

CARACTÉRISATIONS PHYSICO-CHIMIQUE, ENVIRONNEMENTALE ET ÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMÉTHANISATION INDUSTRIELLE AVICOLE EN TUNISIE SEMI-ARIDE

M'SADAK Youssef* et ZOGHLAMI Rahma Inès

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

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

Résumé- La présente investigation, entreprise dans le contexte tunisien semi-aride, consiste à évaluer la fermentation méthanique, appliquée à la biomasse avicole, établie au niveau du digesteur pilote industriel à Hammam Sousse (gouvernorat de Sousse). Le suivi de ce digesteur, d'une capacité utile de 300 m³, a porté, d'une part, sur la détermination des caractéristiques de l'effluent avicole par l'analyse de deux paramètres physico-chimiques (pH et Matière Sèche: MS) et de deux paramètres environnementaux (Matières En Suspension: MES et Demande Biologique en Oxygène: DBO₅), et d'autre part, sur l'appréciation énergétique de la productivité qualitative (composition en biométhane et pouvoir calorifique) du biogaz produit. Cette investigation a permis de dégager un certain nombre de constats dont on peut relater particulièrement:

- les meilleurs bilans de dépollution, à propos des MES et de la DBO₅, sont observés au niveau du bassin de décantation de l'installation étudiée.
- l'intérêt du recours au conditionnement du biogaz produit a été confirmé en comparant les résultats avant et après épuration aussi bien sur le plan Teneur en biométhane (% CH₄) que sur le plan Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).
- l'installation de biométhanisation considérée demande quelques consolidations généralement pour une meilleure dépollution des fientes avicoles, une meilleure productivité énergétique et une meilleure valorisation agronomique des résidus solides et liquides générés.

Mots clés: Digesteur industriel, fientes avicoles, bilan de dépollution, teneur en biométhane et pouvoir calorifique inférieur.

CHARACTERIZATIONS PHYSICO-CHEMICAL, ENVIRONMENTAL AND ENERGETIC OF THE INDUSTRIAL AVICOLOUS BIOMETHANATION IN TUNISIA SEMI-ARID

Abstract- This investigation, undertaken in Context Tunisian Semi-arid is to evaluate the methane fermentation applied to biomass poultry, established at the pilot industrial digester in Hammam Sousse (Sousse Governorate). Monitoring the digester, with a useful capacity of 300 m³, focused, firstly, on the determination of the characteristics of the poultry effluent by the analysis of two physico-chemical parameters (pH and Dry Matter: DM) and two environmental parameters (Suspended Solids: SS and Biological Oxygen Demand: BOD₅), and secondly, on the energy evaluation of qualitative productivity (biomethane composition and calorific value) of produced biogas. This investigation has identified some observations which can reveal principally:

- the best records of remediation, about SS and DBO₅, are observed at tailings pond of the studied installation.
- the interest in the use of the biogas produced conditioning was confirmed by comparing the results before and after treatment as well as on the biomethane content (CH₄%) than on the lower calorific value (PCI).
- the biomethanation installation requires some consolidations, generally considered better for the remediation of droppings poultry, improved energy productivity and better agronomic recovery of solid and liquid generated waste.

Keywords: Industrial digester, droppings avicolous, assessment of depollution, biomethane content, lower calorific value.

Introduction

Pour répondre aux besoins en énergie afin de réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre, pour la préservation de l'environnement, la prospection et le développement de nouvelles sources d'énergie ont été entrepris notamment l'énergie de la biomasse [1]. Cette énergie renouvelable largement disponible, peu coûteuse et non polluante est utilisée pour compléter l'énergie fossile non renouvelable [2]. Les déchets agricoles constituent un potentiel énergétique exploitable [3], soit en les brûlant directement pour utiliser la chaleur produite, soit par biométhanisation et utilisation du gaz comme source d'énergie [4]. KALIA *et al.* (1992) ont prouvé que l'efficacité de digestion pourrait être augmentée ou ralentie selon la nature des déchets [5].

En Tunisie, les technologies de biométhanisation sont relativement nouvelles. Il existe deux grandes filières de production de biogaz suivant le type de déchets utilisés. On peut distinguer la filière de valorisation de déchets solides et humides produits par les secteurs agroalimentaire et agricole (Cas des digesteurs rural à Sidi Thabet et industriel à Hammam Sousse) ainsi que la filière de valorisation des déchets liquides (boues urbaines) issus des stations d'épuration (quelques digesteurs industriels mis en place au niveau des grands ouvrages de traitement des eaux polluées).

