

Contribution à une autonomisation énergétique en zone rurale : essai de production de biogaz en digesteur pilote 200 L

Mahamadi NIKIEMA^{1,2,*}, K. Marius SOMDA²,
Makumbu Joseph MAKAYA³, Assièta OUATTARA¹

Résumé

Au Burkina Faso l'accès à l'énergie est limité, les populations dans les zones rurales utilisent peu les combustibles modernes à des coûts élevés. Cette étude contribue à accroître l'autonomie énergétique et la sécurité des approvisionnements en énergie en fournissant des moyens de production locale. Une technique préconisée par le Programme National de Biodigester, 1 kg de déjection pour 1 litre d'eau a été utilisée dans un digesteur pilote en fût de 200 L. Le biogaz a été quantifié en estimant le volume de la chambre à air et la pression de l'espace gazeux. Les produits gazeux (CO₂ et CH₄) ont été analysés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse. L'abattement de la flore aérobie mésophile totale et des coliformes a été réalisé. Le bilan matière a été évalué à partir de l'abattement de matière organique. Un potentiel de 135,02 L Biogaz. Kg⁻¹ et 74,94 L CH₄. Kg⁻¹ de bouse bovine fraîche a été obtenu. Le biométhane augmente et atteint 80 L j⁻¹ après 3 jours de production. Le CO₂ diminue en dessous de 50 L j⁻¹ au cours de la digestion anaérobie. Le pourcentage de méthane atteint 80,79% au 8^{ème} jour. Des abattements de 1,1 log, 0,71 log et 0,1 log ont été constatés respectivement au niveau de la flore aérobie mésophile totale, des coliformes totaux et fécaux pouvant conduire à une hygiénisation des digestats. Le bilan matière montre un abattement de la matière sèche et la matière organique de 48,8% MS et 62,1% MSV, respectivement. Les proportions élevées en biométhane, un fort taux d'abattement en matière organique et microbien indiquent un système performant.

Mots clés : Bouse bovine, biodigester, Biométhane, autonomie énergétique

Contributing to energy self-sufficiency in rural areas: biogas production trial in a 200 L pilot digester

¹ Institut Supérieur du Développement Durable (ISDD), Université Yembila Abdoulaye Toguyeni, Fada N'Gourma, Fada N'Gourma, Burkina Faso

² Laboratoire de Microbiologie et Biotechnologies Microbiennes (LAMB), Centre de Recherche en Sciences Biologiques Alimentaires et Nutritionnelles (CRSBAN), Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou, Burkina Faso

³ Université Aube Nouvelle, Ouagadougou, Burkina Faso

*Corresponding author: Mahamadi NIKIEMA, mahamadiniikiema87@gmail.com

Abstract

In Burkina Faso, access to energy is limited, and people in rural areas make little use of modern fuels at high cost. This study contributes to increasing energy self-sufficiency and the security of energy supplies by providing means of local production. A technique recommended by the National Biodigester Programme (PNB-BF) 1 kg of dejection for 1 l of water was used in a pilot digester 200 l drum. The biogas was quantified by estimating the volume of the air chamber and the pressure of the gas space. The gaseous products (CO₂ and CH₄) were analysed using a gas chromatograph. Total aerobic mesophilic flora and coliforms were removed. The material balance was assessed on the basis of organic matter removal. A potential of 135.02 L Biogas. kg⁻¹ and 74.94 l CH₄. kg⁻¹ of fresh cattle dung was obtained. Biomethane increases and reaches 80 l d⁻¹ after 3 days of production. CO₂ decreases below 50 l d⁻¹ during anaerobic digestion. The methane percentage reached 80.79% on day 8. Reductions of 1.1 log, 0.71 log and 0.1 log were observed in total aerobic mesophilic flora, total coliforms and faecal coliforms respectively, which may lead to hygienisation of the digestate. The material balance shows a dry matter and organic matter removal of 48.8% MS and 62.1% MSV, respectively. The high biomethane content and high organic matter and microbial removal rates indicate a high-performance system.

Keywords: Cow dung, biodigester, biomethane, energy self-sufficiency, rural areas

Introduction

À l'image des autres pays de l'espace UEMOA, au Burkina Faso l'accès aux énergies renouvelables est limité, les populations utilisent peu les combustibles modernes à des coûts élevés, 74% de l'énergie est assurée par la biomasse (bois de chauffe, charbon de bois), 22% pour les hydrocarbures et 4% pour l'électricité selon l'atlas de l'énergie dans l'espace UEMOA (2018) (CHITOU et GBANDEY, 2020). Ce qui entraîne une pression sur l'environnement : dégradation des sols et l'avancement rapide du désert aggravé par les effets des changements climatiques. La recherche de nouvelles sources d'énergie s'impose, trouver une source d'énergie locale, renouvelable, accessible dans les zones rurales. La technologie du biogaz pourrait contribuer à accroître l'autonomie énergétique et la sécurité des approvisionnements en énergie en fournissant des moyens de production locale (HESS, 2007).

