nm³/h/brûleur de 5 à 6 cm de diamètre • 0.25 Nm³/personne/jour (utilisation individuelle) • 0.15 Nm³/personne/jour (utilisation familiale)
Eclairage	<ul style="list-style-type: none"> • 0.1 Nm³/h/bec à incandescence • 0.04 Nm³/h/manchon (40W)
Réfrigérateurs	<ul style="list-style-type: none"> • 0.15 à 0.2 Nm³/h/100 l de capacité • 8 Nm³/dm² de paroi/jour
Moteurs	<ul style="list-style-type: none"> • 0.45 Nm³ / CV/h pour un moteur de rendement moyen de 25%
Couveuses	<ul style="list-style-type: none"> • 0.615Nm³ /h pour un appareil de 30 litres
Eau chaude	<ul style="list-style-type: none"> • Pour élever 100 litres d'eau de Δt $x = \frac{100 \times \Delta t}{6000} \text{ de biogaz } (\Delta t = t_{finale} - t_{depart} \text{ en } ^\circ\text{C})$ <p style="text-align: center;"><i>x = quantite du biogaz en Nm³</i></p>

Le volume de biogaz nécessaire pour ce ménage est calculé en tenant compte du tableau ci-dessus.

Consommation en cuisson : (0.15m³/personne)*15 personnes=2.25m³ de biogaz.

Chaque ménage aura donc besoin de $2.25m^3$ de biogaz par jour pour substituer sa consommation en bois. Nous considérons un besoin $2.5m^3$ dans notre dimensionnement.

3. Estimation du potentiel de production- substitution du bois

Le tableau ci-dessous donne des chiffres usuels sur les quantités de fumiers de quelques animaux.

Tableau 17: Production de biogaz de quelques plantes et animaux [11, 12]

Types des végétaux	Litre de biogaz par kg matière sèche		Kg de fumier humide/j/animal	Production m ³ de biogaz/j/animal
Pailles de riz	360	Bovidés	10	0,36
Tiges de maïs	295	Porc (50 kg)	2,25	0,18
Tiges de sorgho	278	Poule (2kg)	0,18	0,00112
Feuilles de betterave à sucre	500	Homme	0,4	0,028
Algues	320	Brebis	0,60	0,2 à 0,4
Gaines de coton	357	Lapin 0,7 a 2 kg	0,04	
Jacinthe d'eau	53,9	Cheval (450kg)	3	0,2 à 0,4
Herbes fourragères	175,0			
Fanes d'arachide	298			
Fanes de lentilles	292			

Pour augmenter le rendement de production de biogaz, nous proposons la combinaison (2/1) de deux doses tourteaux de Jatropha et une dose de tiges de maïs. Ces tiges seront broyées avant utilisation pour faciliter la digestion. A défaut des tiges de maïs, les tiges de sorgho ou les pailles de riz ou encore un mélange de toutes ces tiges pourront être utilisées. Dans ces conditions, le rapport C/N du mélange sera d'environ 30. Le rapport C/N de quelques plantes est présenté en annexe 8.

Production moyenne pour le mélange (Pm) :

$$\frac{0.295m^3 + 2 \times 0.02}{3} = 0.1675m^3 \approx 0.17m^3$$

Quantité d'intrant(Qi) :

$$Qi = \frac{\text{Demande journalière}}{Pm} = \frac{2.5}{0.17} \approx 15kg \text{ de mélange (10kg de tourteaux de Jatropha et 5kg de tiges de maïs)}$$

Demande annuelle en tourteau de Jatropha (TJ) et en tiges de maïs (Dt)

$$TJ = Qi \times 365 = 10kg \times 365 = 3650kg \text{ (3.6tonnes)}$$

$$Dt = 5kg \times 365 = 1825kg \text{ (1.8tonnes)}$$

Dans le contexte africain, les rendements de culture de Jatropha vont de 0.5 à 1.5tonnes/hectares et le pressage donne 45 à 75% de tourteau[9]. Nous considérons 1.5tonnes/hectares et 70% de tourteau comme rendement après pressage.

Surface nécessaire de culture de Jatropha (SJ) pour chaque ménage

$$Sj = \frac{DJ \times (1 + (1 - Rp))}{1.5} = \frac{3.65 \times (1 + (1 - 0.70))}{1.5} \approx 3.16 \text{hectares}$$

Surface nécessaire pour tout le village : 480 hectares

4. Protocole

On prendra une cuve de 0.5m³ (diamètre 100cm) et une autre cuve de 0.45m³ (diamètre 90cm) pour constituer le digesteur compact pour une production de 2.25m³ /jour pour les besoins du ménage.

