

Etude du potentiel biogaz des déjections animales: bouses de bovins et fientes de volailles d'un centre zootechnique à Maroua - Cameroun

Aboubakar ¹, Zala Boli ² et Carl Moses Fontum Mboufung ³

¹ Faculty of Sciences, University of Maroua, P.O Box 814, Maroua, Cameroun

² The Higher Institute of the Sahel, University of Maroua, P.O. Box 46, Maroua, Cameroon

³ College of Technologies, University of Bamenda, P.O Box 39, Bambili, Cameroon

(reçu le 10 Septembre 2016 - accepté le 28 Septembre 2016)

Résumé - Cette étude cible la valorisation des déjections bovines et avicoles pour la production du biogaz afin de permettre une bonne gestion de ces dernières (déjections) au Centre National de Formation Zootechnique, Vétérinaire et Halieutique (Centre Zootechnique) de Maroua. Pour venir à bout de cet objectif, la quantification des déjections produites a été la première à être faite. Ensuite, nous avons entrepris une série d'expériences, pour fermenter les différents substrats et produire du biogaz inflammable. La biomasse des déjections collectées a subi un prétraitement mécanique. Les substrats ainsi prélevés ont alimenté des micro-bioréacteurs de 25 litres suivant trois doses à savoir: 1/2, 1/3 et 1/4 pour la bouse bovine, et 1/3, 1/4 et 1/5 pour la fiente avicole. Ainsi, le dispositif expérimental comptait six (06) bio digesteurs. Enfin, un dimensionnement des compartiments du digesteur a été fait. Il ressort une productivité moyenne de 170 kg de déjections animales par jour, soit environ 62 t/an. En terme de quantité du biogaz généré, un kilogramme du substrat bouse de vache à la dose de 1/3 fourni 100 L de biogaz avec une proportion d'environ 89 % de gaz inflammable soit 2% et 6% supérieur à ceux à la dose de 1/4 et 1/2 respectivement. De même, le potentiel du substrat fiente de poulet à la dose de 1/5 est de 130 L avec une proportion d'environ 80 % de gaz inflammable, soit 2% et 8% supérieur à ceux des substrats fientes de poulet à la dose de 1/4 et 1/3 respectivement. La production brute du biogaz par la fiente de poule reste supérieure de 12 % à celle de la bouse. Le système à dôme fixe a été retenu avec un volume du digesteur de 36 m³, un volume du réservoir à gaz de 11.7 m³ et un volume du réservoir de prétraitement de 1.8 m³.

Abstract - The aims of this study was the valorisation of bovine and poultry manure for the production of biogas in order to allow a good management of the biogas in the Zootechnic, Veterinary and Fisheries Training Center in Maroua. To come about this objective, the quantification of the manure produced was the first step. Then a series of experiments were undertaken to ferment the different substrates and produce flammable biogas. The biomass of the collected manure was subjected to mechanical pre-treatment. The substrates thus obtained supplied micro-bioreactors of 25 liters in three doses, namely 1/2, 1/3 and 1/4 for bovine dung, and 1/3, 1/4 and 1/5 for poultry droppings. Thus, the experimental system consisted of six (06) bio digesters. Finally, a dimensioning of the compartments of the digester was done. There is an average productivity of 170 kg of animal waste per day, in other way, about 62 t/year. In terms of the quantity of biogas generated, a kilogram of the cow dung substrate at the 1/3 dose provided 100 L of biogas with a proportion of about 89 % flammable gas, more precisely 2 % and 6 % higher than those at the dose of 1/4 and 1/2 respectively. Similarly, the potential of the chicken dung substrate at a 1/5 dose is 130 L, with about 80 % of flammable gas being 2% and 8% higher than chicken manure substrates at the dose of 1/4 and 1/3 respectively. The production of biogas from chicken droppings remains 12 % higher than that of dung. The fixed dome system was retained with a volume of the digester of 36 m³, a volume of the gas tank of 11.7 m³ and a volume of the pre-treatment tank of 1.8 m³.

Keywords: Cow dung - Poultry droppings - Biogas - Methanisation - Digester - Ratio.

1. INTRODUCTION

Avec une consommation toujours plus grande et plus diversifiée partout dans le monde, la production des déchets ne cesse d'augmenter en quantité et en qualité engendrant ainsi d'énormes risques sur l'environnement et, par conséquent sur la santé de la population. Cette situation est beaucoup plus préoccupante dans les pays en développement (PED) à cause notamment du retard considérable dans le domaine biotechnologique [1].

Comme dans tous les PED, une grande partie de l'économie du Cameroun repose sur le secteur primaire, c'est-à-dire le développement agropastoral. Cependant, ce secteur si important est générateur de déchets et parfois mal exploités (donc source de pollution), et connaît encore d'énormes difficultés pour prospérer parmi lesquels les besoins énergétiques.

Ces problèmes sont de plus en plus importants depuis que le pays s'est donné d'être un pays émergent en 2035 et un grand acteur dans les enjeux de la politique du monde. Le Cameroun, qui est caractérisé par une situation énergétique dépendante majoritairement des énergies fossiles importées, qui pèse sur ses équilibres économiques et parfois même financiers, regorge une population ayant accès au gaz domestique estimé à moins de 20 %.

Cette proportion apparaît plus critique dans la partie septentrionale du pays où on estime à moins de 2 % de la population qui cuisine au gaz. Or l'inaccessibilité aux formes d'énergie de cuisson moderne rend plus difficile les conditions de vie des populations, surtout celles des femmes à qui incombe généralement la responsabilité de la collecte du bois de chauffage dans les pays sous développés.

La collecte du bois de chauffe est par ailleurs l'une des principales causes de déforestation et par ricochet la dégradation des terres arables [2, 3].

Par ailleurs, la température de l'air ambiant (température basse) est le facteur qui a la plus grande incidence sur les conditions de vie des volailles, ainsi que sur leurs performances. Les poussins sont les plus sensibles aux températures inadaptées.

En effet, il leur est difficile d'assurer leur thermorégulation les premiers jours de vie. De plus, la surface corporelle de l'animal en contact avec l'air est, proportionnellement à son poids, plus grande chez le poussin que chez l'adulte. Il est donc nécessaire d'apporter des quantités importantes de chaleur afin de maintenir un confort thermique raisonnable pour les volailles à l'étape poussinière [4].

La production des déjections animales est inévitable au niveau de la ferme d'application de Maroua qui regorge l'élevage des bovins et des volailles. La demande en énergie (chaleur) se fait ressentir au niveau des poulaillers. Jusqu'à présent la production de chaleur se fait à partir d'un système de chauffage à charbon de bois combustible cher et rare dans notre localité.

La quantité du charbon utilisé pour le chauffage s'évalue à 35 kg par jour, une quantité énorme causant de manière directe des pertes économiques et indirecte la déforestation. En outre, aucun mode de gestion des déchets ni figure à la ferme; les déjections sont abandonnées à l'air libre jusqu'à la période des pluies où elles sont valorisées en partie comme amendement pour les terres agricoles.