L'Afrique n'est pas restée en marge de cette technologie à l'avenir prometteur. MSHANDETE AND PARAWIRA (2009) ont rapporté la possibilité d'utiliser les déchets d'agriculture, de l'élevage et les eaux usées dans la production de biogaz dans les pays de l'Afrique subsaharienne. IGOUD et al. (2002) dans leur première approche de la

caractérisation du biogaz produit à partir des déjections bovines en Algérie, ont expérimenté un digesteur de capacité 800 litres qui a permis de produire 26,898 m³ de biogaz à partir de 440 Kg de bouses de vaches durant 77 jours avec une composition moyenne du biogaz de 61% de méthane. En Guinée, KOULEMOU et al. (2022) ont trouvé des productions de 0,000237 m³/ jour de biogaz à partir de la digestion anaérobie de 2 Kg de crottes de porc.

Dans certains pays d'Afrique comme le Sénégal, le Rwanda, le Cameroun, l'Afrique du Sud un réseau de captage du gaz sur des décharges est mise en place afin de collecter le biogaz qui après épuration va servir à la production d'électricité. Au Nigéria, des micro-projets de biogaz à partir d'ordures ménagères satisfont aux besoins énergétiques de villages. Au Nord Sénégal, dans la zone du Ferlo, des "biodigesteurs familiaux" de 10 m³ alimentés par les déjections animales sont testés pour la production de biogaz (ONAS, 2013).

Au Burkina Faso, les premiers travaux de méthanisation ont débuté en 1976 grâce au soutien du Comité Interafricain d'Études Hydrauliques (CIEH), de l'Institut de Recherche Agronomique Tropicale (IRAT) avec le Commissariat à l'Énergie Solaire (COMES) dans le cadre d'un programme expérimental sur la valorisation des déchets organiques pour la production de composte et de biogaz (HEDUIT, 1993). À partir de 1980, l'AIDR a financé trois (3) installations de production de biogaz à Kongoussi et Ouagadougou. L'Institut burkinabé de l'énergie (IBE) actuel IRSAT en collaboration avec la GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) ont construit des biodigesteurs continus et discontinus dans le Houet à Bobo Dioulasso, Boromo, Koudougou (WANTO AND HANNE, 1985). Des exemples d'application du biogaz à l'issue de ces installations ont été l'éclairage des établissements d'enseignement comme le Collège d'Enseignement Général (CEG) de Boromo, la cuisson d'aliments à l'École d'Agriculture de Farakobâ, la réfrigération des produits pharmaceutiques, stérilisation des seringues et pompage de l'eau à l'Hôpital de Kongoussi et enfin pour le maraichage au lac de Bam. La plupart de ces installations ne fonctionne plus à cause d'une insuffisance en maintenance et suivi, une indisponibilité en matière première surtout l'eau et la fiabilité du matériel alimenté au biogaz (WANTO AND HANNE, 1985). Avec les efforts d'information et de sensibilisation menés par le gouvernement avec l'appui des partenaires techniques et financiers, une politique nationale de développement des biocarburants et un programme national de valorisation du biogaz ont

vu le jour. En effet, en 2007 une étude de faisabilité a été réalisée par la GTZ, en collaboration avec l'IRSAT pour l'implantation du Programme National Biogaz Domestique au Burkina Faso, dans le cadre de l'Initiative africaine sur le biogaz.

Le Programme National de Biogaz du Burkina Faso (PNB-BF) lancé en 2009, a accompagné la construction d'environ 12000 biodigesteurs familiaux en milieu rural permettant aux ménages de satisfaire une grande partie de leurs besoins en énergie pour la cuisine et pour l'éclairage (Conférence 02-04 Octobre 2018 du PNB-BF). Selon ADEOSSI (2013), les proportions en biométhane (48,41 à 54,5%) dans le biogaz sont largement en deçà des prévisions de la SNV (Organisation Néerlandaise de Développement) qui est de 70% dans ces biodigesteurs.