Le digesteur est rempli à 2/3 de son volume de substrat composé de : 87kg du mélange tourteau+tiges ; 70% du substrat en eau soit 188l et ajouter de l'inoculât dont la masse représente 20% (17 kg) de celle de la matière sèche. Dans ces conditions, le petit réservoir renversé est partiellement immergé. Un support est posé dessus pour qu'il ne tombe pas quand commencera la production du biogaz. Il faudra attendre un temps de 2 semaines pour utiliser le biogaz produit[13]. Avant les deux semaines, le gaz est essentiellement composé de CO₂ et de vapeur d'eau. Après avoir vérifié que le gaz est combustible, 13 kg de mélange tourteau-tiges avec 20l d'eau sont ajoutés dans chaque digesteur. Cet ajout s'accompagne d'une sortie automatique de la même quantité de déchet déjà traité.

Broyage des tiges

Le broyage des tiges permet d'avoir des particules de taille plus petite et d'attaquer les fibres ligno-cellulosiques pour rendre la cellulose plus accessible aux bactéries. Comme la demande journalière en tige n'est pas assez importante, nous optons pour un broyage au pilon.

5. Epuration du biogaz

En plus du méthane, certains gaz comme le NH₃, le CO₂, le H₂S et la vapeur d'eau composent le biogaz et doivent être épuré avant utilisation. Il existe des techniques moins sophistiquées mais pas moins efficace d'épuration du biogaz qui sont :

- Les pièges à eau pour capter la vapeur contenue dans le biogaz

- La limaille de fer pour capter le H_2S . Elle se noircit lors de l'épuration et peut être régénérée à l'air.
- Le charbon de bois pour capter l'ammoniac (NH_3).
- La chaux pour capter le CO_2 . La consommation est d'environ 2.5kg de chaux vive par mètre cube (m^3) de CO_2 .

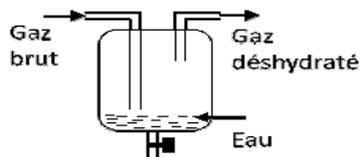


Figure 14: Piégeage à eau

Dans notre cas où le biogaz sera utilisé pour la cuisine dans les villages, nous choisissons des mesures simples d'épuration du biogaz. Nous avons décidé d'utiliser un piège à eau pour ne pas que l'eau bouche les conduites en se condensant. Un épurateur avec de la limaille de fer et du charbon de bois est prévu pour éliminer le H_2S et l'ammoniac car ces derniers sont responsables de nuisances olfactives. Nous n'avons pas besoin de système d'épuration de CO_2 dans l'utilisation du biogaz dans notre cas.

D'autres techniques d'épuration plus sophistiquées seront présentées en annexe 9.

6. Substitution du bois de feu dans un ménage

La consommation du bois en milieu rural au Burkina Faso est estimée à environ 0.91kg/personne.[14]

Dans ce cas, un ménage composé de 15 personnes va donc avoir une consommation journalière en bois de 14kg. Dans l'année ce ménage consommera 5110kg (5.1 tonnes) de bois.

7. Coût de l'installation pour le ménage

7.1 Estimation du prix des deux cuves (en plastique)

Les deux cuves ayant les mêmes caractéristiques, il n'y aura pas une grande différence dans les prix. Le prix de la cuve de $1m^3$ est de 25000FCFA sur le marché. Nous donnons le même prix à la petite cuve. Les deux cuves ont donc un prix de 50000CCFA. Les cuves ont une durée de vie de 15 ans en moyenne.

7.2 Estimation du prix du ballon de stockage

Nous prévoyons un ballon de stockage de 5m³ au cas où le biogaz ne sera pas utilisé continuellement. Il a un prix hors taxe de 35 dollars. Nous prenons 10% comme prix de transport et 18% comme TVA. Son prix global devient alors 22715FCFA.

7.3 Le brûleur

Il existe des brûleurs conçus uniquement pour le biogaz tel que celui fabriqué par le centre Songhaï au Benin. Le prix du brûleur est de 20000FCFA. La photo du brûleur est présentée en annexe 12.

7.4 Prix des autres équipements sont représentés dans ce tableau ci-dessous :

Tableau 18: Coût des autres équipements

Désignations	Quantité		Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)
Conduite PVC de diamètre 260mm	2	m	6000	12000
Mastic colle polyuréthane	1		7500	7500
Pistolet pour mastic	1		6000	6000
Vanne à pression DN25	4		2000	8000
Tuyau de pression DN25	4		1500	6000
Plombier				10000
Total				49500

❖ investissement total : 186090FCFA.

❖ Gain annuel (GA)

- Production du biogaz : 2.25m³/jour
- Production équivalente de bois : 9.3kg/jour
- Production annuelle de bois : 3395kg/an
- Prix du kg de bois : 25FCA/kg de bois (milieu rural)[15]
- Coût de la maintenance (CM) : investissement × 2% = 3722FCFA

