

ÉVALUATIONS PHYSICO-CHIMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMÉTHANISATION EXPÉRIMENTALE APPLIQUÉE AUX EFFLUENTS D'ÉLEVAGES INTENSIFS GÉNÉRÉS EN TUNISIE

M'SADAK Youssef* et BEN M'BAREK Abir

Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel
Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem, Université de Sousse, Tunisie

* E-mail: msadak.youssef@yahoo.fr

Résumé- La présente étude, accomplie dans des conditions en milieu tunisien, se propose d'approfondir l'analyse de certains paramètres de fonctionnement des digesteurs mis en œuvre pour traiter les déjections bovines à l'échelle expérimentale (quatre pilotes de laboratoire) en mettant l'accent notamment sur l'effet de la variation de diverses conditions physico-chimiques (température, agitation, nature du substrat,...) de la digestion anaérobie, en discontinu, sur la production quantitative gazeuse. En plus, quatre autres digesteurs expérimentaux alimentés en continu avec des fientes avicoles (différents selon leur taux de Matière Sèche) ont été suivis, pour apprécier les productivités gazeuses quantitative et qualitative. Un diagnostic physico-chimique (pH et Matière Sèche: MS) est mené tout au long du processus de fermentation (phases de démarrage et de production). Au vu des résultats, il apparaît que la productivité quantitative gazeuse, demeure moins intéressante dans le cas des digesteurs alimentés en discontinu avec les bouses bovines. La quantité produite de biogaz bovin expérimental est variable suivant les paramètres de digestion adoptés. Elle est maximale en présence de température élevée (35°C) et sous agitation mécanique du substrat introduit (substrat en mélange avec inoculum). Pour les quatre digesteurs avicoles, elle est plus importante avec l'augmentation de la concentration de la MS relevée. De même, le digesteur à 8% MS (alimenté avec les fientes avicoles), est plus performant de point de vue quantité et qualité gazeuses (teneur en méthane et pouvoir calorifique).

Mots clés: Digesteurs expérimentaux, biomasse animale, production quantitative gazeuse, composition en méthane et pouvoir calorifique.

ASSESSMENTS PHYSICO-CHEMICAL AND ENERGETIC OF THE EXPERIMENTAL BIOMETHANATION APPLIED TO INTENSIVE LIVESTOCK EFFLUENTS GENERATED IN TUNISIA

Abstract- This study, carried out in the Tunisian conditions, proposes to deepen the analysis of certain operating parameters of implemented digesters used to treat cowpat experimentally (four laboratory pilot), focusing especially on the effect of the variation of various physical and chemical conditions (temperature, agitation, nature of the substrate, ...) of the discontinuous anaerobic digestion, on the quantitative production of gas. In addition, four other experimental digesters continuously fed by poultry droppings (different depending on their rate of DM) were followed to assess the quantitative and qualitative gas productivity. A physico-chemical diagnosis (pH and Dry Matter: DM) was also undertaken throughout the fermentation process (start-up and production phases). It has been found that quantitative gas productivity is less interesting in the case of digesters discontinuously supplied with cowpat. The amount of experimental cattle biogas produced is variable according to the adopted digestion parameters. It's maximum in front of a high temperature (35°C) and mechanical agitation of the inserted substrate (substrate mixed with inoculum). For the four poultry digesters, it is more important with the increase of the raised DM concentration. Similarly, the digester at 8% of DM (supplied with poultry droppings) is more efficient in terms of quantity and quality of gas (methane content and calorific value).

Key words: Experimental digesters, animal biomass, quantitative gas production, methane composition and calorific value.

Introduction

L'idée de produire de l'énergie à partir d'effluents d'élevage paraît attirante. Les bouses de bovins et les fientes de volailles, jusqu'ici plutôt considérées comme des charges, deviendraient des matières organiques plus nobles, en tant que sources d'énergie renouvelable. Il s'agit de valoriser la Matière Organique (MO) générée par les activités agricoles, et plus particulièrement, par l'élevage, à travers l'utilisation des déjections animales en tant que substrats pour la production de biométhane de forte valeur énergétique, et par la suite, l'utilisation de la MO comme fertilisant agricole après réduction de sa charge polluante [1, 2, 3].