Du côté de la recherche des avancées sont notables, l'IRSAT a mise en place des réchauds pour la cuisson et des lampes pour l'éclairage tous adaptés au biogaz, le 2iE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement/ Ouagadougou) et le CRSBAN (Centre de Recherche en Sciences biologiques Alimentaires et Nutritionnelles) ont abouti à de meilleurs résultats dans la diversification des sources potentielles de production de biogaz et contribuer à l'assainissement de l'environnement (MILAITI et al., 2003; GUNASEELAN, 2009; TRAORE *et al.*, 2017 ; NIKIEMA et al., 2022, 2024). Les biodigesteurs installés par le PNB-BF au profit des ménages utilisent comme matières premières les déjections animales. Malgré la subvention des digesteurs du Programme national (PNB-BF) par l'Etat Burkina, le coût de réalisation reste souvent inaccessible pour les ménages vulnérables. Également, le chargement Journalier environ 40 kg/j avec souvent des rendements faibles 48,41 à 54,5% de CH₄ (ADEOSSI, 2013). Dans son étude dans la région de la Boucle du Mouhoun, OUEDRAOGO (2016) a présenté 1753 unités en 2015 de biodigesteurs construits par le Programme National de Biodigester - Burkina Faso (PNB-BF). Sur les biodigesteurs installés 32% sont fonctionnels et 68% sont déclarés non fonctionnels à l'issue de l'enquête. L'objectif de l'étude est de développer des mini digesteurs en fût, facile d'entretien et d'utilisation en zone rurale avec un rendement optimal en biométhane. Plus spécifiquement il s'agit de (i) mettre en marche une installation de digester pilote de capacité 200 L (ii) déterminer le potentiel de production continue de biogaz de la bouse bovine comme substrat (iii) évaluer l'efficacité d'abattement microbien et en matière organique.

I. Matériel et Méthodes

I.1. Installation du digesteur pilote de 200 L

Calcul des volumes réactionnels (V_r), espace gazeux (V_e)

La figure 1 présente le schéma du dispositif expérimental de production de biogaz. Le dispositif comprend trois parties interconnectées par des tuyaux en plastique. La partie 1 comprend le fût de 200 L en plastique servant de biodigesteur pour la production de biogaz. Ce fût présente une entrée de substrat vers le haut, deux sorties d'un des côtés dont une pour le digestat et l'autre pour la vidange. La partie 2 comporte une chambre à air pour le stockage du biogaz. Et enfin, la partie 3 est composée d'un brûleur pour le brûlage du biogaz après les tests. Les différentes formules ci-dessous présentent les calculs de détermination de volume :

$$V_1 = \pi \times r_1^2 \times h_1 \quad (1)$$
$$= 3,14 \times (28)^2 \times 0,93 = 228,94 \text{ dm}^3$$

$$V_2 = \pi \times r_2^2 \times h_2 \quad (2)$$
$$= 3,14 \times (17,5)^2 \times 0,07 = 6,73 \text{ dm}^3$$

$$V_t = V_1 + V_2 \quad (3)$$
$$= 235,67 \text{ dm}^3$$

$$V_r = \pi \times r^2 \times h_3 \quad (4)$$
$$= 3,14 \times (28)^2 \times 0,70 = 172,32 \text{ dm}^3$$

$$V_e = \pi \times r^2 \times h_4 \quad (5)$$
$$= 3,14 \times (28)^2 \times 0,30 + 3,14 \times (17,5)^2 \times 0,07$$
$$= 63,35 \text{ dm}^3$$