La méthanisation se présente alors comme une solution idoine capable de pallier aux problèmes de la ferme d'application. La valorisation des déjections animales permettra non seulement d'avoir un système de gestion de déchets, mais aussi de résoudre le problème économique lié à la consommation de charbons de bois.

L'objectif principal de ce travail est de valoriser la matière organique générée par les activités agricoles et plus particulièrement par l'élevage à travers l'utilisation des déjections animales (bouse de bovin, fiente de volaille) en tant que substrats pour la production de biogaz.

Les objectifs spécifiques qui en découlent, visent à évaluer d'une part le gisement des déjections animales produites au Centre Zootechnique, d'autre part le potentiel biogaz de chaque type de déjections et de dimensionner une unité de production de biogaz suffisante pour couvrir en même temps les besoins en chaleur et le traitement de toutes les déjections produites.

L'intérêt de ce travail est d'appréhender plus des connaissances dans le domaine de production du biogaz à partir des déjections animales qui sont des excellents substrats de production du biogaz.

Il permet non seulement la réduction de la pollution locale mais aussi la lutte contre la déforestation réduisant par conséquent l'avancé du désert, et de même la réduction de la production des gaz à effet de serre contribuant ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique.

Par ailleurs, il permet aussi d'avoir au sein du Centre Zootechnique une énergie propre et autonome pour le chauffage des poussinières. Il permet aussi de vulgariser la technologie du biogaz au niveau Centre (personnel administratif et étudiants).

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel

Les déjections ont été collectées dans les enclos des vaches et les poulaillers. Ces déjections collectées ont servi comme échantillons pour nos expériences.

2.1.1 Gisements de déjections animales

Les déjections animales sont particulièrement intéressantes à utiliser quand elles sont produites en quantités importantes et régulières. Les fumiers et fientes sont adaptées à la méthanisation, compte tenu de son état physique et chimique (matières fines, facilement hydrolysable et contenant des microorganismes) qui facilitent leur manipulation et qui permettent d'être en co-digestion avec d'autres substrats.

Malgré un faible potentiel méthanogène, les bouses de vaches sont indispensables, car elles apportent des bactéries fraîches, elles ont un fort pouvoir tampon (stabilise le pH), ce qui facilite les réactions bactériennes et assure une stabilité du milieu [5].

2.1.2 Bio digesteurs

Les bio digesteurs ont été réalisés en utilisant les bidons de polyéthylène adaptés à un réservoir fabriqué par un sac en polyéthylène (figure 1).



Fig. 1: Bio digesteurs

2.2 Méthodes

2.2.1 Pré traitement

Le prétraitement mécanique a été appliqué aux déjections et ayant pour but d'émettre les déjections et d'extraire du substrat les particules indésirables, tels que le sable, les plumes, les fragments de bois, etc. Le prétraitement est effectué dans des seaux. Cependant le prétraitement mécanique augmente la capacité d'attaque des microorganismes favorisant une hydrolyse plus rapide [3].

2.2.2 Quantification des déjections

Le mode d'élevage, la conduite animale, l'état de santé de l'animal et les potentialités du milieu physique conditionnent généralement la taille et la composition du cheptel, de même que la taille des individus du même âge et de la même espèce, et aussi, par conséquent, les quantités de déjections animales produites par une unité d'élevage, au cours d'une période donnée [6-8].

Selon [8], pour déterminer la quantité de déjection (M) produite par une population animale donnée, au cours d'une journée, la production moyenne journalière d'excrétas d'un individu (M_j) est multipliée par l'effectif de la population (N).

La somme des gisements de déjections des N espèces retenues dans le cadre de l'évaluation, est une sous-estimation de la quantité totale de déjections produite par l'ensemble des animaux d'élevage, au cours de la journée. Ces expressions sont traduites par la relation:

$$M = N \times M_j \quad (1)$$

Cependant les bovins ne sont pas élevés en étable. Ceci a pour conséquence la perte de quelques excréments, soit environ 1/3 de déjection journalière [9, 6]. Les volailles, quant à elles sont conduites dans des poulaillers.

D'après [8], un bœuf émet en moyenne par jour 60 kg de déjection (M_{bj}) avec un taux moyen d'eau de 90 %. De même, une poule émet en moyenne par jour 0.11 kg de déjection (M_{vj}) avec un taux de 75 % d'eau. Le calcul de la teneur en matière sèche de chaque type de déjections (bovine et avicole) respectivement MS_b et MS_v est donné selon les équations 2 et 3:

$$MS_b = \frac{2}{3} M_{bj} \times \frac{10}{100} \quad (2)$$

$$MS_v = M_{vj} \times \frac{25}{100} \quad (3)$$

2.2.3 Remplissage des digesteurs à substrat bouse de bovins

Les digesteurs à substrat bouse de bovins sont au nombre de trois (03). Le premier est noté **B1**, le second **B2** et le troisième et dernier est **B3**.

2.2.3.1 Expérience 1: bouses de bovins

Après collecte, prétraitement et quantification des échantillons de bouses de bovins, ces derniers ont été dilués pour alimenter en trois doses différentes (1/1, 1/2, 1/3) les bio digesteurs. Le **Tableau 1** rapporte le taux de dilution et la quantité de déchet contenu dans chaque digesteur.

2.2.3.2 Expérience 2: bouses de bovins

Quelques modifications des paramètres ont été faites au cours de la seconde expérience.

Les échantillons de bouses de bovins prélevés sont dilués pour alimenter en trois doses différentes (1/2, 1/3, 1/4) les bio digesteurs.

Le **Tableau 2** récapitule le taux de dilution et la quantité de déchet contenu dans chaque digesteur.

Tableau 1: Taux de dilution des digesteurs à substrat bouse de bovins, expérience 1

Digesteur	B1	B2	B3
Ratio	1/1	1/2	1/3
Bouse (kg)	12	8	6

Tableau 2: Taux de dilution des digesteurs à substrat bouse de bovins, expérience 2

Digesteur	B1	B2	B3
Ratio	1/2	1/3	1/4
Bouse (kg)	8	6	5

2.2.4 Remplissage des digesteurs à substrat fiente de volailles

Les digesteurs à substrat fientes de volailles sont au nombre de trois (03). Le premier est noté **F1**, le second noté **F2** et le troisième est noté **F3**.

2.2.4.1 Expérience 1: fientes de volailles

Les fientes collectées des poulaillers et après dilution passent à travers un bassin primaire avant de se regrouper dans le bassin de filtration ou prétraitement, où les fientes seront débarrassées des gros éléments, tels que les plumes et le sable (M'Sadak *et al.*, 2012).