$GA = \text{Production annuelle de bois} \times \text{Coût unitaire du kg du bois}$
 $- \text{Coût de la maintenance}$

$$GA = 3395 \text{ kg / an} \times 25 \text{ FCFA} - 3722 \text{ FCFA}$$

$$GA = 81153 \text{ FCFA}$$

❖ Temps de retour (Tr)

$$Tr = \text{Investissement} / \text{Gain annuel}$$

$$Tr = 186090 / 81153$$

$$Tr = 2.29 \approx 2 \text{ ans } 3 \text{ mois et } 14 \text{ jours}$$

❖ Valeur actuelle nette ou bénéfice cumulé actualisé

- Durée de vie estimée à 10 ans : $t=10$ ans
- Le taux d'actualisation de la valeur futur est estimé à 20% : $i=20\%$
- Valeur nette actualisée (VAN) :

$$VAN = -\text{investissement} + \text{gain annuel} \times \frac{1-(1+i)^{-10}}{i}$$

$$VAN = -186090 + 81153 * \frac{1-(1+0.2)^{-10}}{0.2}$$

$$VAN = 154142 \text{ FCFA}$$

La valeur actuelle nette est positive. Cela traduit la rentabilité financière de l'installation pour le coût du kg de bois de 25FCFA.

Conclusion partielle :

L'installation d'un dispositif de production de biogaz à partir des tourteaux de Jatropha pour un ménage ayant un champ de Jatropha est avantageuse. L'utilisation de cette ressource diminuera les dépenses en combustibles et permettra d'économiser de l'argent.

8. Analyse environnementale

Les unités de traitement des tourteaux de Jatropha par méthanisation présentent des impacts environnementaux. Ces unités recevant des déchets (substrats) occasionnent des odeurs. Il faudrait prendre toutes les dispositions pour éviter que ces odeurs nuisent à l'entourage. Dans notre cas, les digesteurs seront installés à au moins 10m des concessions et une fosse bien aérée est prévue pour le digestat.

Pour le calcul du bilan carbone, nous envisageons deux situations: La situation avant la valorisation des tourteaux et celle après sa valorisation.

8.1 Situation avant la valorisation des tourteaux de Jatropha : Utilisation du bois pour la cuisson des aliments

Très peu d'études ont été faites sur les quantités de CO₂ et de CH₄ dégagées lors de la décomposition aérobie non contrôlée des tourteaux de Jatropha. Nous n'avons donc pas eu d'informations fiables à ce sujet. L'utilisation du bois pour la cuisson des aliments avant la méthanisation engendre un dégagement de CO₂ (principal gaz à effet de serre) et d'autres substances olfactives comme les NO₂, les SO₂ lors de la combustion. Nous n'avons pas de moyens nécessaires pour déterminer avec exactitude ces quantités, mais nous allons procéder par calcul en supposant une combustion complète car elle se déroule à l'air libre. Les produits de combustion sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 19: Produits de combustion du bois

Eléments chimiques	Composition chimique(%)	Produit de la combustion	Quantités (kg) par kg de bois
Carbone	50	CO ₂	1.83
Oxygène	42		
Hydrogène	6		
Azote	1	NO ₂	0.03
Cendre			

Le principal gaz à effet de serre étant le CO₂, la combustion complète d'un kg de bois donne 1.83kg de CO₂. Sachant qu'un ménage consomme 5110kg de bois par an, la quantité de CO₂ correspondante est de **9351.3kg**.

8.2 Situation après méthanisation : Consommation du bois substituée

La quantité totale de CO₂ dégagée est la somme entre le CO₂ dégagé lors de la combustion du méthane ainsi que celui contenu dans le biogaz même. Annuellement un ménage produit 821m³ de biogaz et nous supposons une composition de 60% de CH₄ contre 30% de CO₂.

A la pression de 1atm et de température (T_1) de 273K, le méthane a une masse volumique (ρ_1) de 0.6582kg/m³. Nous calculons sa masse volumique (ρ_2) à la température (T_2) de 35°C et à la pression.

Par la relation des gaz parfaits, nous trouvons que : $\rho_2 = \rho_1 \times \frac{T_1}{T_2}$

$$\rho_2 \approx 0.58m^3/kg$$

Tableau 20: Produits de combustion du méthane

	Volume journalière de biogaz (m ³)	Masse volumique de biogaz (kg/m ³)	Masse journalière de biogaz (kg)	Masse journalière de méthane (kg)	Masse journalière de CO ₂ (kg)
Quantité	2.5	1.1	2.75	1.65	4.54

Dans ces conditions, la quantité de CO₂ dégagée annuellement lors de la combustion du méthane est 1656kg et celle existante dans le biogaz est de 402kg (2.75 *40%*365=402kg). Par valorisation des tourteaux de Jatropha, chaque ménage dégage 1656+402=**2058kg de CO₂**.

Quantité de CO₂ évitée par valorisation des tourteaux de Jatropha

Cette quantité est la différence entre la quantité de CO₂ dégagée dans la première situation et celle dégagée dans la seconde situation. Elle est de **7293.3kg de CO₂**.

Conclusion partielle :

Nous constatons que le kg de biogaz génère plus de CO₂ que le kg de bois, mais la consommation excessive du bois fait que la quantité de CO₂ dégagée par sa combustion devient plus élevée. Bien que le kg biogaz génère plus de CO₂ plus que le bois, la valorisation des tourteaux par méthanisation permet néanmoins d'éviter plus de CO₂ que l'utilisation du bois comme combustible dans la cuisson des aliments. Ceci est dû au fait que le rendement d'utilisation du biogaz est bien meilleur que celui de l'utilisation du bois. En effet dans les villages, le bois est utilisé généralement dans des foyers traditionnels à trois pierres et les pertes d'énergie sont énormes.