Avec $h_1 = 0,07 \text{ m}$

$$h_2 = 1 \text{ m}$$

r_1 = rayon de la partie supérieure du digesteur

r_2 = rayon de la partie inférieure du digesteur

V_1 = volume en haut du digesteur

V_2 = volume de la partie uniforme du digesteur

V_t = volume total du biodigesteur

V_u = volume utile

V_e = volume de l'espace gazeux

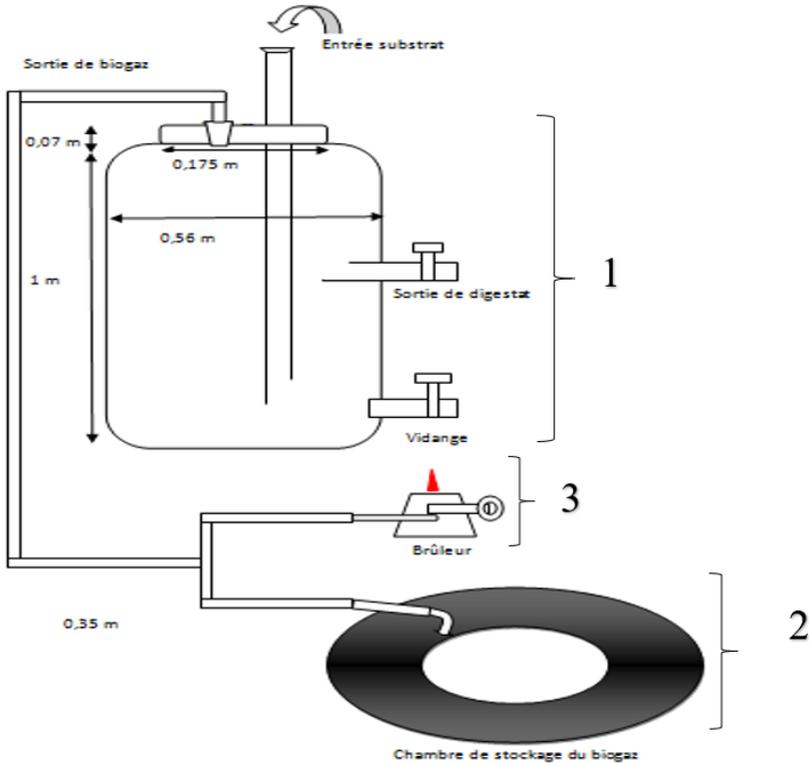


Figure 1 : Schéma de l'installation de l'unité pilote de production de biogaz

I.2. Démarrage de la production de biogaz à partir de la bouse bovine

La technique utilisée par le Programme National de Biodigesteur du Burkina Faso (PNB-BF) pour l'alimentation des digesteurs a été utilisée. Cette technique préconise une masse de 1 kg de déjection pour 1 kg ou 1 litre d'eau. Une quantité de 40,3 Kg de bouse bovine a été mélangée avec un volume de 40,3 L d'eau. Le mélange a été placé dans le digesteur, fermé hermétiquement à l'aide de la colle adhésive PANDA (Figure 2).



Figure 2 : Images montrant (1) Biodigesteur (2) Chambre de stockage du biogaz (3) Brûleur

I.3. Détermination du potentiel de production continue de biogaz de la bouse bovine en utilisant le digesteur pilote

Une quantité de 10 Kg de bouse bovine a été mélangée avec 10 L d'eau. Après l'arrêt de la production, le nouveau substrat a été introduit dans le digesteur. La production a été suivie jusqu'à épuisement du substrat afin de déterminer le potentiel de production de biogaz de la bouse. Le volume du biogaz (V_{biogaz}) a été estimé à chaque fois que la chambre à air est pleine en utilisant la formule 1. Le volume de biogaz produit (V_{biogaz}) est calculé à partir de la mesure de la pression relative (ΔP) et du volume mort (V_{chambre}) (PEREZ FADBIEL, 2006). En négligeant l'influence de la température, le volume du biogaz (V_{biogaz}) a été estimé à chaque fois que la chambre à air est pleine en utilisant la formule 6.

$$V_{\text{biogaz}} = V_{\text{chambre}} \times \Delta P \quad (6)$$

avec V_{chambre} = volume de la chambre à air et ΔP = pression atmosphérique relative du biogaz de la chambre à air

La section du tore représentant la chambre à aire est un cercle de rayon r (figure 2). Le volume de la chambre à aire a été calculé en utilisant la formule 2.

$$V_{\text{tore}} = 2\pi^2 \times r^2 \times R \quad (7)$$

Avec r = petit rayon du tore (15 cm) ; R = grand rayon du tore (38 cm)
 r et R sont indiqués sur la figure 2 et déterminés par mesure à l'aide d'une règle graduée. Le calcul donne un volume de la chambre à air de 168,6 L, dans les Conditions Normales de Température et de Pression (CNTP, $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $p = 1013\text{ mbar} = 1\text{ atm}$).

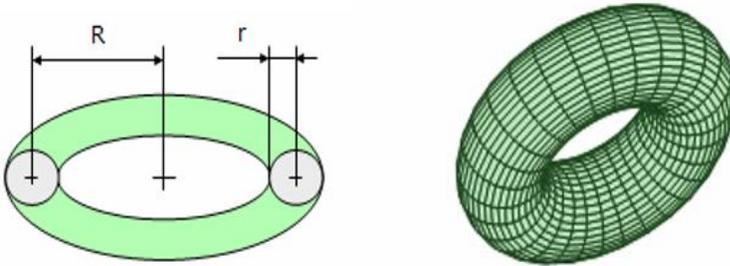


Figure 3 : Schéma d'un tore

Source : https://www.editions-petiteelisabeth.fr/calculs_aire_volumetore.php
 (Consulté le 12/10/2020)

Les produits gazeux (CO_2 et CH_4) ont été analysés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse (Girdel série 30 à catharomètre muni d'un détecteur à conductivité thermique [TCD] équipé d'un enregistreur potentiométrique SERVOTRACE type Sefram Paris de 1mV) selon les conditions décrites par NIKIEMA *et al.* (2015).

I.4. Calcul des abattements microbiens et en matière organique

Un calcul de l'abattement des différents micro-organismes étudiés a été effectué pour connaître l'effet hygiénisant de la méthanisation. L'abattement au cours du temps des pathogènes est défini par le logarithme de la concentration à un temps t divisé par la concentration au temps initial ($\text{Log}(C/C_0)$). La formule suivante a été utilisée pour les calculs de dénombrement :

$$N = \frac{\sum c}{(n_1 + 0,1n_2)Vi d} \quad (8)$$

N = Nombre d'UFC/ml

$\sum C$ = Somme des colonies

n_1 = nombre de boites à la dilution 1

n_2 = nombre de boites à la dilution 2

V_i = Volume inoculé

d = dilution 1

La matière organique a été déterminée selon la norme NF U44 160 (1985). La perte de masse par calcination au four à 500 °C pendant 4h a permis de déterminer la matière sèche volatile équivalente à la matière organique.