La biométhanisation est un procédé biologique de traitement des résidus organiques solides et liquides [6], qui aboutit à la formation d'un produit plus ou moins liquide, appelé digestat, et de biogaz, composé essentiellement de gaz carbonique et de méthane [7]. Mis à part les étapes de pré et post-traitement, la digestion anaérobie a lieu en enceinte fermée (digesteur), dans des conditions contrôlées. Le bon fonctionnement (dépollution, potentialité énergétique) de ce type de procédé est largement conditionné par les conditions physico-chimiques (nature, pH, MS,...) des substrats mis en fermentation anaérobie.

La présente étude vise essentiellement une appréciation des performances environnementales et énergétiques du digesteur pilote industriel (alimenté par des fientes avicoles), installé à Hammam Sousse (Sahel Tunisien), en se limitant à un suivi physico-chimique restreint et à la détermination de son bilan de dépollution (MES et DBO₅), et de sa productivité qualitative du biogaz (composition et pouvoir calorifique). Elle repose aussi sur une détermination des principales interventions possibles au niveau de l'installation en vue d'une meilleure production et d'une valorisation optimale des co-produits de la biométhanisation (biogaz et digestats).

1.- Matériel et méthodes

1.1.- Dispositif expérimental

1.1.1.- Site d'étude

L'étude entreprise a été accomplie dans la délégation de Hammam Sousse relevant du gouvernorat de Sousse, zone littorale à climat semi-aride (pluviométrie annuelle ne dépassant pas généralement 350 mm).

1.1.2.- Digesteur mis en place

Il s'agit d'un digesteur pilote industriel de forme cylindrique (photo 1), installé dans une ferme avicole depuis l'année 2000, d'une capacité utile de 300 m³, alimenté en

continu quotidiennement par 10 m³ de substrat composé d'environ 1/3 de fientes avicoles et 2/3 d'eau. Les quantités de fientes disponibles représentent la production journalière d'un élevage avicole en cages autour de 20000 poules pondeuses. L'installation est conçue pour traiter 4 tonnes de déjections fraîches quotidiennement et produire 200 m³ de biogaz/jour pouvant être transformés en 300 kWh électriques dont 5 à 10% seulement sont actuellement consommés par le propriétaire [8] pour alimenter des groupes électrogènes et satisfaire ainsi les besoins de la ferme et de la station en énergie électrique. En plus de l'objectif énergétique, l'unité de biométhanisation a un objectif environnemental qui consiste à réduire la pollution générée par les fientes engendrées.



Photo 1.- Vue générale de l'installation de biométhanisation industrielle avicole étudiée

Le tableau I récapitule diverses caractéristiques relatives du digesteur, alors que les quantités de chaque matière première introduite sont rapportées dans le tableau II.

Tableau I.- Quelques caractéristiques générales du digesteur
(*: Sans système de chauffage)

Type de digesteur		Industriel
Nature de substrat	Substrat	Fientes avicoles
	Inoculum	-
Capacité		300 m ³
Mode de digestion		En continu
Temps de Rétention Hydraulique (jours)		10
Température (°C)		Ambiante (*)
MS (%)	Substrat	20,9
	Inoculum	-
pH	Substrat	8,7
	Inoculum	-

Tableau II.- Quantités introduites de substrat, d'inoculum et d'eau dans le digesteur

Type de digesteur	Substrat (l)	Inoculum (l)	Eau (l)
Industriel	3,33 m ³	-	6,66 m ³

1.1.3.- Circuits des fientes avicoles

Les fientes fraîches collectées des poulaillers et après dilution (raclage avec le jus de process) passent à travers un bassin primaire avant de se regrouper dans le bassin de collecte. Dans le bassin de filtration, les fientes humides seront débarrassées des gros éléments, tels que les plumes et le sable. Les fientes fraîches passent ensuite dans le dernier bassin avant la digestion anaérobie pour la régulation du pH.

Dans le digesteur, les fientes digérées produites traversent trois bassins différents: un premier bassin recevant le substrat digéré pour un faible temps de séjour (appelé bassin des fientes digérées) avant de séjourner dans le second bassin appelé bassin de décantation ou décanteur. À partir de ce dernier, les boues des fientes décantées seront séchées et transformées en méthacompost. Quant à l'eau surnageant (jus de process) le bassin de décantation, elle passe dans le troisième bassin pour servir au raclage des fientes fraîches des poulaillers.