RECOMMANDATIONS

1. A l'endroit des utilisateurs : Mesures de sécurité

La mise en œuvre des installations de méthanisation comporte de grands risques nécessitant des mesures de prévention. Nous donnons quelques mesures ci-dessous :

- Formation et information du personnel sur les différents risques liés à la mise en œuvre des installations
- Placer le digesteur à 10m au moins des équipements de cuisine
- Evaluation de l'étanchéité du digesteur et des canalisations de biogaz avant la première utilisation
- Interdiction de l'usage de matériaux subissant la corrosion de la part des soufrés
- Mise en place de vannes de sécurité dans les canalisations en amont des parties d'installations destinées à la production, au stockage et au traitement du biogaz
- Interdiction de fumer aux alentours des installations.

2. A l'endroit des responsables du LBEB

- Autoriser une nouvelle étude sur la méthanisation des tourteaux de Jatropha car tous les paramètres n'ont pas été maîtrisés compte tenu du manque de temps.
- Prévoir de nouveaux matériels adaptés pour d'autres tests mais cette fois-ci au laboratoire afin de pouvoir maîtriser les paramètres autour de la méthanisation des tourteaux de Jatropha.

CONCLUSION

Ce projet réalisé au sein du LBEB au 2^{ie} nous a permis d'étudier un cas de méthanisation pour la production de biogaz à partir des tourteaux de Jatropha. En outre ce projet nous a permis de mettre en pratique toutes nos connaissances acquises jusqu'à présent dans le domaine de biomasse énergie.

Sur le plan scientifique, ce projet nous a permis de savoir que les tourteaux de Jatropha sont aussi de substances fermentescibles ; nous avons connu aussi les procédés qui les sont adaptés suivant les échelles de production de biogaz.

Sur le plan pratique, ce projet nous a aussi permis de connaître et de toucher du doigt les différents éléments entrant dans la réalisation d'une unité de production de biogaz. Il en ressort que la digestion sèche n'est pas adaptée pour les tourteaux de Jatropha, mais que ces tourteaux sont bien fermentescibles en digestion humide qui les dégrade à au moins 50% de leur matière organique. Notre expérience avec la digestion humide a donné une faible dégradation de la matière organique par rapport à ce qui a été vu dans la littérature pour plusieurs conditions qui n'étaient pas remplies, mais le constat général est que les tourteaux de Jatropha présentent un meilleur potentiel méthanogène que certaines substances comme les déchets de légumes.

La valorisation énergétique des tourteaux de Jatropha par méthanisation pour la production de biogaz à l'échelle artisanale est une technologie prometteuse qui satisfait des critères de moindre coût et d'économie d'argent. Cette technologie permet aussi d'éviter des émissions de gaz à effet de serre.

Bien que les tourteaux de Jatropha soient de substances fermentescibles vues les résultats observés dans nos expériences, des paramètres importants existent et restent à maîtriser. Il conviendra d'entreprendre des études dans ce sens afin de maîtriser ces paramètres et d'améliorer davantage le rendement de production de biogaz à partir de ces tourteaux.

BIBLIOGRAPHIE

1. KEMPENAIRE, X., *La valorisation de nos déchets par la biométhanisation: Réalisation d'une installation pilote de production de biogaz*. 2008-2009.
2. MOLETTA, R., ed. *La méthanisation*. 2008.
3. FAIM, S., *Les enjeux du Jatropha pour le monde rural africain*. 2009.
4. R. MOLETTA, F.C., *Méthanisation des déchets organiques*. 2003.
5. Nafisa Ali*, A.K.K.a.S.B., *Bio-methanisation of Jatropha curcas defatted waste*. 2010.
6. Kemaye, B., *ETUDE ET REALISATION D'UNE UNITE DE PRODUCTION D'ENERGIE A PARTIR DU BIOGAZ POUR USAGE DOMESTIQUE*. 2009.
7. RUTH STAUBMANN, G.F., NIKOLAUS FOIDL, GEORG M. GOSRRZ, ROSERr M. LAFFERrY, VICTORIA M. VALENCIA ARBIZU, AND WALTER STEINER, *Biogas Production from Jatropha curcas Press-Cake*. 1997.
8. Environnement, N. 2009.
9. BLIN Joël (Coordinateur, C.I., DABAT Marie-Hélène (Cirad), FAUGERE Garance (ICI), HANFF Elodie (2IE), WEISMAN Nathalie (2IE). *OPPORTUNITES DE DEVELOPPEMENT DES BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO*. 2008.
10. Darlu, J., *Analyse de faisabilité technique et économique des projets biocarburants en circuit court au Burkina Faso, étude du cas de Kinfangué, village au sud de Ouagadougou*. 2009.
11. Sacca LAFIA, C.K., Dr. Sakariyou MAHMAN, « *LE BIOGAZ : une contribution à la satisfaction des besoins énergétiques en milieu rural* ». 2006.
12. SONGHAI, C., ed. *Mise en place et exploitation d'une unité de biogaz*. 2001.
13. (ARTI), A.R.T.I. 2009.
14. Pierre Ozer, D.d.s.e.g.d.l.e., Université de Liège, Avenue de Longwy, 185, B-6700 Arlon, Belgique, *Bois de feu et déboisement au Sahel :mise au point*. 2004.
15. (PREDAS), P.R.D.P.D.E.D.E.A.A.S., *Erude de consommation de combustibles domestiques au BURKINA FASO*. 2004.