II. Résultats et discussion

Détermination du potentiel biométhanogène de la bouse bovine

Les résultats de la détermination du potentiel biométhanogène sont présentés dans le tableau I. Le potentiel méthanogène est le volume de méthane produit lors de la dégradation de l'échantillon de bouse bovine, rapporté à la quantité de matière organique initialement présente dans l'échantillon utilisé pour le test. Un potentiel de 125,92 l Biogaz. kg⁻¹ de bouse bovine et 74,94 l CH₄. kg⁻¹ de bouse bovine. Nos résultats étaient supérieurs à ceux de ABOUBAKAR *et al.* (2016) qui ont trouvé une production brute de 100 l. biogaz kg⁻¹ de bouse bovine (figure 23). D'autres auteurs ont trouvé des valeurs supérieures. En effet, HANSEN *et al.* (2004) ont rapporté que la quantité de biogaz produite avec différents types de substrat organique variait de 200 à 500 l. (kg MS)⁻¹ pour un temps de rétention qui fluctue entre 10 et 50 jours. LACOUR (2012) a obtenu dans le cadre de la co-digestion de la bagasse de canne à sucre et la bouse bovine, 334 ; 443 et 471 l CH₄. (kg MS)⁻¹ à l'issue de 3 ajouts successifs. Ces valeurs étaient l'ordre de 315 ; 420 et 360 l CH₄. (kg MS)⁻¹ de fiente de poulet. ELIJAH *et al.* (2009) ont trouvé un rendement expérimental inférieur de 10,78 l Biogaz. (kg MS)⁻¹ avec 50% de bouse de vache et 50% de coque de riz. La différence de production de biogaz pourrait s'expliquer par les conditions de production, la qualité de la matière organique ainsi que la qualité du substrat de co-digestion. En effet, les conditions de mélange des substrats peuvent impacter significativement les performances du digesteur (GIRAULT *et al.* 2013). POUAN (2011) a trouvé une production de 50 l Biogaz. (kg MS)⁻¹ pour les tourteaux de *Jatropha curcus*, et a montré que cette production pourrait atteindre 206 l Biogaz. (kg MS)⁻¹ en codigestion avec le fumier de bétail. SINGH *et al.* (2008) ont obtenus un rendement de biométhane de 333 l. (kg MS)⁻¹ de coques de graine de *Jatropha curcus* en codigestion avec les déjections bovines. CASTAING *et al.* (2002) ont rapporté des productivités élevées pour les lisiers de porcs et les déchets agro-industriels, entre 250 et 330 Nm³CH₄/t MSV. Traoré (2018) a rapporté des rendements de méthane de 444,8 l CH₄ (kg MS)⁻¹ pour les déchets de mangue,

224,35 l CH₄. (kg MS)⁻¹ MS pour les résidus de légume. Le biométhane augmente et atteint 80L j⁻¹ après 3 jours de production. Le CO₂ diminue en dessous de 50 l au cours de la digestion anaérobie. Le pourcentage de méthane atteint 80,79% au 8^{ème} jour (figure 3). Ces proportions sont supérieures à celles trouvées par Adeossi (2013), 48,41 à 54,5% de CH₄ dans le biogaz des digesteurs du PNB-NF. Selon KUSMIYATI et al. (2023) la matière première, le pH, le rapport C/N et les types de digesteurs sont autant de paramètres qui permettent une production optimale de biogaz.

Tableau I: Potentiel biométhanogène de la bouse bovine

Temps (jours)	Volume du tore (l)	Pression atm	Volume biogaz (l)	Volume CH ₄ (l)
1	168,77	0,98	165,39	83,15
2	168,77	0,98	165,39	66,04
3	168,77	0,98	165,39	72,34
4	168,77	0,98	165,39	90,27
5	168,77	0,98	165,39	90,27
6	168,77	0,98	165,39	88,37
7	168,77	0,85	165,39	136,36
8	168,77	0,79	133,33	122,58
Total			1259,02	749,39
			125,90±14,84	74,94 ±24,02
PBM (l. kg⁻¹ de bouse bovine)				

PMB= Potentiel Biométhanogène

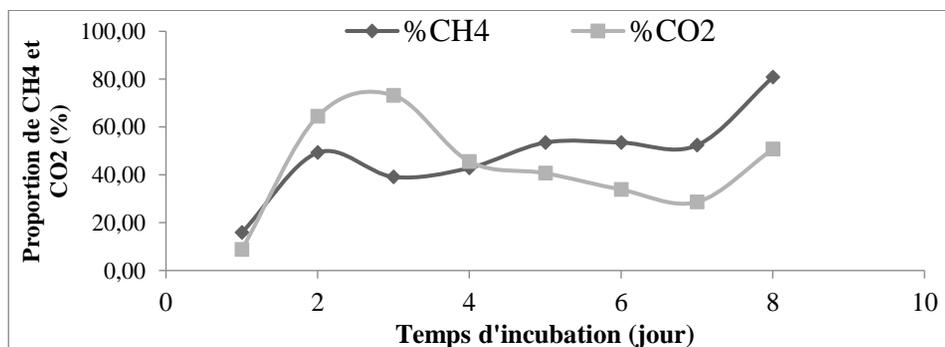


Figure 4 : Evolution de la production journalière de CH₄ et CO₂ dans le biogaz

Les taux d'abattement des microorganismes, flore aérobie mésophile totale, coliforme totaux et thermotolérant sont présentés dans le tableau II. Des abattements de 1,1 log, 0,71 log et 0,1 log ont été constatés