L'échantillon de fientes de volailles prétraité, quantifié et dilué avec des proportions différentes (1/3, 1/4, 1/5) alimente les bioréacteurs. Le **Tableau 3** rapporte le taux de dilution et la quantité de déchet contenu dans chaque digesteur.

Tableau 3: Taux de dilution des digesteurs à substrat fiente de volaille

Digesteur	F1	F2	F3
Ratio	1/3	1/4	1/5
Fiente (kg)	6	5	4

2.2.4.2 Expérience 2: Co-digestion fientes de volailles et bouses de bovins

Dans l'objectif d'améliorer la digestion des fientes au cours de la seconde expérience, les paramètres (le taux de dilution et la quantité de déchet contenue dans chaque digesteur) ont été modifiés. En plus des fientes, un (01) kg de bouse de vache a été introduit dans chacun des digesteurs.

A cet effet, la bouse fraîche de vache a été utilisée comme source de microorganisme. Le **Tableau 4** récapitule le taux de dilution et la quantité de déchet contenu dans chaque bioréacteur.

Tableau 4: Taux de dilution des digesteurs à substrat fiente de volaille, bouse de vache

Digesteur	FB1	FB2	FB3
Ratio	1/3	1/4	1/5
Fiente (kg)	6	5	4
Bouse (kg)	1	1	

2.2.5 Evaluation du biogaz produit

Le biogaz généré par chaque traitement a été mesuré en utilisant les emballages plastiques pour collecter le gaz produit et passer à l'opération.

Le volume est mesuré, selon la méthode de liquide déplacé [3]. Le sachet contenant du gaz a été soigneusement attaché et mis dans un bassin de 75 L, puis maintenu au fond de celui-ci. Le gaz du plastique occupe un certain volume du bassin. Le volume du bassin a été complété à 75 L (V_1) avec de l'eau de robinet, pendant que le sachet contenant le gaz a été submergé.

Après avoir retiré le sachet contenant du gaz, le niveau d'eau a baissé dans le bassin (V_2). La différence de volume correspond à celui occupé par le gaz, le sachet contenant le gaz (V). Ainsi, un sachet vide de même nature est à nouveau placé au fond du bassin et occupe un volume (V_3). Avec une quantité d'eau connue dans un bassin, le volume est ajusté à nouveau à 75 L (V_4).

La quantité d'eau utilisée dans ce dernier cas constitue le volume du gaz (V_g) contenu dans le plastique. Elle est traduite par l'équation suivante:

$$V_g = V_4 - V_3 \quad (4)$$

La production a été suivie régulièrement et quantifiée durant tout le cycle de la digestion anaérobie. Le test d'auto-inflammabilité du gaz produit a été effectué à chaque quantification de la production. La figure 2 représente le mode opératoire de quantification de la production du biogaz.



Fig. 2: Opération de mesure du volume du biogaz

3. ESTIMATION DU VOLUME TOTAL DU BIOGAZ

Soit M_b la quantité de bouse produite chaque jour et M_v celle de la fiente, le volume du biogaz (Q_g) en m^3 est égal à la somme des volumes du biogaz produit par chaque type de déjections.

Le volume du biogaz issu de la digestion des bouses bovines (Q_{gb}) s'obtient par multiplication de la quantité journalière de la bouse et le potentiel biogaz de la bouse ($V_{bb/kg}$). Quant à celui de la digestion des fientes avicoles (Q_{gv}), il s'obtient par multiplication de la quantité journalière de la fiente et le potentiel biogaz de la fiente ($V_{bv/kg}$) [3].

$$Q_g = M_b V_{bb/kg} + M_v V_{bv/kg} \quad (5)$$

3.1 Calculs de volume

Le débit volumétrique est la quantité journalière Q en m^3 de substrat diluée dans l'eau utilisée pour alimenter le digesteur afin de produire la quantité Q_g du biogaz.

Soit M (M_b , quantité de bouse et M_v , quantité de fiente), la quantité du substrat qui fournit q biogaz à la température T °C. La dilution est faite suivant le ratio a/b ($a/b_1=1/3$ pour la bouse et $a/b_2=1/5$ pour la fiente), c'est-à-dire 01 kg de substrat pour 3 et 5 litres d'eau. 01 kg de déjection dilué dans 3 litres d'eau est assimilé à 4 litres de substrat [2].

Ainsi, Q est donné par la formule suivante-

$$Q = M_b (a + b_1) + M_v (a + b_2) \quad (6)$$

3.1.1 Volume du digesteur

Le volume du digesteur (V_d) en m^3 , est un principal facteur de conception d'une unité de production du biogaz. Il est fonction du temps de rétention hydraulique T_{RH} et du débit volumique du substrat (Q) (Gourdon, 2007). A cet effet, ce volume est:

$$V_d = T_{RH} \times Q \quad (7)$$

3.1.2 Volume du réservoir à gaz

Pour calculer le volume du gaz (V_g) à stocker, il faut déterminer les périodes (P_i) des consommations journalières et leur durée (t_i). Ensuite, déduire la production moyenne horaire (Q_{pmh}) en m^3/h , et la consommation moyenne horaire (Q_{cmh}) en m^3/h , du biogaz.

Le volume du biogaz produit le jour comme la nuit est presque le même. Pendant les heures de consommation, le biogaz se produit également. A cet effet, seule la différence entre Q_{cmh} et Q_{pmh} est importante pour évaluer le volume de biogaz à stocker pendant une période de consommation.

Ainsi, il est calculé un volume V_1 du biogaz à stocker pour satisfaire la plus longue durée (T_i) d'utilisation [2]. Ces différentes grandeurs sont données par les formules suivantes:

$$Q_{cmh} = \frac{Q_g}{\sum t_i} \quad (8)$$

$$Q_{pmh} = \frac{Q_g}{24} \quad (9)$$

$$V_1 = (Q_{cmh} - Q_{pmh}) \times T_i \quad (10)$$

D'autre part, il faut déterminer le volume V_2 du biogaz produit pendant la plus longue durée qui sépare deux périodes successives de consommation. Soit T_z la durée de cette période.

$$V_2 = Q_{pmh} \times T_z \quad (11)$$

Le maximum de V_1 et de V_2 [(max V_1, V_2)] est seul retenu dans l'estimation du volume du réservoir.

Cependant, le réservoir doit être capable de compenser les fluctuations journalières de production du biogaz. Elles sont estimées à 25 % [2].