Le bon fonctionnement de ce type de procédé de traitement biologique anaérobie de la MO est amplement conditionné par le mode de digestion adopté et par les conditions physico-chimiques du substrat mis en fermentation, entre autres, sa nature, la température, l'agitation, le pH et la MS.

Les deux modes de digestion (en discontinu et en continu) ont été testés au niveau de quatre digesteurs expérimentaux, alimentés respectivement dans un premier temps par des bouses bovines produites par un élevage intensif de vaches laitières en étable à stabulation libre et une seconde fois par des fientes avicoles issues d'un élevage industriel de poules pondeuses. Ainsi, pour les digesteurs, supports de cette étude, un suivi de quelques paramètres physico-chimiques (pH et MS) a été établi tout le long du processus de biométhanisation (phases de démarrage et de production).

Cette étude est consacrée à l'évaluation expérimentale de la productivité gazeuse quantitative dans son ensemble (en vue de comparer le potentiel énergétique quantitatif du biogaz issu de la biomasse bovine et celui issu de la biomasse avicole), ainsi que du potentiel énergétique qualitatif du biogaz produit à partir des fientes de volailles.

1.- Matériel et méthodes

1.1.- Site expérimental

Le travail engagé consiste à mettre en œuvre l'expérimentation de la biométhanisation de la biomasse animale dans huit digesteurs pilotes expérimentaux (quatre digesteurs par unité) installés au laboratoire «biogaz» (aménagé dans le cadre de la coopération tuniso-chinoise), rattaché au Centre de Formation Professionnelle Agricole en Élevage Bovin (C.F.P.A.E.B) de Sidi Thabet en Tunisie.

1.2.- Matériel expérimental

1.2.1.- Matières premières mises en fermentation

L'expérimentation porte sur des bouses fraîches produites par les vaches disponibles et des bouses bovines noires extraites de la fosse septique adoptée d'une part, et d'autre part, sur des fientes avicoles fraîches ramenées du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Aviculture (C.F.P.A.A.) de Sidi Thabet, ainsi que sur des bouses bovines pré-fermentées (ou bouses noires) diluées utilisées comme inoculum. Les caractéristiques des matières premières testées sont données dans le tableau I.

Tableau I.- Caractéristiques des substrats utilisés

		Nature de l'effluent	MS (%)	pH
Expérimentation bovine	Substrat	Bouses fraîches	31,5	6,5
	Inoculum	Bouses noires	9,4	7,2
Expérimentation avicole	Substrat	Fientes avicoles	20,9	8,7
	Inoculum	Bouses noires	4,0	7,2

1.2.2.- Dispositif expérimental

Pour la mise en œuvre de l'expérimentation de la biométhanisation des bouses bovines et des fientes avicoles, deux procédés de fermentation qui sont respectivement en discontinu et en continu des digesteurs pilotes, sont mis en place (photo 1).



Photo 1.- Dispositif expérimental de digestion adopté

Les quatre premiers digesteurs adoptés, différents de point de vue paramètres de fonctionnement, servent pour le suivi des paramètres physico-chimiques et de la production quantitative du biogaz produit à partir de la biomasse bovine. Les quatre seconds digesteurs employés contiennent des fientes avicoles à différentes concentrations en MS en ayant recours à la dilution des fientes ramenées. Ils servent pour le suivi des productions gazeuses quantitative et qualitative à partir de la biomasse avicole (tab. II).

Tableau II.- Données générales sur les digesteurs testés de la biomasse animale
(+: avec, -: sans)

	Digesteur	Substrats utilisés	Température (°C)	Agitation
Expérimentation bovine	Expérimental I	Bouse fraîche	25	-
	Expérimental II	Bouses fraîche et noire		-
	Expérimental III	Bouse fraîche	35	-
	Expérimental IV			+
Expérimentation avicole	Expérimental I	Substrat: Fientes avicoles à respectivement 3, 6, 8 et 16% de MS. Inoculum: Bouses bovines fraîches	35	+
	Expérimental II			
	Expérimental III			
	Expérimental IV			

1.2.3.- Phases de remplissage des digesteurs et de démarrage de la fermentation

Le démarrage de la fermentation anaérobie est une phase critique dans la production du biogaz, donc elle doit être bien soignée afin que le processus débute le plus rapidement possible. Il existe deux procédés de fermentation anaérobie auxquels correspondent deux types fondamentaux de digesteurs. Pour le digesteur de type discontinu, la production de biogaz est discontinue. Le digesteur est dit continu lorsqu'il est alimenté régulièrement en cours de fermentation avec un substrat liquide, la production de biogaz est alors continue [4]. La biométhanisation expérimentale en discontinu exige ainsi un seul apport en substrat, inoculum et eau au début du processus. Une fois le remplissage réalisé, le digesteur doit être étanche pour assurer l'anaérobiose ainsi que le bon déroulement de la fermentation.