respectivement au niveau de la flore aérobie mésophile totale, des coliformes fécaux. Le bilan matière est présenté dans la figure 5B montre un abattement de 48,8% MS et 62,1% MSV. Castaing et al. (2002) ont révélé un taux d'abattement croissant de la matière sèche de l'effluent introduit, de 52,2% pour les lisiers seuls à 66,1% pour la phase de codigestion lisier plus déchet avec un abattement de 66% de la matière organique. Selon le même auteur, après méthanisation, l'effluent présente des siccités plus faibles car il y a biodégradation de matière sans élimination de volume d'eau.

Quant à l'abattement de la charge microbienne, des résultats similaires ont été trouvés par DELMON (2018) en montrant des propriétés hygiénisantes de la méthanisation. Des meilleurs abattements ont été trouvés par DELMON (2018) en ce qui concerne *E. coli* (2 log) et Streptocoques (2,2 log) dans le digestat qui font partie des coliformes. PAAVOLA AND RINTALA (2008) ont trouvé un abattement des coliformes de 1 à 3 log en mésophilie et 1 à 4 log en thermophilie. Nos rendements d'abattement trouvés sont inférieurs, cela pourrait s'expliquer par l'efficacité du méthaniseur et le temps de rétention du substrat. Quant aux bactéries capables de sporuler comme *Clostridium perfringens* ces mêmes auteurs n'ont trouvé aucun effet. Selon PAAVOLA et RINTALA (2008), le traitement de digestion anaérobie en voie thermophile présente une réduction jusqu'à 5 log pour les entérobactéries, streptocoques et coliformes. WATCHARASUKARN et KAPARAJU (2009) a rapporté que la réduction est beaucoup plus rapide en thermophilie, le temps pour réduire 90% de la population bactérienne n'est que de quelques jours alors qu'il peut aller jusqu'à plusieurs mois en mésophilie.

Tableau II: Nombre de microorganismes au cours de la digestion anaérobie

Echantillon	Microorganismes UFC/mL		
	FAMT	CTh	CT
BB	3,10E+10 (±7,07E+09)	2,05E+09 (±7,07E+07)	5,00E+09 (±7,07E+08)
DB	7,50E+09 (±7,07E+08)	1,49E+08(±1,41E+07)	3,65E+09(±7,07E+07)

BB : Bouse bovine ; DBD : Digestat du Biodigesteur ; FAMT : Flore aérobie mésophile totale ; CT : Coliformes totaux ; CF: Coliformes Fécaux