Dès lors, le volume V_g du réservoir à dimensionner est:

$$V_g = \max(V_1, V_2) \times 1.25 \quad (12)$$

3.2 Dimensionnement de l'unité production de biogaz

3.2.1 Volume du réservoir de prétraitement

Le réservoir de prétraitement est le lieu où le substrat brut est dilué dans l'eau puis homogénéisé suffisamment avant qu'il n'entre dans le digesteur. Soit V_p le volume de ce réservoir, il est recommandé qu'il soit p fois le débit volumique du substrat.

$$V_p = p \times Q \quad (13)$$

3.2.2 Choix de la forme du digesteur

Une étude menée au Kenya relative au type du digesteur a montré que le système à réservoir à gaz flottant est le plus approprié. Toutefois, les études technico-économiques relatives à la forme du digesteur justifient mieux le bon choix. A ce sujet, la forme du digesteur dépend du ratio (r) du volume du digesteur sur celui du réservoir à gaz [2].

$$r = V_d / V_g \quad (14)$$

Ainsi, lorsque r est situé entre 1:1 et 3:1, la meilleure forme du digesteur est celle cylindrique. En effet, lorsque r appartient à cet intervalle, un digesteur cylindrique est sur le plan économique moins coûteux et sur le plan technique plus facile à construire. Quant le ratio est supérieur, la forme sphérique ou en voûte est recommandée [2].

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Estimation des déjections animales valorisables du Centre zootechnique

Au cours de l'enquête, nous avons constaté que les déjections produites sont déversées et abandonnées dans la nature. La ferme dispose de six bâtiments où sont élevés les poules, et un enclos où les vaches passent la nuit. Le nombre de têtes de bovin et de volaille élevés à la ferme est représenté dans le **Tableau 5**.

Tableau 5: Nombre de bovins et volailles au Centre Zootechnique-Maroua

Nombre	
Bovins	15
Volailles	4000

(Source- Centre Maroua)

A partir du Tableau 3 et la quantité de déjections journalière produite par animal nous déduisons la quantité totale de déjections animales produites par jour au Centre Zootechnique, qui est résumée dans le **Tableau 6**.

Tableau 6: Récapitulatif des déjections produites au Centre

	Bovins	Volailles
Nombre	15	4000
Déjection (kg/tête/jour)	4	0.0275
Total déjection (kg/tête/jour)	60	110

Le **Tableau 6** donne la quantité des déjections produites chaque jour au Centre. La quantité totale de déjections enregistrée est de 60 kg de bouses de vache et 110 kg de fientes de volaille, ce qui nous donne, ensemble un total de 170 kg de déjections animales par jour. Au cours d'une année, nous aurons une quantité d'environ 62050 kg soit 62 tonnes de déjections animales, une quantité importante de matière organique qui malheureusement est abandonnée à l'air libre (figure 3) tout au long de l'année en attendant la saison pluvieuse où elle est valorisée en partie comme amendement dans les champs.



Fig. 3: Déjections abandonnées à l'air libre

De cette figure, nous constatons une mauvaise gestion des déjections entraînant ainsi une pollution locale et un gaspillage de la matière fécale. Il est nécessaire de faire recours à un mode de gestion de déchet adéquate pour éviter l'émanation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la perte de la matière fécale. Cependant, ces déjections peuvent être valorisées d'abord en énergie par récupération du méthane pour subvenir aux besoins en chaleur de la ferme, ensuite en matière fertilisante avec l'utilisation du digestat comme amendement pour les terres agricoles

4.2 Production du biogaz

La production quantitative et qualitative ont été relevées chaque jour pendant la durée de la biodégradabilité du substrat dans les digesteurs. Les Tableaux suivants récapitulent la quantité et la qualité du biogaz produit au cours des expériences menées sur la digestion de bouses de vaches et de fientes de volailles.

4.2.1 Analyse du biogaz brut

Au terme des cycles de production des différents traitements de substrat bouses de bovins, les volumes de gaz brut produit sans tenir compte de leur état d'inflammabilité sont récapitulés dans le **Tableau 3**.

Tableau 7: Récapitulatifs des résultats en biogaz brut

		Pdn _{Br} (l)	VOLUME de biogaz par kg de déjection	Temps de digestion (jour)
Bouse	B1 (ratio 1/2)	720	90	40
	B2 (ratio 1/3)	600	100	40
	B3 (ratio 1/4)	480	96	40
Fiente	F1 (ratio 1/3)	138	23	13
	F2 (ratio 1/4)	165	33	13
	F3 (ratio 1/5)	176	44	13
Bouses Fientes	FB1 (ratio 1/3)	660	110	35
	FB2 (ratio 1/4)	625	125	35
	FB3 (ratio 1/5)	520	130	35

Le **Tableau 7** indique que le potentiel biogaz du substrat bouse de vache varie en fonction de ratio de dilution. Le ratio 1/3 permet d'avoir un bon potentiel avec 100 l de

biogaz par kg de déjection bovine supérieur à ceux des ratios 1/2 et 1/4 qui sont respectivement de 90 et 96 l/kg. Toutefois, le taux de dilution inférieur au ratio 1/2 ne permet pas un bon fonctionnement de la dégradation, car l'eau est absorbée par les déjections provoquant ainsi l'arrêt de la digestion.

Il ressort également de ce **Tableau 7** que le potentiel biogaz du substrat fiente de poule varie aussi en fonction de la teneur en eau. Mais on observe aussi que la digestion des substrats fientes (déjection riche en azote) a été faible, ceci s'explique par la production croissante de l'ammoniaque inhibant ainsi la digestion.

Selon Tizé et al., [3], une augmentation de l'apport en azote peut mener à une production accrue d'ammoniac, ce qui peut nuire aux microorganismes et inactiver la méthanisation.

Cependant, selon [10], le taux de dilution influence le rendement de la digestion anaérobie des déchets. En effet, les résultats acquis pour les digesteurs à substrat fiente sont conformes avec la bibliographie qui indique une augmentation de la production de biogaz avec l'augmentation de la concentration de MS [10].

Selon le même auteur, la concentration en MS des fientes de volailles dans un digesteur ne devrait pas dépasser 10 %. Au-delà de cette valeur, la matière est dense et provoque rapidement l'arrêt de la fermentation méthanique. Ceci atteste l'importance du ratio 1/5 qui au niveau du digesteur à cette dose est plus performant que ceux (digesteurs fientes) à des doses inférieures soit 1/3 et 1/4.

En outre, le potentiel biogaz du substrat bouse bovine le plus élevé est de 100 l/kg. Selon [12], la fermentation mésophile des bouses de vaches de 440 kg a permis de produire 26.478 m³ de biogaz, ce qui a conduit à un potentiel d'environ 60 l/kg.

Une différence de 25 % entre le potentiel obtenu dans cette étude (62.5%) et celui rapporté par Igoud (37.5%). Ceci est dû en partie à cause de l'influence de la température sur la digestion anaérobie car une élévation de la température engendre une augmentation de l'efficacité de la méthanisation [3].

La fermentation des bouses de vaches entreprise par [12] s'est déroulée à 35 °C, or pour cette étude, la digestion des bouses de vaches s'est déroulée à une température d'environ 40°C. Ceci qui a permis une production maximale du biogaz.

Ces observations ont été confirmées par d'autres travaux et notamment celui de Rouez (2008), qui de manière générale, on peut considérer que la cinétique de la dégradation dans son intégralité double à chaque augmentation de 10 °C jusqu'à des températures critiques d'environ 60°C.