Pour la biométhanisation en continu, les quantités de fientes introduites et évacuées quotidiennement sont de 45 ml pour chaque digesteur. Il est procédé à une extraction quotidienne de fientes digérées suivie de l'introduction du même volume, et ceci jusqu'à ce que la totalité du contenu du digesteur sera renouvelé. Après la phase de démarrage de 10 jours, la quantité d'inoculum a été complètement extraite suite au renouvellement quotidien réalisé. À ce stade, l'alimentation-extraction porte uniquement sur les fientes fraîches.

1.3.- Suivi expérimental

Pour chaque digesteur, le suivi concerne plusieurs paramètres physico-chimiques et énergétiques pendant une période variable d'une à quatre semaines en fonction des performances de digestion.

Pour la quantification, un bac rempli d'eau dans lequel sont installés des béchers gradués pour récupérer le gaz produit, est utilisé. Le gaz évacue l'eau et prend sa place, d'où une lecture directe de la quantité produite à partir des graduations. Le prélèvement de biogaz s'effectue en faisant appel à un système simple basé sur des prises d'échantillons dans des vessies de ballon (photo 1). Pour l'analyse de la composition gazeuse, nous avons eu recours à la technique de Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG). Les composants déterminés par cette méthode sont les suivants : les pourcentages en CH₄, en CO₂, en H₂S et en H₂. Pour déterminer le potentiel énergétique, il convient d'estimer les valeurs

inférieure (PCI) et supérieure (PCS) du pouvoir calorifique, exprimées en kcal/Nm³.

2.- Résultats et discussion

2.1.- Suivi de l'évolution du pH lors des expérimentations mises en œuvre

2.1.1.- Importance de l'étude du paramètre pH

Il est admis que le pH est un indicateur du mauvais fonctionnement éventuel d'un digesteur. S'il est au-dessous de 6,5, l'ajout de la chaux ou du bicarbonate de sodium corrige cette anomalie [5]. Pour un pH au-dessus de 8,5, le biogaz sera riche en H₂S [6]. Son optimum pour 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 [7].

2.1.2.- Suivi du pH au niveau de l'expérimentation bovine

La figure 1 illustre les différentes courbes d'évolution du pH au niveau des quatre digesteurs expérimentaux alimentés en discontinu, tout en montrant l'incidence comparée de certains paramètres physico-chimiques (inoculum, agitation et température) sur le pH relevé.