Il convient de noter que parallèlement à chaque opération d'alimentation par de nouvelles fientes, une même quantité de fientes traitées s'évacue à partir du trop plein vers un bassin cylindrique de collecte des fientes digérées.

1.2.- Suivi analytique

1.2.1.- Considérations générales

Le suivi a porté sur plusieurs paramètres physico-chimiques, environnementaux et énergétiques pendant une période variable entre une à quatre semaines en fonction des performances de digestion relevées. Les analyses physico-chimiques et environnementales ont été effectuées au laboratoire «biogaz» du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet en Tunisie.

Les prises des échantillons des fientes avicoles ont été faites à trois différents points de l'installation (bassins d'avant et d'après fermentation et bassin de décantation), correspondant successivement à trois phases du processus de fermentation: avant, au cours et après digestion, et ceci afin d'établir les bilans d'évolution de certains paramètres physico-chimiques étudiés tout le long de l'expérimentation, ainsi que les bilans de dépollution. De plus, un prélèvement des fientes fraîches a été effectué à partir d'un poulailler afin d'apprécier l'humidité initiale des fientes avant raclage. Quant aux analyses qualitatives de biogaz, elles ont été réalisées aux laboratoires d'analyses relevant de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte.

Les prélèvements du biogaz ont été réalisés avant et après épuration afin d'apprécier l'importance de l'épuration (désulfuration par l'hématite de fer) du biogaz produit vis-à-vis des potentialités énergétiques (pourcentage méthane, pouvoir calorifique).

1.2.2.- Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques testés se sont limités aux :

- **pH**: il constitue une mesure globale des ions hydrogène à l'aide d'un pH-mètre. On admet que le pH est le premier indicateur du mauvais fonctionnement éventuel d'un digesteur. La digestion anaérobie se déroule de façon optimale au voisinage de la neutralité ($\text{pH } 7,2 \pm 0,5$). Mais, elle est généralement possible entre pH 5 et pH 9. Une baisse de pH augmente la teneur en Acides Gras Volatiles (AGV), non ionisés, et par conséquent, les phénomènes d'inhibition sur les microorganismes [9].
- **Taux de Matière Sèche (MS)**: c'est le taux complémentaire du degré d'humidité. Il s'agit donc de déterminer le degré ou le taux d'humidité et le pourcentage d'eau dans la matière à l'aide d'un séchage à l'étuve à une température de 105°C.

1.2.3.- Paramètres environnementaux

Le suivi environnemental a été limité aux deux paramètres ci-après.

- **Matières en suspension (MES)**: elles regroupent les matières dont la densité est inférieure à la densité de l'eau. Elles correspondent à l'ensemble de particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée [10]. L'estimation de ce paramètre fait appel à trois étapes: filtration, séchage et pesage.
- **Demande biologique en oxygène (DBO₅)**: elle constitue un bon indicateur de la teneur en MO biodégradable d'une eau (toute MO biodégradable polluante entraîne une consommation d'oxygène) au cours des procédés d'autoépuration. Le principe de la mesure de la DBO₅ repose sur la quantification d'O₂ consommé après incubation de l'échantillon durant 5 jours.

1.2.4.- Suivi qualitatif de la productivité gazeuse

L'évaluation de la productivité gazeuse impose le suivi quantitatif et qualitatif du gaz produit au niveau du digesteur industriel. Suite au dysfonctionnement du débitmètre installé, le suivi quantitatif n'a pas pu être effectué et on s'est limité uniquement au suivi qualitatif qui a porté sur le biogaz prélevé, une fois inflammable, en déterminant sa composition gazeuse et son pouvoir calorifique (PC). La méthode utilisée pour le suivi de la productivité qualitative du biogaz produit est l'analyse chromatographique. Les appareils utilisés réalisent respectivement les analyses relatives à la composition de biogaz et au pouvoir calorifique.