De même, selon [12], le potentiel méthanogène de la fiente de poulet est de 175 l/kg. Quant au potentiel rapporté dans cette étude, il est de 130 l/kg. Une différence de 14% s'opère en faveur du potentiel rapporté par [12]. En effet, plusieurs facteurs influencent la production du biogaz. C'est ce qui est le cas rencontré, la nature de la fiente a influencé la production du biogaz, car la production du biogaz par les substrats fientes raclés avec le jus est différente de celle avec des fientes abandonnées pendant un temps donné selon [10].

Cependant, il ressort de cette étude que le ratio 1/3 pour la bouse et/ou 1/5 pour la fiente raccourcit la durée du cycle de la digestion anaérobie. Ces résultats attestent l'intérêt du choix d'un ratio approprié qui facilite l'hydrolyse complète du substrat et offrent par conséquent un meilleur environnement aux microorganismes de la digestion anaérobie.

Dans ce travail, le potentiel biogaz de la bouse bovine retenu est de 100 l/kg et celui de la fiente avicole de 130 l/kg. Selon GTZ [14] et Igoud [12], le temps de rétention hydraulique de la bouse de vache en digestion mésophile est au maximum 40 jours.

Toutefois, le potentiel biogaz de la fiente avicole est 12 % supérieur à celui de la bouse bovine. Ces résultats ont été confirmés par d'autres travaux et notamment ceux de [7], [16] où le potentiel biogaz varie selon chaque auteur, mais le potentiel biogaz de la fiente reste supérieur à celui de la bouse.

4.2.1.1 Production journalière

Les productions du gaz au niveau des digesteurs ont été suivies. Les courbes de la cinétique de production brute de biogaz des différents tests ont été illustrées. Ainsi, les productions brutes journalières de biogaz enregistrées à partir de bouse de vache sont appréciées à travers la figure 3.

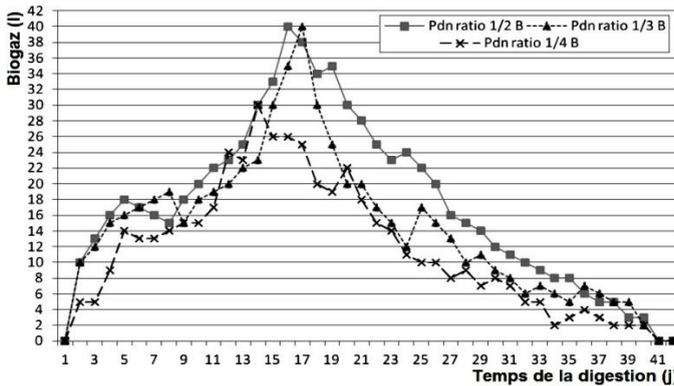


Fig. 4: Courbes de production journalière du biogaz à substrat bouse de bovins

La figure 4 représente l'évolution du volume de biogaz produit en fonction du temps des digesteurs **B1** (ratio 1/2), **B2** (ratio 1/3) et **B3** (ratio 1/4).

Nous remarquons que ces courbes ont une même allure. La production de gaz dans les digesteurs expérimentaux, conduits en discontinu, débute après la phase de démarrage avec une quantité croissante progressivement pour atteindre un niveau de production stable, puis elle commence à chuter. Ce même phénomène est observé au niveau des courbes de la production de gaz rapportées par [10].

Par ailleurs, elle ressort également que durant les huit premiers jours, la production du gaz est faible au niveau de tous les bioréacteurs. Elle commence à augmenter d'une façon variable après le huitième jour où on a enregistré d'abord au niveau du digesteur **B3** un pic de production de 30 l de biogaz correspondant au 14^{ème} jour, ensuite au niveau du digesteur **B1** un pic de 40 l correspondant au 16^{ème} jour et enfin au niveau du digesteur **B2** un pic de 40 l au 17^{ème} jour.

Les meilleurs résultats sont enregistrés au niveau du digesteur **B2** composé de 24% de déjections, avec une production journalière moyenne de 20 l. Alors que les faibles valeurs sont enregistrés au niveau des digesteur **B1** et **B3** composé respectivement de 32% de déjections et de 20% de déjections avec des productions journalières moyennes respectivement de 18 et 9 l.

Les productions journalières commencent à décroître à partir du 25^{ème} jour. Ce phénomène a été observé par Tizé *et al.*, [3], lors des études sur l'influence du prétraitement mécanique et biologique des feuilles mortes de *neem* (*azadirachta indica*) sur la production du biogaz.

Selon ce même auteur, la production décroît progressivement à partir de 30^{ème} jour causée par l'appauvrissement des substances nutritives pour la flore microbienne du milieu réactionnel.

Cette cinétique de production confirme les études faites sur la caractérisation quantitative et qualitative de la productivité énergétique de digesteurs pilotes de déjections animales (bouse fraîche de vache) qui ont enregistré des pics de production de 19 ml et 27 ml respectivement au niveau des digesteurs III et IV, selon M'Sadak et al., [10].

En outre, la production journalière de gaz au niveau des digesteurs à substrat fiente a été aussi représentée. La figure 5 montre les tracés des courbes de production journalière de gaz issu des digesteurs fientes de volailles.

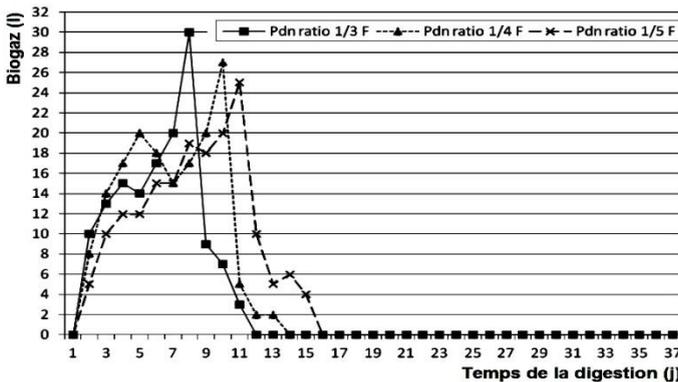


Fig. 5: Production journalière du biogaz à substrat fiente de volailles

De cette figure 5, on remarque une progression croissante et après un temps, des chutes brutales sont enregistrées au niveau de tous les bioréacteurs. Ceci est dû à l'arrêt de la fermentation méthanique des fientes de poulet causée par une inhibition totale des microorganismes. La nature du substrat (fraîche ou sèche) a une influence considérable sur la digestion anaérobie. Un substrat abandonné à l'air libre avant la méthanisation perd sa valeur (microorganisme, matières volatiles, éléments nutritifs et autres).