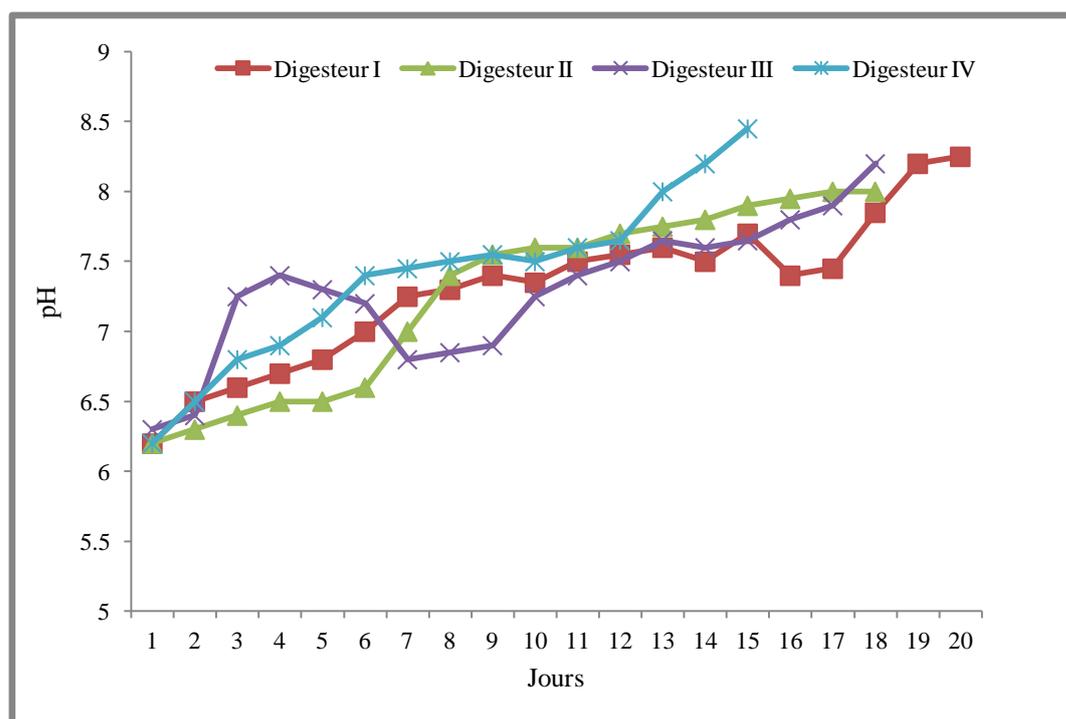


Figure 1.- Évolution du pH au cours du temps dans les différents digesteurs expérimentaux bovins

Il apparaît que l'ajout de l'inoculum n'a pas beaucoup d'influence sur l'évolution du pH des digesteurs I et II, respectivement sans ou avec inoculum, qui présentent presque un même comportement tout au long de la phase de démarrage. Cette phase de démarrage est indispensable pour la constitution des populations bactériennes qui interviennent dans la fermentation, et assurent une marge de pH permettant la production de biogaz.

De même, l'agitation mécanique a un effet considérable sur l'évolution du pH et sur le processus de fermentation (digesteurs III non agité et IV agité). En comparant la productivité des digesteurs I et III, la température semble avoir un effet appréciable sur l'élévation du pH.

2.1.3.- Suivi du pH au niveau de l'expérimentation avicole

2.1.3.1.- Phase de démarrage

L'étude de la phase de démarrage est de rechercher l'adaptation des bactéries méthanogènes de bouses noires de vaches à leur nouveau milieu fermentaire (fientes avicoles à digérer). La figure 2 montre les variations du pH au cours de la phase de démarrage limitée à 10 jours, au niveau des quatre digesteurs.

Au vu des résultats, seul le digesteur I présente des valeurs de pH proches de la valeur optimale s'ajustant autour de la neutralité, alors que les autres digesteurs ont présenté des valeurs de pH dépassant, dans la plupart des cas, la valeur seuil de production de gaz qui est de 7,5 [7]. Ceci peut s'expliquer par la quantité importante d'eau distillée présente dans le digesteur I, ou par la faible quantité de matières à digérer. Pour les autres digesteurs, il est constaté dans l'ensemble, que plus la concentration en MS des fientes introduites est importante, plus la valeur du pH a tendance à s'élever, vu la valeur basique du pH des fientes avicoles humides.