- Composition en éléments gazeux

La qualité du biogaz est évaluée essentiellement par la mesure du pourcentage de méthane (CH₄) qu'il contient. En effet, un biogaz est d'autant meilleur que son pourcentage en méthane est élevé. Mais, elle repose aussi sur la détermination du pourcentage de dioxyde de carbone (CO₂), pourcentage de sulfure d'hydrogène (H₂S) et pourcentage d'hydrogène (H₂). Par opposition au méthane, plus les pourcentages de ces éléments sont réduits, plus la qualité du biogaz produit est meilleure. Comme matériel, il est utilisé:

- Chromatographe pour estimer la composition du biogaz,

- Système ORSAT pour la détermination du pourcentage de CO₂,
- Système pour la détermination du pourcentage de H₂S (DéTECTEUR de gaz DRÄGER).

- Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1m³ normal de gaz sec (quantité de matière gazeuse qu'occupe 1m³ dans les conditions normales de température et de pression: 0°C sous 1 atmosphère) dans l'air à une pression absolue constante.

Il s'agit d'évaluer le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) et le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) exprimés en (kcal/Nm³) et liés par la relation suivante:

$$PCS = PCI + \text{Chaleur latente de vaporisation}$$

Le PCI est l'énergie calculée lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur. Selon MOZAMBE (2002), la valeur calorifique du biogaz est proportionnelle à sa teneur en CH₄. Elle varie entre 5000 et 8500 kcal/Nm³ [11].

L'eau formée pendant la combustion est ramenée à l'état liquide, les autres produits étant à l'état de gaz. Ainsi, la chaleur latente de vaporisation est celle nécessaire pour transformer 1kg d'eau en vapeur.

Comme matériel, on a utilisé un chromatographe spécifique pour estimer le pouvoir calorifique du biogaz.

2.- Résultats et discussion

2.1.- Suivi physico-chimique restreint

2.1.1.- Évolution du pH

Les fluctuations observées du pH, mesuré une seule fois, au cours du processus de fermentation méthanique, se sont révélées régulières en hausse tout en présentant une similitude (accroissement absolu de 0,8 en passant d'un bassin à un autre).

Le bassin de mélange ou bassin d'avant fermentation, présente un pH d'environ 7,2 quant aux deux bassins d'après fermentation, ils présentent des valeurs assez élevées qui varient d'un pH de 8, dans le premier bassin recevant les fientes digérées, à un pH 8,8 dans le bassin de décantation.

Seule la valeur observée du pH au niveau du bassin de mélange est conforme avec les recommandations (pH 7,2 ± 0,5). Pour les autres bassins, ils sont aménagés à l'air libre et leur exposition aux aléas climatiques (en particulier, les pluies) pourrait être à l'origine des variations remarquables du pH.

2.1.2.- Évolution de la MS

Selon la théorie, 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 [12].

La variation des pourcentages de MS à différents points de l'installation n'est pas analogue comme pour le pH.

L'ajustement du pourcentage de MS à une valeur inférieure à 10% est une étape primordiale et très exigeante pour un meilleur déroulement du processus de fermentation, puisque les fientes avicoles fraîches présentent au départ un taux de MS égal à 20,9%. Le raclage de ces fientes avec le jus de process permet de les diluer pour obtenir un taux de MS aux alentours de 6% juste avant fermentation. La circulation des fientes raclées et son mélange avec les fientes déjà respectivement digérées et décantées dans les autres bassins permet de réduire davantage ce taux de MS. La chute du taux de MS pourrait être également expliquée par la dégradation de la MO par les microorganismes au cours de la fermentation.

Après digestion, il n'existe pas des différences nettes entre les valeurs enregistrées dans le bassin des fientes digérées et dans le décanteur. Une faible augmentation de l'ordre de 0,2% est enregistrée au niveau du décanteur.

2.2.- Établissement des bilans de dépollution

2.2.1.- Résultats relatifs aux MES

Les MES sont en baisse continue tout au long du cheminement du substrat, ce qui pourrait s'expliquer par la bonne biodégradation de la MO. Cette constatation est pleinement justifiée à travers une lecture directe des valeurs relatées dans le tableau III, qui montre une réduction supérieure à 80% des MES au niveau du bassin de décantation.

Tableau III.- Bilan de dépollution des MES

	Bilan de dépollution	
	mg/l	%
Bassin de mélange	22,50	-
Bassin des fientes digérées	17,60	78,2
Bassin de décantation	18,10	80,5

Cette biodégradation est largement due au système de digestion pratiqué, à cellules fixées, faisant appel à 6000 briques de 12 disposées en superposition et qui permet une bonne rétention des bactéries méthanogènes à l'intérieur du digesteur. Un tel système n'existe pas au niveau des digesteurs expérimentaux, où le renouvellement par alimentation-extraction réduit en partie la population méthanogène, d'où le bilan de dépollution est moindre dans le cas de la digestion expérimentale.