ANNEXES

Annexe 1 : Procédure d'extraction d'huile des solides

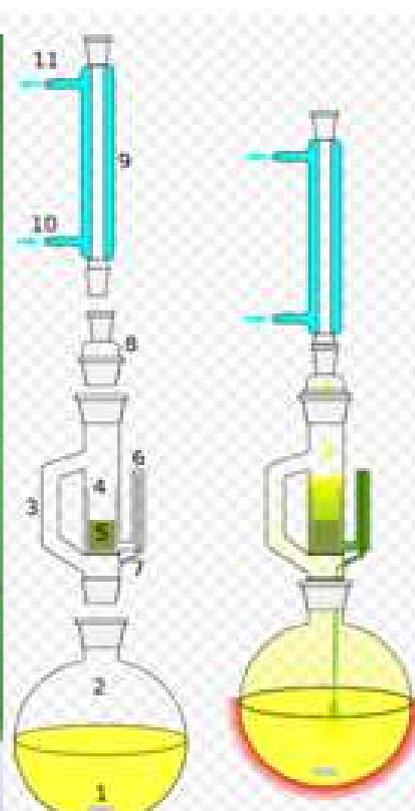
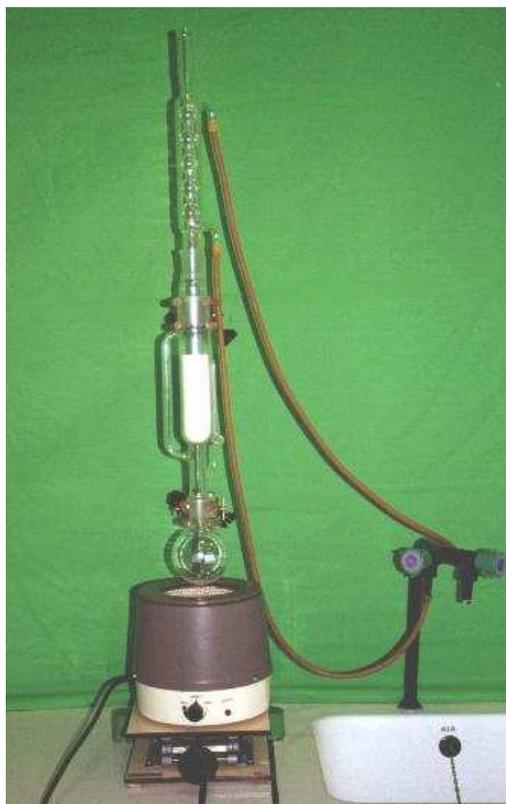
1. MATERIALS AND EQUIPMENT

- Soxhlet extractor
- Round bottom flask (still pot)
- Water cooled condenser
- Flask heater Mantle
- Rubber tubing
- Stand and clamps
- Electronic balance

2. REAGENTS AND PRODUCTS

- Extraction solvent (Hexane or petroleum ether)
- Solid material for extraction

3. SETUP



A SCHEMATIC REPRESENTATION OF A SOXHLET EXTRACTOR

- 1: Stirrer bar
- 2: Still pot (the still pot should not be overfilled and the volume of solvent in the still pot should be 3 to 4 times the volume of the Soxhlet chamber)
- 3: Distillation path
- 4: Thimble
- 5: Solid
- 6: Siphon top

4. MODUS OPERANDI

- Weigh and place the required quantity of the solid material containing the compound desired for extraction inside a thimble made from thick filter paper (preferably cellulose). After insuring that the material does not occupy more than half way up the thimble volume, get it loaded into the main chamber of the Soxhlet extractor.
- Fix the Soxhlet extractor onto a flask containing the extraction solvent, making sure the solvent is 3 to 4 times the volume of the Soxhlet extractor chamber. Add to the flask a magnetic stirrer or glass balls for homogeneous heating.
- Equip the Soxhlet with a condenser connected to adequate water supply for cooling.
- After insuring that all the connections are tight to prevent solvent loss, heat the solvent to reflux. The solvent vapour travels up a distillation arm, and floods the chamber housing the thimble of solid. The condenser ensures that any solvent vapour cools, and drips back down into the chamber housing the solid material.
- As the chamber containing the solid material slowly fills with warm solvent, some of the desired compound will then dissolve in the warm solvent. When the Soxhlet chamber is almost full, the chamber is automatically emptied by a siphon side arm, with the solvent running back down to the distillation flask. In order to realize a good extraction of the desired product, the cycle may be allowed to repeat many times, over hours or days.
- During each cycle, a portion of the non-volatile compound dissolves in the solvent. After many cycles the desired compound is concentrated in the distillation flask.
- After extraction, the solvent is removed typically by means of a rotary evaporator, yielding the extracted compound. The non-soluble portion of the extracted solid remains in the thimble, and is usually discarded.