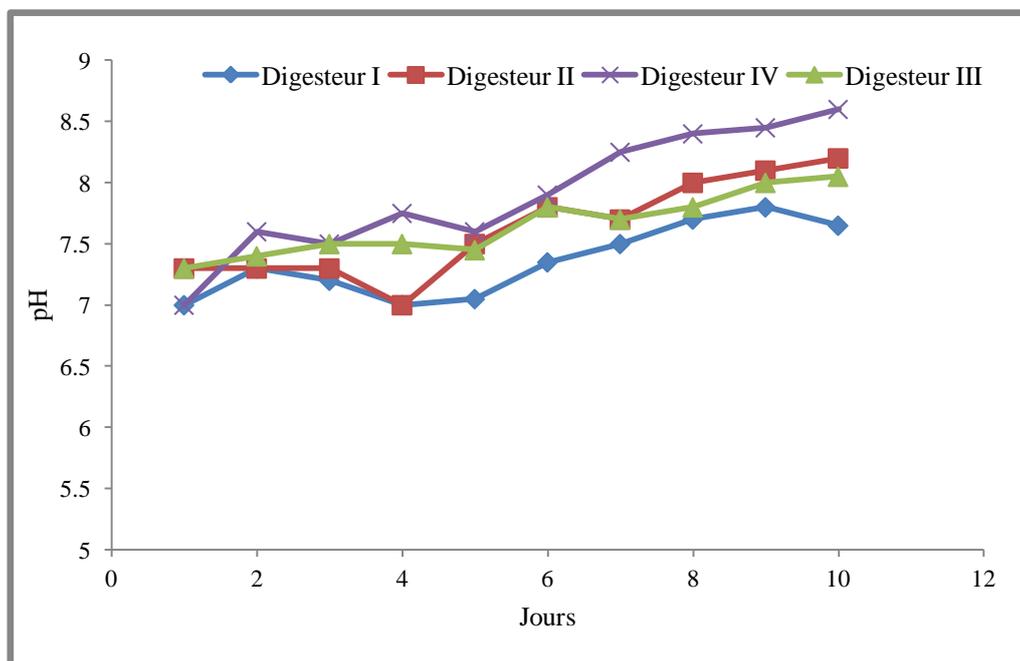


Figure 2.- Evolution du pH à la phase de démarrage (digesteurs avicoles)

2.1.3.2.- Phase de production gazeuse

Durant cette phase la production au niveau du digesteur I (fig. 3) s'est limitée aux 10 premiers jours et les valeurs de pH étaient comprises entre 7 et 7,5, valeurs répondant aux normes de production de biogaz établies par ROQUES (1981) [7]. L'expérimentation à

ce stade généralement de montée en production, s'est arrêtée, en raison de l'insuffisance de la quantité gazeuse produite.

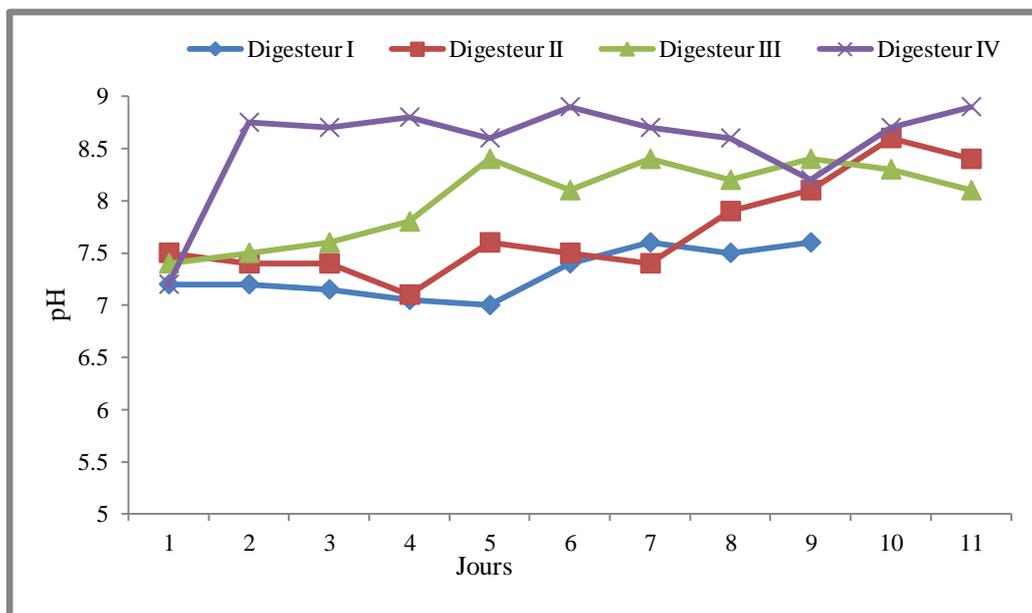


Figure 3.- Évolution du pH au cours de la phase de production gazeuse (digesteurs avicoles)

L'évolution du pH au niveau des digesteurs II et III, est constamment croissante avec un léger décalage des deux courbes à partir du 4^{ème} jour, car la quantité de fientes fraîches ajoutée chaque jour est plus élevée pour le digesteur III que celle pour le digesteur II. Quant au digesteur IV, les valeurs du pH sont nettement élevées, ce qui explique la faible quantité produite de biogaz par ce digesteur à ce stade. Après quelques jours, le suivi de ce digesteur n'est plus intéressant, en raison de la faible quantité de gaz produite, ne pouvant pas suffire pour une analyse gazeuse qualitative.