2.2.2.- Résultats relatifs à la DBO₅

Le tableau IV donne les résultats relevés des bilans de dépollution de la DBO₅ à deux points distincts de l'installation après fermentation. Les résultats correspondants montrent une réduction de la charge polluante dépassant 55% dans les deux cas. Cette potentialité est plus accentuée au niveau du bassin de décantation avec une différence de l'ordre de 6% par rapport au bassin des fientes digérées.

La décantation de la matière digérée favorise donc la réduction de la charge polluante. Ce qui fait que cette étape est très intéressante et les résultats sont encourageants pour allouer plus d'importance au maintien en état de fonctionnement du bassin de décantation.

Tableau IV.- Bilan de dépollution de la DBO₅

	Bilan de dépollution	
	mg/l	%
Bassin des fientes digérées	1419,535	55,2
Bassin de décantation	1584,210	61,6

2.3.- Établissement des bilans d'épuration

L'épuration consiste à éliminer non seulement les éléments traces comme la vapeur d'eau, l'hydrogène sulfuré, les composés halogénés, mais aussi le gaz carbonique, afin d'enrichir la concentration en méthane.

Le biogaz produit par le digesteur industriel subit l'épuration en faisant appel à une désulfuration avec l'hématite de fer. À cet égard, le suivi a été réalisé avant et après épuration pour apprécier l'intérêt de ce traitement. L'évaluation de la performance du conditionnement réalisé est interprétée à partir des résultats d'analyse de la composition du biogaz et de son pouvoir calorifique.

2.3.1.- Effet de l'épuration sur la composition du biogaz produit

Le tableau V indique la variation de la composition gazeuse du produit avant et après épuration.

Tableau V.- Effet de l'épuration sur la variation de la composition du biogaz produit

	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (%)
Avant épuration	60,0	30,0	10,0
Après épuration	75,0	25,0	0,0

D'après les résultats obtenus, le pourcentage de CH₄ a largement augmenté de 15% après épuration (soit, un rendement d'épuration de 25%), alors que les pourcentages de CO₂ et de H₂S, au contraire, ont diminué le premier de 5% et le deuxième de 10%. Notons que le biogaz est d'autant meilleur que son pourcentage en méthane est élevé et que les autres constituants sont réduits autant que possible.

Les résultats obtenus sont des indices du bon fonctionnement du procédé d'épuration et de la grande importance du traitement du biogaz, puisqu'il assure une réduction en éléments polluants (CO₂ et H₂S) ainsi qu'une intensification en concentration de CH₄. La désulfuration gazeuse par l'hématite de fer s'est révélée un procédé efficace du conditionnement, surtout pour l'élimination de H₂S.

2.3.2.- Effet de l'épuration sur le pouvoir calorifique

Les résultats correspondant aux PCI et PCS du biogaz produit avant et après épuration sont relatés dans le tableau VI.

Tableau VI.- Variation du PC du biogaz avant et après épuration

	PCI (kcal/Nm³)	PCS (kcal/Nm³)
Avant épuration	5110	5684
Après épuration	6389	7106

Après épuration, il y a une nette amélioration du pouvoir calorifique (soit également, un accroissement relatif de 25%). On peut dire que le biogaz industriel produit présente des potentialités énergétiques valables avant et après épuration. Toutefois, il convient d'améliorer davantage le rendement d'épuration du biogaz pour atteindre le maximum théorique égal à 8500 kcal/Nm³ [11].

2.4.- Problèmes majeurs relevés au niveau de l'installation et améliorations possibles

2.4.1.- Observations générales

Selon les résultats du suivi réalisé, l'installation présente globalement un bon fonctionnement. Toutefois, il est à noter que le biogaz n'est pas convenablement valorisé. En effet, les deux électrogénérateurs tombent souvent en panne, il n'y a pas alors des transformations du biogaz en électricité. De même, le gazomètre présente des fuites de gaz. Ceci est dû principalement à l'inclinaison du bassin d'eau due au mauvais terrassement au moment de la construction et à une déformation ultérieure lors de la construction du bassin.