5. Calculation of oil content (% by mass)

$$\text{Oil content} = \frac{M_{\text{oil}}}{M_{\text{sample}}} \times 100$$

The oil content is expressed as a percentage by mass of the initial sample, where:

M_{oil} : mass of extracted oil in grams (g)

M_{sample} : Mass of initial sample in grams (g)

Annexe 2 : masse des digesteurs

	2 ^{ème} expérience									
	masse									
Date	41	42	43	44	45	21	22	23	24	25
10/05/2011	7,78	8,13	8,87	9,4	9,8	8,5	7,97	9,11	9,83	9,9
11	7,823	8,126	8,876	9,708	9,591	8,21	7,925	9,051	9,81	9,75
12	7,806	8,118	8,873	9,69	9,088	10,093	7,907	9,06	9,792	10,228
13										
14										
15										
16	7,77	8,038	8,838	9,69		10,084	7,895	9,032	9,791	10,218
17										
18	7,765	8,00	8,793	9,664	9,032	10,048	7,890	9,00	9,788	10,219
19										
20										
21										

VALORISATION ENERGETIQUE DES TOURTEAUX DE JATROPHA PAR METHANISATION

22										
23										
24										
25										
26										
27	7,52	7,962	8.546	9.006	8,092		7,85	8,89	8,49	

Annexe 3 : Protocole d'analyse du biogaz



Photo de la Micro-GC

Annexe 4: Protocole d'analyse immédiate

Taux d'humidité

Définition

L'humidité est l'eau contenue dans le biocombustible solide qui est éliminée par chauffage à 105°C.

Principe de la manipulation

L'échantillon est séché à une température de 105°C et maintenu à cette température jusqu'à obtention d'une masse constante. La teneur en humidité est calculée à partir de la masse perdue de l'échantillon.

Manipulation

- a) Peser un cristalliseur en verre de 5cm de diamètre, vide (masse m_1)
- b) Transférer $1g \pm 0,1g$ d'échantillon dans le récipient
- c) Peser le récipient avec l'échantillon (masse m_2)
- d) Placer le récipient à l'étuve à 105°C et laisser sécher pendant 2h
- e) Peser le récipient chaud avec l'échantillon (masse m_3)

Résultats

Exprimer la teneur en humidité %H₂O en fonction des masses m_1 , m_2 et m_3 . Calculer sa valeur en pourcentage.

Taux de matières volatiles

Définition

La teneur en matières volatiles est déterminée par la perte de masse, déduite de celle provoquée par l'humidité, lorsque le biocombustible solide est chauffé sans contact avec l'air dans des conditions normalisées.

Principe de la manipulation

L'échantillon est chauffé à 900°C pendant 7min. Le pourcentage de matières volatiles est déterminé par la perte de masse de l'échantillon après avoir soustrait la masse due à l'humidité.

Manipulation

- a) Peser un creuset forme basse de 4 cm de diamètre muni d'un couvercle bien ajusté, tous deux en quartz translucide (masse m_4)
- b) Introduire, avec une répartition uniforme, $1g \pm 0,1g$ d'échantillon dans le creuset
- c) Peser le récipient avec l'échantillon (masse m_5) et le couvercle

- d) Poser le creuset chargé et recouvert sur un support froid et placer le dans le four. Fermer la porte et laisser pendant 7 min. Sortir, laisser refroidir sur la plaque isolante pendant 10 minutes, placer le creuset dans un dessiccateur et peser le (masse m_6).

Résultats

Exprimer le taux de matières volatiles par rapport à la matière fraîche ($\%MV_{MF}$) en fonction des masses m_4 , m_5 et m_6 . Par convention, ce taux est généralement exprimé par rapport à la matière sèche. Calculer le taux de matière volatile ($\%MV$) en pourcentage par rapport à la matière anhydre.

Taux de cendres

Définition

Les cendres sont les résidus provenant du biocombustible après avoir été brûlés à l'air.

Principe de la manipulation

L'échantillon est chauffé à l'air à un premier palier de 250°C puis à un second palier de 550°C. Il est maintenu à cette température jusqu'à obtention d'une masse constante.

Le pourcentage des cendres est calculé à partir de la masse du résidu après incinération.

Manipulation

- a) Peser un creuset en porcelaine bas de 3 cm de diamètre vide (masse m_7)
- b) étaler de manière uniforme $1g \pm 0,1g$ de l'échantillon dans le creuset
- c) Peser le creuset avec l'échantillon (masse m_8)
- d) Introduire le creuset découvert dans le four à mouffles à température ambiante. Porter la température à 250 °C en 50 min, et maintenir à cette température pendant 60 min.