C'est ailleurs le cas observé pour les fientes utilisées lors de la digestion dans cette étude. Par ailleurs, selon Douag *et al.*, (2014), si le pH est au-dessus de 8.5, le biogaz sera riche en H₂S. Le pH optimum de la digestion anaérobie se situe autour de la neutralité, il est de 6.8 à 7.5. Si la valeur du pH est inférieure à 6.5 ou supérieure à 7.5, les bactéries seront alors inhibées [11]. C'est la raison pour laquelle qu'après arrêt le digestat avait une forte odeur nauséabonde, cela témoigne la présence de l'ammoniac (NH₃) dans le biogaz.

Ainsi, les productions brutes journalières de biogaz enregistrées à partir de la co-digestion sont appréciées à travers la figure 6.

La figure 6 représente l'évolution du volume de biogaz produit en fonction du temps des digesteurs **FB1** (ratio 1/3), **FB2** (ratio 1/4) et **FB3** (ratio 1/5).

Tout comme au niveau de la figure 3, les courbes représentées à la figure 6 ont une même allure. La production de gaz dans les digesteurs expérimentaux, conduits en discontinu, débute après la phase de démarrage avec une quantité croissante progressivement pour atteindre un niveau de production stable, puis elle commence à chuter.

Elle fait ressortir également que durant les dix premiers jours, la production du gaz est faible au niveau de tous les bioréacteurs. Elle commence à augmenter d'une façon variable après le dixième jour où on enregistre d'abord pour le digesteur **FB3** une production journalière maximale au 17^{ème} jour correspondant à 37 l de biogaz, ensuite pour le digesteur **FB2** une production journalière maximale au 19^{ème} jour correspondant à 35 l de biogaz et enfin pour le digesteur **FB1** une production journalière maximale au 20^{ème} jour correspondant à 40 l de biogaz.

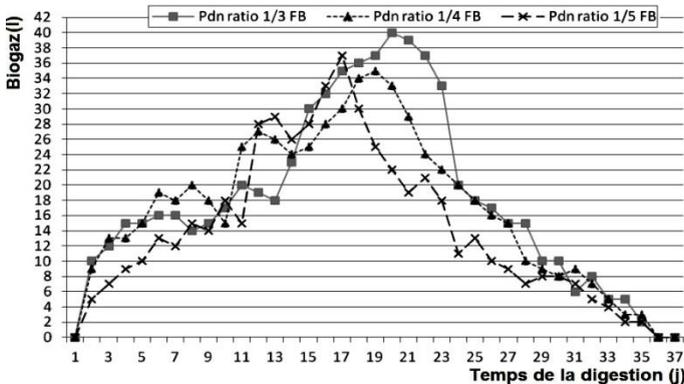


Fig. 6: Courbes de production journalière du biogaz à substrat fiente de volailles, bouse de vache

Les meilleurs résultats sont enregistrés au niveau du digesteur **FB3** composé de 16% de déjections, avec une production journalière moyenne de 22 l; alors que les faibles valeurs sont enregistrées au niveau des digesteur **FB1** et **FB2** composé respectivement de 24% de déjections et de 20% de déjections avec des productions journalières moyennes de 19 et 21 l respectivement. Par ailleurs, la production journalière décroît progressivement à partir du 24^{ème} jour.

Selon M'Sadak [10], la production journalière du biogaz avicole n'est pas constante. Selon le même auteur, lors de son expérience sur la digestion anaérobie des fientes avicoles, la production journalière du biogaz a fluctué autour d'une valeur journalière moyenne, qui est de l'ordre de 142 ml pour le cas du digesteur I (6 % MS), et autour de 147 ml pour le cas du digesteur II (8 % MS).

L'entrée en production des digesteurs **BF1**, **BF2** et **BF3** est due à la présence de bouse de vache qui garantit l'existence des populations bactériennes.

Une autre dimension d'appréciation de la production du biogaz est le dynamisme du processus dans le temps. C'est un facteur fondamental dans la conception des unités continues de production du biogaz à grande échelle [11].

A cet effet, la cinétique de production du biogaz des bouses de vache illustrée par la figure 3 relate que les productions journalières faibles sont comprises dans l'intervalle du début de la digestion anaérobie jusqu'au 8^{ème} jour, et du 25^{ème} jour jusqu'à la fin de la digestion.

Par contre, celle de production du biogaz des fientes-bouses illustrée par la figure 3 relate que les productions journalières faible sont comprises dans l'intervalle du début de la digestion anaérobie jusqu'au 10^{ème} jour, et du 24^{ème} jour jusqu'à la fin de la digestion.

4.2.1.2 Production cumulée

A partir de la production journalière du biogaz, la cinétique de production cumulée du biogaz est représentée. La figure 7 illustre la production cumulée.

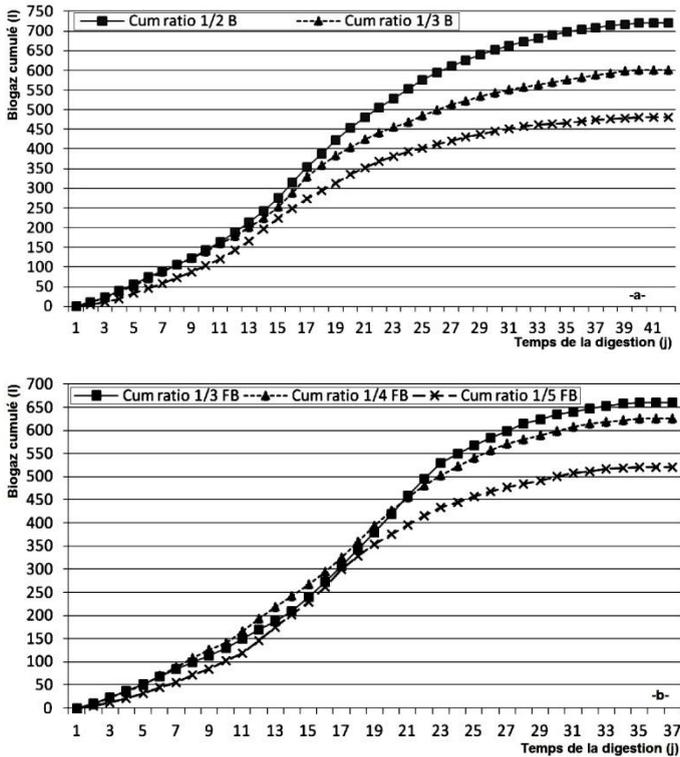


Fig. 7: Production cumulée du biogaz:
 (a) bouse de vache, (b) fiente avicole – bouse bovine

L'allure des courbes de la production cumulée représentées par les figures 7a et 7b est pratiquement similaire. Nous avons au départ une progression faible de la production, ensuite une accélération de la production pour décliner ou ralentir à la fin. Il se dégage de ce fait trois principales phases qui sont les suivantes:

La première est la phase de latence correspondant au début de la production. Cette période comptabilise une durée de 8 jours depuis la fermeture du digesteur pour la bouse et 10 jours pour la fiente. Une très faible production a été cependant enregistrée, estimée respectivement pour la bouse et la fiente à 70 et 103 l.