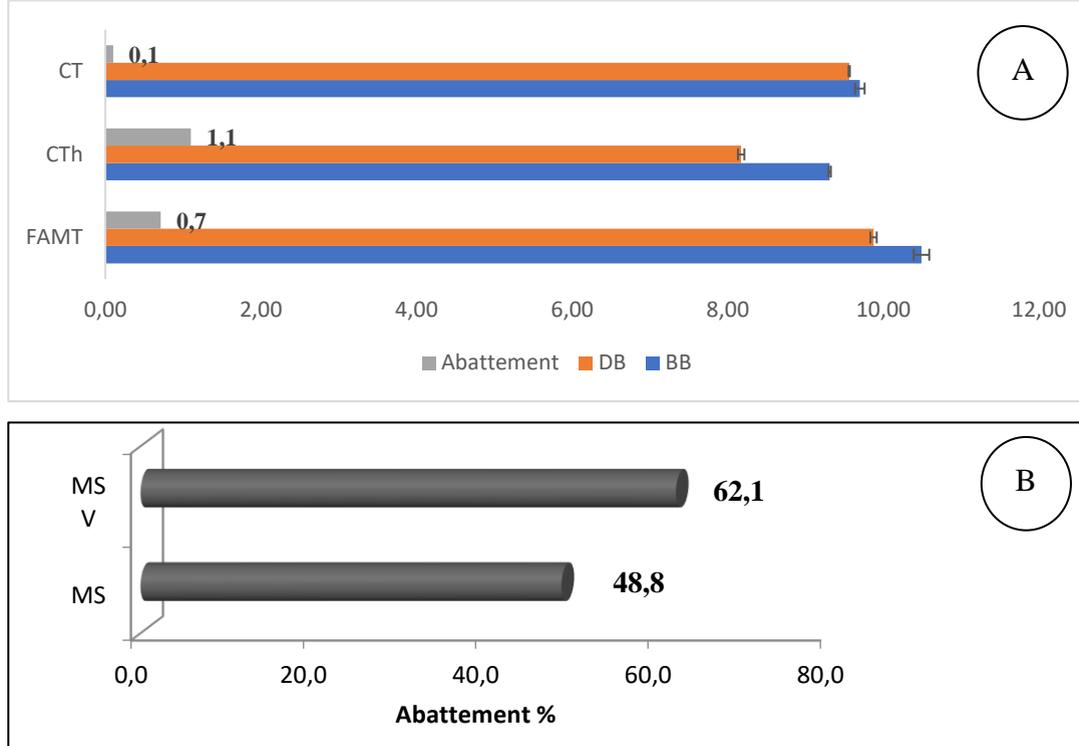


Figure 5: Abattement au cours de la digestion anaérobie: A) abattement des microorganismes, A) abattement en MSV et MS
 BB : Bouse bovine ; DBD : Digestat du Biodigesteur ; FAMT : Flore aérobie mésophile totale ; CT : Coliformes totaux ; CTh : Coliformes Thermotolérant ; MSV : Matière sèche volatile ; MS : Matière sèche

Conclusion

Le digesteur pilote mise en place a permis un potentiel de 135,02 L Biogaz. Kg⁻¹ et 74,94 L CH₄. Kg⁻¹ de bouse bovine fraîche. La production de biogaz atteint 168,77 L j⁻¹ avec des proportions de biométhane évoluant de 50 à 80%. Les proportions élevées en biométhane et le fort taux d'abattement en matière organique indiquent un système performant dans l'autonomisation énergétique et une possibilité de valorisation agronomique du digestat assaini. Il serait intéressant de prospecter la possibilité de transformation du biogaz en électricité à fin d'optimiser l'efficacité énergétique de l'installation.

Références bibliographiques

ABOUBAKAR Z., BOLI C. AND MBOFUNG M. F., 2016. "Etude Du Potentiel Biogaz Des Déjections Animales : Bouses de Bovins et Fientes de Volailles d ' Un Centre Zootechnique à Maroua - Cameroun." *Revue Des Energies Renouvelables* 19(3):447–64.

ADEOSI F. G. F., 2013. Caractérisation Du Biogaz Produit a Partir Des Substrats Bovins et Porcins Dans La Région Du Centre Du Burkina Faso. Master en Ingénierie de l'eau et de l'environnement option Energie et procédés Industriels, Fondation 2iE. 56 p.

CHITOU S. M., AND GBATY T. G., 2020. *Atlas de l'énergie Dans l'espace UEMOA*.

CASTAING J., POUECH P., AND COUDURE AD., 2002. Digestion Anaérobie de Lisiers de Porcs En Mélange Avec Des Déchets Agro-Industriels. pp. 195–202 in *Journées de la Recherche Porcine*.

DELMON C., 2018. Optimisation d'un Pré-Traitement Thermique En Vue d'améliorer l'abattement Des Bactéries Pathogènes Au Cours de La Méthanisation. Thèse de docteur en Pharmacie, Université de Limoges, Belgique. 78 p.

ELIJAH T., IYAGBA A., MANGIBO I., AND YAHAYA S.M., 2009. "The Study of Cow Dung as Co-Substrate with Rice Husk in Biogas Production." *Full Length Research Paper* 4(9):861–66.

GIRAULT R., PEU P., BELINE F., LENDORMI T., AND GUILLAUME S., 2013. "Caractéristiques Des Substrats et Interactions Dans Les Filières de Co-Digestion : Cas Particulier Des Co-Substrats d'origine Agro-Industrielle." Pp. 44–53 in *Sciences Eaux & Territoires*. Vol. Numéro 12.

GUNASEELAN N., 2009. Biomass Estimates, Characteristics, Biochemical Methane Potential, Kinetics and Energy Flow from *Jatropha Curcus* on Dry Lands. *Biomass and Bioenergy* 33(4):589–96.

HANSEN TRINE L., EJBYE J., ANGELIDAKI I., MARCA EMILIA, COUR JANSEN, HANS MOSBÆK, AND THOMAS H. CHRISTENSEN. 2004. “Method for Determination of Methane Potentials of Solid Organic Waste.” *Waste Management* 24:393–400.

HEDUIT M.; 1993. La Filière Biogaz Dans Les Pays En Développement. Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français, d Edité par Publications du Québec. Quebec, Canada. 82 p.

HESS J., 2007. Modélisation de La Qualité Du Biogaz Produit Par Un Fermenteur Méthanogène et Stratégie de Régulation En Vue de Sa Valorisation. Thèse de doctorat, Université de Nice - Sophia Antipolis. 229 p.

IGOUD S., TOU I., KEHAL S., AND TOUZI N. M. A., 2002. “Première Approche de La Caractérisation Du Biogaz Produit à Partir Des Déjections Bovines.” 5:123–28.