Le circuit fermé de production au niveau de l'installation, permet au propriétaire d'économiser l'eau au moment du nettoyage des poulaillers. Il faut noter toutefois le nombre important de bassins qui ont presque les mêmes fonctions et qui sont parfois non nécessaires au fonctionnement normal de la station. Une telle constatation provient des transformations et des modifications apportées par le propriétaire pour une meilleure adaptation aux conditions réelles de l'exploitation.

Tenant compte de l'importance de la production de biogaz, des usages devenus de plus en plus restreints du biogaz et des fuites de plus en plus importantes, il convient d'intervenir pour réaliser les réparations nécessaires, même si elles seraient coûteuses. De telles interventions méritent d'être entreprises le plus vite possible pour la viabilité de ce projet pilote. A titre indicatif, la réparation ou le changement du débitmètre installé est fortement nécessaire pour un suivi quantitatif du biogaz produit.

2.4.2.- Principales recommandations

Les recommandations essentielles relatives ci-après méritent d'être prises en considération le plus vite possible :

- Le diagnostic complet de fonctionnement du digesteur pourrait nous renseigner davantage sur le déroulement du processus fermentaire, dans le but d'améliorer la teneur en méthane, les rendements biologique et technologique, et par conséquent, le pouvoir calorifique. Il devrait déboucher sur le relevé de toutes les anomalies de fonctionnement et la recherche de solutions convenables.

- Le dimensionnement et le choix d'un système de chauffage adapté au digesteur surtout en période hivernale. A ce propos, la solution technique à envisager consiste à utiliser une partie du biogaz produit pour le chauffage du digesteur. Cette solution permettrait de minimiser la pollution atmosphérique (l'excédent est actuellement rejeté dans la nature en quantités énormes), et d'améliorer les performances environnementales et énergétiques du digesteur.
- L'approfondissement de l'étude relative à l'efficacité du système d'épuration du biogaz pour corriger éventuellement les anomalies de fonctionnement (temps de séjour de l'hématite de fer dans les colonnes de désulfuration, ...).
- Une meilleure valorisation des digestats obtenus mérite d'être envisagée. Dans ce cadre, plusieurs solutions sont envisageables pour le post-conditionnement des résidus de la biométhanisation (digestats solide ou méthacompost et liquide ou jus de process) en vue de diversifier les possibilités d'utilisation. Il convient de signaler également que le recours à la déshydratation mécanique (système de pressage) et au conditionnement (affinage, ensilage, ...) des digestats est fortement souhaitable en vue d'une commercialisation future des méthacomposts (substitut partiel de la tourbe) pour les pépinières hors sol et du jus de process (fertigation en pleine terre et/ou hors sol). De telles valorisations pourraient couvrir les coûts engendrés par l'investissement nécessaire.
- L'orientation du propriétaire vers l'industrie des engrais organiques solides est une autre alternative envisageable. A cet égard, la solution consiste à installer un atelier de fabrication des fientes granulées après digestion et maturation (séchage-granulation des méthacomposts). Pour cela, il suffit d'acquérir et d'installer certains équipements (presse, broyeurs, tapis de transfert, ...). L'intérêt de cette alternative est double. Ainsi, en plus de la fabrication des engrais granulés pour l'agriculture, il y a une réduction importante de la pollution générée par le biogaz excédentaire (qui sera consommé en grande partie au niveau de différents postes de l'atelier de production d'engrais), d'où, une contribution à la protection de l'environnement (réduction des émissions des Gaz à Effet de Serre: GES provenant du méthane rejeté).

Conclusion

Si la biométhanisation a le mérite d'être une filière de production d'énergie à partir de sources renouvelables, sa contribution au développement durable dépasse largement cette unique plus-value. Elle constitue une source de diversification pour le monde agricole, comme elle a vite trouvé sa place comme processus de dépollution appliqué au traitement des effluents ou des déchets. Elle contribue d'une manière très significative à la réduction des émissions des GES du secteur agricole particulièrement le méthane. Quant au bilan énergétique (rapport entre l'énergie contenue dans le produit fini et l'énergie fossile utilisée dans sa production), il est particulièrement avantageux lorsque le biogaz est produit à partir d'effluents d'élevage, puisque l'énergie fossile consommée pour produire le biogaz est minimale.

L'objectif recherché est l'évaluation notamment des performances environnementales et énergétiques du digesteur considéré et la proposition de certains perfectionnements envisageables pour une meilleure exploitation.

Les suivis environnemental et énergétique, menés au niveau du digesteur pilote industriel à Hammam Sousse (Tunisie), ont permis de justifier ces deux constatations sur les potentialités environnementales et énergétiques du biogaz produit à partir des déjections animales et particulièrement à partir des fientes avicoles fraîches.