Cette période correspond à la phase de liquéfaction durant laquelle se déroulent l'hydrolyse, l'acidogénèse et l'acétogénèse. Cette phase précède la phase de gazéification ou la méthanogénèse qui est responsable de la production du biogaz [12].

La deuxième est la phase exponentielle correspondant à la partie centrale des courbes de production. Cette période comptabilise une durée de 17 jours à partir du 8^{ème} jusqu'au 25^{ème} jour pour la bouse de bovins et du 10^{ème} jusqu'au 24^{ème} jour pour la fiente de volaille comptabilisant 14 jours, les conditions de production sont atteintes, ce qui permet de comptabiliser les quantités de biogaz les plus importantes soit 411 l pour la bouse et 342 l pour la fiente.

Cette phase correspond à la phase de gazéification où on enregistre le maximum du gaz inflammable.

Le troisième et dernier est la phase de palier. Elle commence à partir du 24^{ème} jour pour la bouse et 25^{ème} jour pour la fiente jusqu'à l'arrêt de la digestion.

Lors de cette phase, la production est lente probablement sous l'effet de l'épuisement du substrat de digestion constituant la source nutritive et énergétique de la flore microbiologique et particulièrement la flore méthanogène qui est directement responsable de la production du biogaz [11].

Cette cinétique confirme aussi les travaux de (Igoud et al., [14]; Tahri et al., [15]; Kherbouhe et al., [16] et Tizé et al., [3].

Par ailleurs, une similitude d'évolution entre la production journalière (figure 3.2 et figure 3.4) et celles cumulées (figure 3.5a et figure 3.5b) est observée.

Les phases de latence et de palier de production sont obtenues à partir des faibles valeurs de la production journalière (comprise entre le début de la production et le 8^{ème} jour, puis entre le 25^{ème} et la fin pour la bouse; et entre le début de la production et le 10^{ème} jour, puis entre le 24^{ème} et la fin pour la fiente).

La phase exponentielle (comprise entre le 8^{ème} et le 25^{ème} jour de production pour la bouse, et notamment pour la fiente, elle est comprise entre le 10^{ème} et le 24^{ème} jour de production) correspond quant-à-elle à la partie centrale de la courbe.

4.2.1.3 Analyse du biogaz inflammable

En définitive, seule la qualité du gaz obtenue constitue la meilleure clé d'appréciation de chaque production enregistrée. Le test d'inflammabilité du gaz permettrait donc d'avoir une idée plus précise sur la nature du gaz, c'est-à-dire de reconnaître si le gaz obtenu est bel et bien du biogaz.

Le **Tableau 8** récapitule les résultats d'analyse de toutes les productions inflammables contenues dans le biogaz produit par les substrats bouse de bovin et fiente de volaille.

Tableau 8: Production inflammable en fonction des ratios de dilution

		Pdn.Br (l)	Pdn.Infl (l)	% Infl
Bouse	B1 (ratio 1/2)	720	630	87,5
	B2 (ratio 1/3)	600	630	88,3
	B3 (ratio 1/4)	480	421	87,9
Fiente	F1 (ratio 1/3)	138	0	0
	F2 (ratio 1/4)	165	0	0
	F3 (ratio 1/5)	176	0	0
Fiente et bouse	FB1 (ratio 1/3)	660	450	68,2
	FB2 (ratio 1/4)	625	433	69,3
	FB3 (ratio 1/5)	520	417	80,2

D'après le **Tableau 8**, les bioréacteurs bouse de vache ont fourni plus de gaz inflammable par rapport aux traitements des fientes avicoles. Les plus faibles productions ont été observées au niveau des digesteurs contenant les fientes avec une proportion nulle en méthane.

La production brute de 520 l à partir du substrat en co-digestion à un ratio de 1/5 a fourni 417 l de gaz inflammable, soit une proportion de 80.2 %, comparait à ceux à des ratios de 1/3 (avec une proportion de 68.2 %) et 1/4 (avec une proportion de 69.3 %), soit une supériorité respectivement de 12 % et 10.9 %.

En termes de production inflammable, la plus forte production brute au niveau du digesteur **B1** a également généré la plus faible proportion soit 87.5 %, parmi les digesteurs à substrat bouse de vache. Cette mauvaise performance de la production ressort des bouses diluées à un ratio de 1/2. La meilleure production du gaz inflammable a été fournie par la bouse à la dose de 24% (ratio 1/3). La bouse à cette dose a fourni 630 l, soit une proportion de 88.3 % supérieure à la production de bouse à la dose de 32 % et 20 %.

Cependant, nous remarquons que la proportion du biogaz inflammable contenu dans le biogaz brut varie selon la dose, dans un intervalle de 0 à 88.3 %. Selon Tizé *et al.*, [3], la proportion du gaz inflammable varie selon plusieurs facteurs (prétraitement, la dose, la nature du substrat, etc.). Selon le même auteur, la proportion est dans l'intervalle 48 à 100 % lors du traitement des feuilles mortes de *neem* et de la bouse de vache.

A l'issue des différents tests d'inflammabilité, il en ressort que toutes les productions ne brûlent pas. Une partie de la production brute est inerte. Cette proportion a été enregistrée pendant les premiers jours de production. Ce phénomène est quasi-total pour d'autres substrats [3]. Les figures 8a et 8b, montrent la qualité de la flamme issue de la combustion du biogaz.



Fig. 8: Test d'inflammabilité du biogaz: (a) période sombre, (b) pendant la journée

La flamme bleue sur la figure 3.6a représente celle issue de la combustion du biogaz et l'autre de couleur jaune est celle des allumettes conventionnelles. La combustion du biogaz génère une flamme bleue qui est pratiquement invisible pendant la journée (figure 8b). C'est pour cette raison que le test a été refait pendant une période sombre (18h) pour bien observer la flamme. La couleur bleue témoin une combustion complète de biogaz [3].

4.3 Dimensionnement de l'unité de production de biogaz

Les données nécessaires obtenues par le dimensionnement, pour la mise en œuvre d'un digesteur ont été récapitulées dans le **Tableau 9**.