Augmenter la température du four de 250 °C à 550 °C en 60 min et maintenir à cette température pendant 60 min.

- e) Sortir le creuset du four et le laisser refroidir sur une plaque isolante située à côté du four pendant 5 à 10 minutes. Le placer dans le dessiccateur.

Lorsqu'il est froid, peser le creuset. Noter la masse m_9 .

Résultats

Exprimer la teneur en cendre ($\%MM_{MF}$) de l'échantillon par rapport à la matière fraîche en fonction des masses m_7 , m_8 et m_9 . Exprimer puis calculer la teneur en cendre ($\%MM$) par rapport à la matière anhydre.

Taux de carbone fixe

Définition

Le carbone fixe est le carbone restant après élimination des matières volatiles et des cendres du biocombustible solide sec.

Résultats

Exprimer, par rapport à la matière anhydre, en fonction du taux de matières volatiles ($\%MV$) et du taux de cendres ($\%MM$), puis calculer le taux de carbone fixe ($\%CF$).

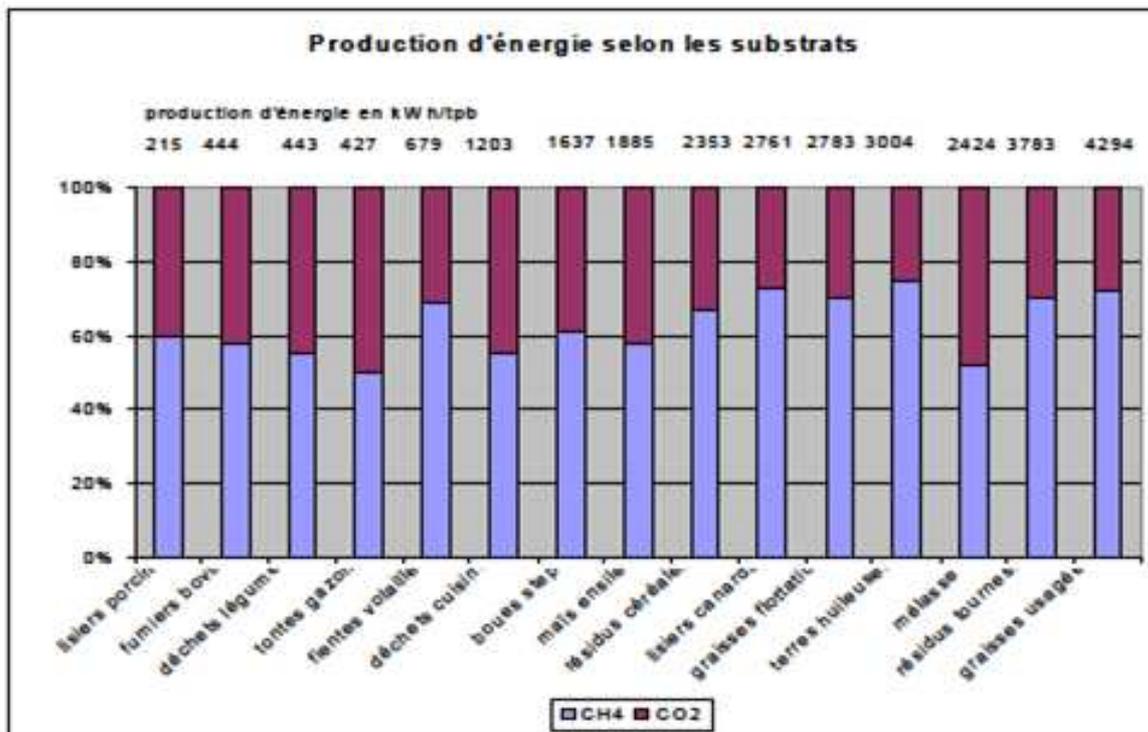
Annexe 5: Image d'un digesteur à sac remplis du digestat et du biogaz



Annexe 6 : Image d'un digesteur compact remplis de substrat et de biogaz



Annexe 7 : Comparaison de la composition du biogaz et du potentiel énergétique de différents substrats (source APESA, 2007)