À partir de différents points de l'installation présentant, entre autres, les différentes phases du processus de biométhanisation industrielle, un suivi analytique a porté sur deux conditions physico-chimiques de fonctionnement (pH et MS) depuis le bassin de mélange jusqu'au décanteur. Les valeurs obtenues ne respectent pas toujours les normes de fonctionnement normal d'un tel digesteur.

Le biogaz subissant une étape d'épuration qui permet d'améliorer davantage respectivement le pourcentage de méthane et le PCI en passant de 60 à 75% et de 5110 à 6389 kcal/Nm³ (soit, une augmentation relative de 25%).

Cette constatation est d'autant plus justifiée en analysant les résultats du suivi des paramètres environnementaux (MES et DBO₅). Les courbes d'évolution de ces deux paramètres suivent pratiquement la même allure tout le long du procédé de biométhanisation. Les meilleurs bilans de dépollution déduits sont relatés au décanteur au niveau duquel la réduction de la charge polluante des MES est évaluée à 80,5 % et pour la DBO₅, elle est de l'ordre de 61,6 %. Les résultats obtenus prouvent, ainsi, que l'installation contribue fortement à la dépollution des fientes avicoles.

Toutefois, l'installation nécessite quelques modifications, d'une part, en vue d'améliorer davantage son efficacité en matière de performances environnementales et énergétiques, par exemple l'installation d'un système de chauffage, et d'autre part, en vue d'améliorer l'intérêt financier (rentabilité) du projet en valorisant mieux les quantités de digestats engendrés (à titre indicatif, méthacompost comme engrais solide et jus de process comme engrais liquide).

Remerciements

Nous remercions vivement tous les organismes impliqués dans ce travail qui n'a été possible que grâce à la participation de la Société Avicole Frères MHIRI localisée à Hammam Sousse, Tunisie et du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet, Tunisie qui ont mis à notre disposition respectivement le digesteur industriel et le laboratoire «Biogaz» (analyses physico-chimiques et bilan de dépollution). Nos remerciements vont également à la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte qui a contribué à la réalisation des analyses qualitatives du biogaz produit.

Références bibliographiques

- [1].- Guendouz J., Buffière P., Cacho J., Carrère M., Delgènes J. P., 2010.- Dry anaerobic digestion in batch mode: Design and operation of a laboratory-scale, completely mixed reactor. *Waste Management* 30 (10):1768-1771.
- [2].- Chavanne X. et Frang J. P., 2008.- Le rendement énergétique de la production d'éthanol à partir de maïs. *C. R. Geoscience*, 340: 263–287.
- [3].- Raynal J., Delgenks J. P. et Moletta R., 1997.- Two-phase anaerobic digestion of solid wastes by a multiple liquefaction reactors process. *Bioresource Technology*, 65: 97-103.
- [4].- Dupont L. et Accorsi A., 2005.- Explosion characteristics of synthesised biogas at

various temperatures. *Journal of Hazardous Materials*, B136: 520–525.

[5].- Kalia V. C., Kumar A., Jain S. R. et Joshi A. P., 1992.- Biomethanation of plant materials. *Biores. Technoz.*, 41: 209-212.

[6].- Basset Y. et Gosset T., 2008.- Ateliern°1: La Bio-méthanisation. Journée technique de veoliaenvironnement. Espace Tamarun, Les Salines, 23p.

[7].- Karellas S., Boukis I., Kontopoulos G., 2009.- Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 1273–1282.

[8].- ANER, 2003.- Etude stratégique pour le développement des énergies en Tunisie, Bilan des réalisations et rapport final de l'Agence Nationale des Energies Renouvelables (ANER), Alcor–Axenne: 148-157.

[9].- Moletta R., 1989.- Contrôle et conduite des digesteurs anaérobies. *Revue des sciences de l'eau*, 2: 265-293.

[10].- Ramade F., 1993.- Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement, Édiscience internationale, Paris, 822 p.

[11].- Mozambe M., 2002.- La problématique de la biométhanisation en République démocratique du Congo. Université du Québec, 38 p.

[12].- Akrouit J., 1992.- Etude énergétique de la fermentation méthanique des fientes de volailles: optimisation des facteurs influant et modélisation du système. Doctorat de Spécialité, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis, 143 p.