2.2.- Détermination de la MS lors des expérimentations mises en œuvre

2.2.1.- Suivi de la variation de la MS au niveau de l'expérimentation bovine

D'après les résultats obtenus, il est à noter que les pourcentages de MS semblent similaires au niveau des digesteurs I (15,8%) et IV (15,3%). La valeur la plus élevée de MS a été enregistrée dans le cas du digesteur III (16,6%) et celle la plus faible chez le digesteur II (13,6%). A ce propos, il convient de rappeler que l'objectif essentiel recherché lors de l'expérimentation mise en œuvre était la variation de certains facteurs (inoculum, agitation, température) pour évaluer leur impact sur la productivité gazeuse, tout en ajustant autant que possible d'autres facteurs (pH et %MS) afin d'établir des conditions expérimentales comparables.

2.2.2.- Suivi de l'évolution de la MS au niveau de l'expérimentation avicole

D'après les résultats acquis, les valeurs de MS semblent stables, et ne varient dans le temps ou les légères variations enregistrées sont négligeables, d'où le bon déroulement du processus de fermentation.

2.3.- Évaluation des performances énergétiques quantitatives des digesteurs mis en œuvre

2.3.1.- Suivi quantitatif de la productivité gazeuse au cours de l'expérimentation bovine

La production de gaz au niveau des digesteurs (fig. 4), débute après la phase de démarrage avec des quantités croissantes pour atteindre un niveau de production maximum. Puis elle chute rapidement. L'entrée en production de biogaz pour le digesteur II débute dès que la valeur limite inférieure de pH convenable pour la production de biogaz est atteinte. Contrairement, dans le cas du digesteur I, la phase de démarrage présente des valeurs de pH convenables pour la production de biogaz, mais il n'y a de biogaz produit que le 7^{ème} jour. Ce résultat peut être probablement dû à la durée de la phase d'initiation des populations bactériennes en jeu. L'entrée rapide en production du digesteur II est due à la présence de bouse noire qui a garanti l'existence des populations bactériennes et qui a favorisé une quantité totale de production un peu plus élevée en sa faveur.

L'effet considérable de l'agitation dans un digesteur est dû au fait qu'elle favorise l'approvisionnement des bactéries en substances nutritives et leur action de digestion au niveau du substrat frais, nouvellement introduit. Elle a induit une rapidité et une efficacité du processus de production au niveau du digesteur IV agité. Pour le suivi de l'effet de l'augmentation de la température sur le déroulement du processus de production de biogaz, il peut être apprécié en comparant les courbes d'évolution de la productivité de deux digesteurs I et III. Plus la température est élevée, plus la productivité gazeuse est importante et le processus de production est rapide.