KIVAIISI K., AND ELIAPENDA S., 1995. Application of Rumen Microorganisms for Enhanced Anaerobic Degradation of Bagasse and Maize Bran. *Biomass and Bioenergy* 8(1):45–50.

KOULEMOU M., LAMAH S. P., BAH L., AND DIABY I., 2022. “Essai de Production Du Bioga à Partir Des Crottes de Porcs Dans Le Quartier Nakoyapala Commune Urbaine de N’Zérékoré, République de Guinée.” *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 40:111–23.

LACOUR J., 2012. Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti. Mémoire de Thèse de doctorat, Université Quisqueya, Haïti. 217p.

MILAITI M., 1998. Etudes de Quelques Paramètres Physico-Chimiques Affectant La Fermentation Méthanique de *Calotropis Procera*. Mémoire de DEA, Université de Ouagadougou, Burkina Faso 103 p.

MILAITI, M., TRAORE A. S. AND MOLETTA R., 2003. “Essais de Fermentation à Partir de *Calotropis Procera* Production de CH₄ En Fonction de La Charge En Substrat et En Fonction de La Température.” *Science et Médecine* 02(CAMES-Série A):73–78.

MSHANDETE A.I., AND PARAWIRA W., 2009. Biogas Technology Research in Selected Sub-Saharan African Countries – A Review. *African Journal of Biotechnology* 8(2):116–25.

NIKIEMA M., SAWADOGO J.B., SOMDA K.M., TRAORE D., AND DIANOU D., 2015. Optimisation de La Production de Biométhane à Partir Des Déchets Organiques Municipaux Optimization of Biomethane Production from Municipal Solid Organic Wastes. *Internationnal Journal of Biological and Chemical Sciences* 9(5):2743–56.

NIKIEMA M., SOMDA K. M., SAWADOGO B. J., BAMBARA S., BARSAN M., MAIGA Y., OULI S.A, COMPAORE C. O.T., MOGMENGA M., DIANOU D., TRAORE A. S., OUATTARA C. A. T., AND OUATTARA A. S., 2024. “Optimization for Improved Biomethane Yield from Cashew Nut Hulls through Response Surface Methodology.” *Biomass Conversion and Biorefinery* (0123456789):1–12.

ONAS. 2013. Etude d'établissement d'une Base de Référence Pour Le Projet Biogaz. Dakar.

OUEDRAOGO B. I. S., 2016. “Adoption de La Technologie Du Biodigesteur Pour La Production de Biométhane Dans La Région de La Boucle Du Mouhoun Au Burkina Faso.” Université Laval, Québec, Canada.

PAAVOLA T., AND RINTALA J., 2008. Effects of Storage on Characteristics and Hygienic Quality of Digestates from Four Co-Digestion Concepts of Manure and Biowaste. *Bioresource Technology* 99:7041–50.

PEREZ F. S., 2006. “Etude de La Biodégradabilité de Boues Secondaires Soumises à Un Traitement Thermique à 65°C et Du Couplage Digestion Anaérobie et Digestion Thermophile Aérobie Pour La Réduction de Boues.”_Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France. p213

POUAN F., 2011. Valorisation Energétique Des Tourteaux de Jatropha Par Méthanisation. Master en Ingénierie de l'eau et de l'environnement option Energie et procédés Industriels. Fondation 2iE. 71p.

SINGH R. N. Ñ., VYAS D. K., SRIVASTAVA N. S. L., AND NARRA M., 2008. SPRERI Experience on Holistic Approach to Utilize All Parts of Jatropha Curcas Fruit for Energy. *Renewable Energy* 33:1868–73.

TRAORE D., DIANOU D., AND TRAORE A. S., 2017. Biomethane Potential of Some Agroresources in Burkina Faso: Case Study of Vegetable Residues, Pig Manure, Mango Waste and Bovine Manure.” *Journal of Advances in Biology and Biotechnology* 15(2):1–11.

TRAORE D., 2018. “Etude d’établissement d’une Base de Référence Pour Le Projet Biogaz.” Université Ouaga I Pr Joseph Ki-Zerbo.

TRAORE D., 2009. “Analyse Du Potentiel de Production Du Biogaz à Partir Des Déchets Solides Ménagers En Milieu Sahélien: Caractérisation Quantitative et Qualitative Du Biogaz Produit et Suivi Microbiologique Du Digestat.” 2IE.

WANTO C., AND HANNE M. I., 1985. Filière Biogaz. École Inter-Etats d’Ingénieurs de l’Équipement Rural. 48 p.

WATCHARASUKARN M., AND KAPARAJU P., 2009. Screening *Escherichia Coli* , *Enterococcus Faecalis* , and *Clostridium Perfringens* as Indicator Organisms in Evaluating Pathogen-Reducing Capacity in Biogas Plants.” *Microbial Ecology* 221–30.