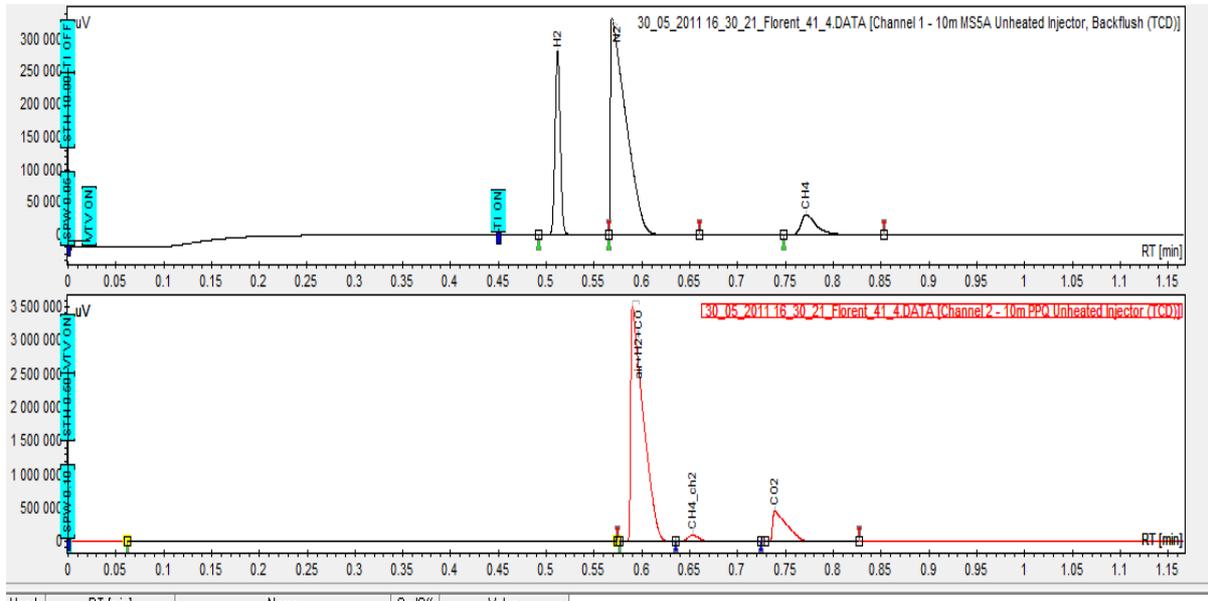
Annexe 8: Rapport C/N de quelques plantes et animaux

Substrats		Matières organiques (% M.S)	Carbone (%)	Azote (%)	C/N
Animal	Déjection de porc	80.7	38.3	2.8	13.7
	Bouse de vache	77	35.8	1.8	19.9
	Excrément de poulet	77.4	35.7	3.7	9.65
	Excrément de canard	23.6	21.9	0.8	27.4
	Excréments humains	90	47.7	7.1	6.72
Végétal	Cuisine	92	54.3	1.9	28.6
	Tige de maïs	92	43.9	1.2	56.6
	Pailles de riz	79	35.7	0.7	51
	Raffles de maïs	96	49.9	0.1	49.9
	Coque d'arachide	95,5	52.7	1.7	31
	Bagasse	95.5	-	0.4	-
	Jacinthe d'eau	77	33	2.9	11.4
	Coupes d'herbe	87	39.2	2.5	15.7

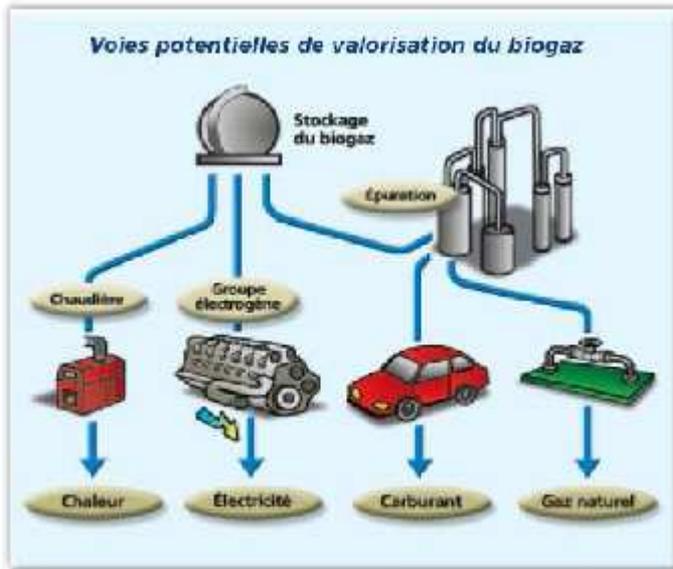
Annexe 9: D'autres techniques plus sophistiquées d'épuration du biogaz

Catégories	Techniques	Molécules retenues
Epuration par refroidissement	Condensation le long des conduites	H ₂ O, H ₂ S
	Séchage par refroidissement	H ₂ O, Autres polluants
	Réfrigération à -25°C	H ₂ O, Siloxanes, Composés halogénés, H ₂ S
Epuration par injection d'un composant	Injection de chlorure de fer	H ₂ S
Epuration par voie biologique	Ajout d'air ou d'oxygène	H ₂ S
	Filtre biologique	H ₂ S
Epuration par adsorption	Adsorption sur charbon actif ou au graphite	Siloxanes, Composés halogénés, H ₂ S
	Adsorption sur silicagel	H ₂ O, Siloxanes
	Adsorption sur tamis moléculaire	H ₂ O, Siloxanes, Composés halogénés, H ₂ S

Annexe 10 : Chromatographie



Annexe 11 : Les différentes voies de valorisation du biogaz (source GDF)



Annexe 12 : photo du brûleur (source : centre Songhaï Benin)