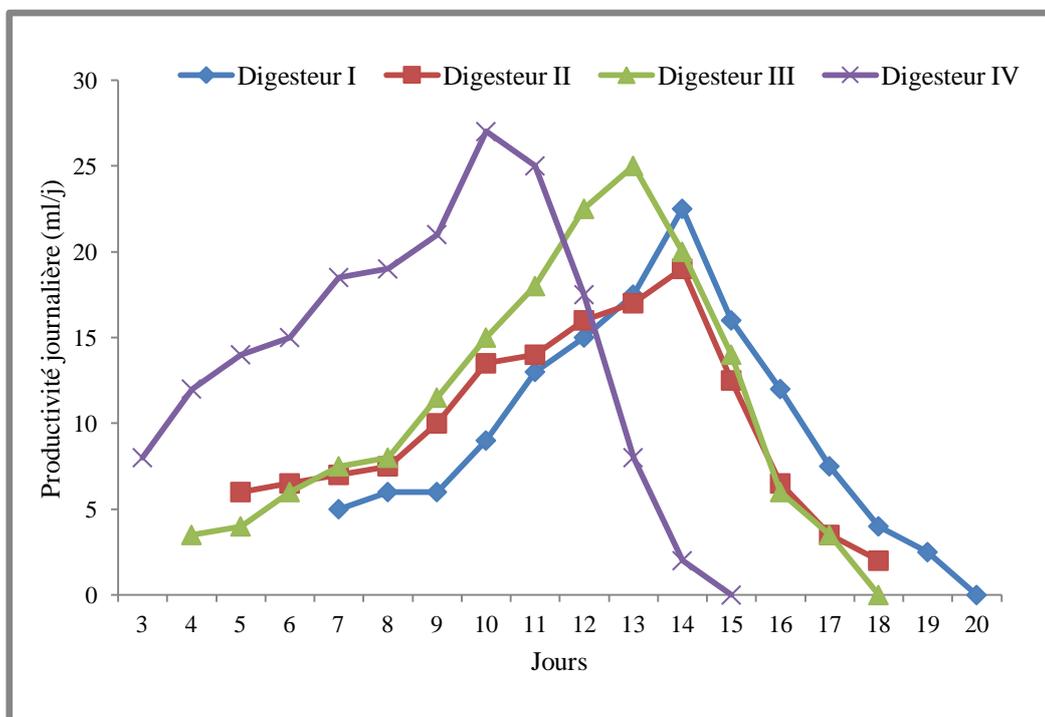


Figure 4.- Évolution de la production gazeuse bovine au cours du temps

2.3.2.- Suivi quantitatif de la productivité gazeuse au cours de l'expérimentation avicole

La figure 5 présente les courbes de production du biogaz relevées pour les trois digesteurs avicoles fonctionnels.

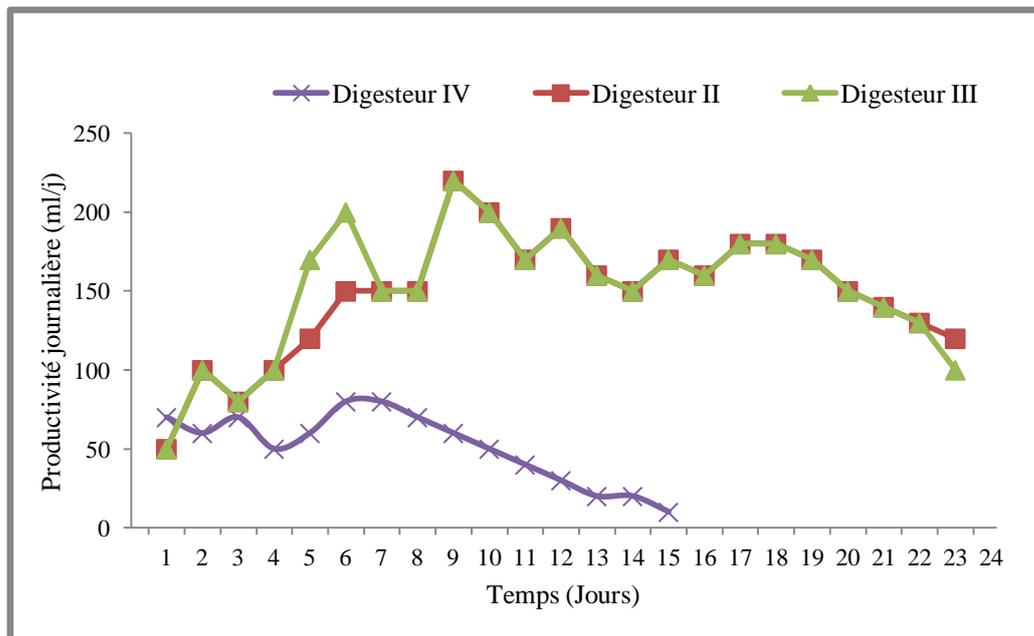


Figure 5.- Évolution du volume de biogaz produit au niveau des digesteurs avicoles

Les résultats des digesteurs II et III, laissent remarquer comme cité dans la bibliographie, une évolution de la production de biogaz avec l'augmentation de la concentration en MS [8]. Selon AKROUT [8], la concentration en MS des fientes de volailles dans un digesteur ne peut pas dépasser 10%, car au-delà de cette valeur, la matière est dense et entraîne l'arrêt de la fermentation méthanique. Dans le digesteur IV la valeur moyenne de la production journalière reste très faible. L'explication semble provenir de l'accumulation de la matière mise en fermentation dans ce digesteur, occasionnant le bouchage, dès la première semaine de l'alimentation avec les fientes et la chute de la production de biogaz dans le temps.

2.4.- Évaluation des performances énergétiques qualitatives de l'expérimentation avicole

2.4.1.- Composition gazeuse

Les analyses de la composition du biogaz avicole produit, sont effectuées au niveau des digesteurs II et III qui semblent plus les performants (tab. III). Le pourcentage de méthane (CH_4) du biogaz produit s'élève généralement avec l'augmentation de la concentration en MS. Le pourcentage de CO_2 , s'est élevé aussi avec l'augmentation de la concentration en MS, ceci est expliqué par la dissolution de l'ammoniac sous forme d'ammoniaque, élevant ainsi la valeur du pH. Le pourcentage de H_2S , diminue avec l'élévation de la concentration en MS dans les conditions expérimentales adoptées. Il convient de signaler que ce paramètre est généralement moins élevé que celui relevé [9].