Tableau 9: Données de dimensionnement du système de digestion anaérobie

	Formules	Unités	Valeurs
Débit volumétrique (Q)	$M_b (a + b_1) + M_v (a + b_2)$	m^3	0.9
Volume de biogaz (Q_g)	$M_b V_{bb/kg} + M_v V_{bv/kg}$	m^3	20.3
Volume du digesteur (V_g)	$T_{RH} \times Q$	m^3	36
Consommation moyenne horaire du biogaz (Q_{cmh})	$Q_g / \sum t_i$	m^3 / h	1.56
Production moyenne horaire du biogaz (Q_{pmh})	$Q_g / 24$	m^3 / h	0.85
Durée des consommations journalières (t_i)	/	h	13
Durée d'utilisation du biogaz, la longue (T_i)	/	h	13

Durée séparant deux périodes successives de consommation (T_2)	/	h	11
Volume du biogaz à stocker pour satisfaire la plus longue durée T_1 (V_1)	$(Q_{cmh} - Q_{pmh}) \times T_1$	m^3	9.23
Volume du biogaz produit pendant la plus longue durée T_2 (V_2)	$Q_{pmh} \times T_2$	m^3	9.35
Volume du gaz à stocker (V_g)	$\max(V_1, V_2) \times 1.25$	m^3	11.7
Volume du réservoir de prétraitement (V_p)	pQ	m^3	1.8
Ratio volume du digesteur sur celui du réservoir à gaz	V_d / V_g	/	3.1

Il ressort du **Tableau 9** que le temps d'utilisation du biogaz est de 13 h. Ce temps correspond à la période où la température décroît. Il se situe dans l'intervalle de temps de 17 h à 6 h du matin.

Il ressort également de ce **Tableau** que pour traiter l'ensemble des déjections produites, il faut une unité ayant un volume du digesteur $36 m^3$ et de réservoir à gaz de $11.7 m^3$.

Le ratio volume du digesteur sur celui du réservoir à gaz est de 3.1. Selon Tizé *et al.*, [2], le système à dôme fixe est plus approprié pour la forme du digesteur.

5. CONCLUSION

La méthanisation des déjections animales peut constituer une alternative de production du biogaz. Cependant, le recours à un taux de dilution adéquat permet d'améliorer leur rendement.

Les résultats relevés lors de cette étude relative à l'évaluation du potentiel biogaz des déjections animales des unités expérimentales de production de biogaz au laboratoire du Centre Zootechnique de Maroua, dévoilent qu'un (01) kilogramme du substrat bouse de vache à la dose de 1/3 fournit 100 l de biogaz, soit 2% et 6% supérieur à ceux des substrats bouses de vache à la dose de 1/4 et 1/2 respectivement. De même, la fiente de poulet à la dose de 1/5 fournit 130 l de biogaz soit 2% et 8% supérieur à ceux à la dose de 1/4 et 1/3 598 respectivement.

La production brute du biogaz par le substrat fiente de poule reste supérieure de 12% à celui de la bouse, soit 130 l/kg contre 100 l/kg. Après avoir ciblé la dose idéale, nous avons dimensionné un digesteur.

Les résultats soumis à notre appréciation sont les valeurs du volume de chaque compartiment du digesteur. Il ressort de cette analyse, un volume du digesteur de $36 m^3$, un volume du réservoir à gaz de $11.7 m^3$ et un volume du réservoir de prétraitement de $1.8 m^3$.

REFERENCES

- [1] M.E. Afilal, O. Elasri and Z. Merzak, 'Caractérisations des Déchets Organiques et Evaluation du Potentiel Biogaz', Journal of Materials and Environmental Science, Vol. 5, N°4, pp. 1160 - 1169, 2014.

- [2] K.J. Tize, A.D. Aboubakar, and J. Tangka, '*The Impact of Local Materials on the Construction Cost of Cylindrical Floating Biogas Digester*', Progress in Renewable Energy, Vol. 1, pp. 15 - 31, 2011.
- [3] KJ Tize, D.R. Djoulde et A. Ngakou, '*Influence de Prétraitement Mécanique et Biologique des Feuilles Mortes de Neem (Azadirachta Indica) sur la Production du Biogaz*', International Journal of Innovation and Scientific Research (IJISR), Vol. 16, N°2, pp. 505 - 513, 2015.
- [4] G. Amand, A. Bonnouvrier, D. Chevalier, E. Dezat, C. Nicolas et P. Ponchant, '*Les consommations d'énergie dans les bâtiments avicoles. Quelques repères sur les consommations d'énergie et propositions de pistes d'amélioration*', Éd. ITAVI, 1^{ère} Edition, ISBN: 2-902112-15-7, 28 p., 2008.
- [5] ADEME, '*Les Déjections Avicoles*', Sciences et Techniques Avicoles, Hors série - 2001.
- [6] N. Laskri, O. Hamdaoui et N. Nedjah, '*Traitement et Valorisation des Déchets par Procédé de Digestion Anaérobie: Production du Biogaz*', Revue des Energies Renouvelables, CER'07, Oujda, pp. 23 – 26, 2007.
- [7] J. Lacour, R. Bayard, E. Emmanuel et R. Gourdon, '*Evaluation du Potentiel de Valorisation par Digestion Anaérobie des Gisements de Déchets Organiques d'origine Agricole et Assimilés en Haïti*', Déchets - Revue Francophone d'Ecologie Industrielle, N°60, pp. 31 - 41, 2011.
- [8] IRDA, '*Déjection Animales: Mettre au Point des Techniques pour Réduire les Emissions dans l'Environnement*', 2 pp., 2012.
- [9] I. Tou, S Igoud et A Touzi, '*Production de Bio méthane à Partir des Déjections Animales*', Revue des Energies Renouvelables, NS, Biomasse, Production et Valorisation, pp. 103 - 108, 2001.
- [10] Y. M'Sadak, A. Ben M'Barek et S. Baraket, '*Suivis Physico-Chimique et Energétique de la Bio méthanisation Expérimentale Appliquée à la Biomasse Bovine*', Revue, 'Nature & Technologie', N°7, pp. 81 à 86, 2012.
- [11] S. Igoud, I. Tou, S. Kehal, N. Mansouri et A. Touzi, '*Première Approche de la Caractérisation du Biogaz Produit à Partir des Déjections Bovines*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 5, pp. 123 - 128, 2002.
- [12] J. Lacour, '*Valorisation de Résidus Agricoles et Autres Déchets Organiques par Digestion Anaérobie en Haïti*', Thèse INSA de Lyon, Ecole doctorale de Chimie de Lyon, Spécialités Chimie, Procédés, Environnement, 2012.
- [13] GTZ et CDER, '*Guide de Construction et d'Utilisation des Installations Biogaz*', 59 p., 1996.
- [14] S. Igoud, I. Tou, M. Slaim et A. Touzi, '*La Production de Biogaz à Partir des Déjections Animales*', Rapport Technique Interne, CDER, 2001. 650
- [15] A. Tahri, M. Djaafri, M. Khelafi, S. Kalloum et F. Salem, '*Amélioration du Rendement de la Production de Biogaz par Co-Digestion des Déchets Organiques (Déchets d'Abattoir et de Volaille)*', Revue des Energies Renouvelables, SIENR'12, Ghardaïa, pp. 375 – 380, 2012.
- [16] D. Kherbouhe et D. Benyoucef, '*Valorisation Energétique de la Biomasse: Production du Biogaz à Partir de la Méthanisation aux Sites Algériens*', Albi, France, ESTIMAC, 5 p., 2007.