Tableau III.- Expression des résultats de la composition du biogaz avicole produit

Digesteur	CH₄ (%)	CO₂ (%)	H₂S (%)
Expérimental avicole II	63,28	20,00	16,18
Expérimental avicole III	63,40	30,00	5,89

2.4.2.- Pouvoir calorifique

Les résultats énergétiques au niveau des deux digesteurs II et III, sont consignés dans le tableau IV. Il est noté une légère augmentation des PC en fonction de la concentration en MS. Les relevées sont conformes à celles indiquées par MONZAMBE (2002) [9] qui proclame une fourchette comprise généralement entre 5000 et 8500 kcal/Nm³, sans préciser une limite.

Tableau IV.- Résultats relatifs aux pouvoirs calorifiques du biogaz avicole produit

Digesteur	PCI (kcal/Nm³)	PCS (kcal/Nm³)
Expérimental avicole II	5394	6011
Expérimental avicole III	5429	6045

Conclusion

Les résultats de cette étude, relative à la biométhanisation expérimentale appliquée à la biomasse animale produite en Tunisie, ont montré particulièrement que les performances énergétiques d'un digesteur alimenté en discontinu ou en continu, dépendent notamment de la nature des matières mises en fermentation (bouses bovines ou fientes de volailles), de l'agitation du substrat, de la température maintenue au cours de la digestion anaérobie, mais aussi de l'ajustement du pH et du taux de la MS introduite.

La biomasse avicole utilisée pour produire du biogaz s'est révélée, dans les conditions expérimentales adoptées, plus performante que la biomasse bovine.

Remerciements

Nous remercions vivement tous les organismes engagés dans la présente étude qui n'a été réalisable que grâce à la contribution du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet (Tunisie) qui a mis à notre disposition respectivement les digesteurs expérimentaux et le laboratoire «biogaz» (analyses physico-chimiques). Nos remerciements vont également à la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte qui a contribué par ses moyens (personnel et appareillage spécialisé) à la réalisation des analyses qualitatives du biogaz produit (composition et pouvoir calorifique).

Références bibliographiques

- [1].- Angelidaki I., Ellegaard L., 2003.- Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Appl. Biochem. Biotech.*, vol. 109: 95-105.
- [2].- Macias-Corral M., Samani Z., Hanson A., Smith G., Funk P., Yu H., Longworth J., 2008.- Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect

of co-digestion with dairy cow manure. *Bioresource Technology*, vol. 99: 8288-8293.

[3].- Schievano A., Pognani M., D'Imporzano G., Adani F., 2008.- Predicting anaerobic biogasification potential of ingestates and digestates of a full-scale biogas plant using chemical and biological parameters. *Bioresource Technology*: 8112-8117.

[4].- Almoustapha O., Millogo-Rasolodimby J., 2009.- Production de biogaz et de compost à partir de *eichhornia crassipes*, (*mart*) *solms-laub* (*pontederiaceae*) pour un développement durable en Afrique sahélienne. *Revue Vertigo*, vol. 7 (2), 6 p.

[5].- Ghaly A., Pyke J., 1991.- Amelioration of methane yield in cheese whey fermentation by controlling the pH of the methanogenic stage. *Applied Biochemistry and biotechnology*, vol. 27 (1): 217-237.

[6].- Graieb M., 1988.- Étude et réalisation d'une installation de méthanisation avec chauffage. Mémoire de Spécialisation, Institut National Agronomique de Tunis, Tunisie, 90 p.

[7].- Roques H., 1981.- Fondements théoriques du traitement biologique des eaux. Chap. 3-6: Traitement anaérobie, *Technique et Documentation Lavoisier*, Paris: 1476-1532.

[8].- Akrouit J., 1992.- Étude énergétique de la fermentation méthanique des fientes de volailles : optimisation des facteurs influents et modélisation du système. Doctorat de spécialité, École Nationale des Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 143 p.

[9].- Monzambe M., 2002.- La problématique de la biométhanisation en république démocratique du Congo. Université du Québec, Canada, 38 p.