

Evaluation des performances et améliorations possibles d'une installation pilote de biométhanisation industrielle appliquée aux fientes avicoles dans le Sahel Tunisien

Youssef M'Sadak^{*}, Abir Ben M'Barek[†] et Rahma Ines Zoghلامي

Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel
Institut Supérieur Agronomique de Chott-Meriem
B.P. N°47, 4042 Sousse, Tunisie

(reçu le 01 Avril 2010 – accepté le 25 Juin 2011)

Résumé - Le présent travail consiste à étudier la fermentation méthanique, appliquée aux fientes avicoles, effectuée au niveau du digesteur pilote industriel de Hammam Sousse, Tunisie. Le suivi analytique de ce digesteur a porté, d'une part, sur la détermination des caractéristiques de l'effluent avicole par l'analyse des paramètres physico-chimiques et environnementaux, et d'autre part, sur le suivi énergétique par l'appréciation de la productivité qualitative (composition et pouvoir calorifique) du biogaz produit. L'objectif final est l'évaluation des performances du digesteur adapté et l'apport de certaines améliorations envisageables pour une meilleure adaptation aux conditions existantes. Cette étude a permis de ressortir un certain nombre de constatations dont on peut citer: - les meilleurs bilans de dépollution sont obtenus au niveau du bassin de décantation, aussi bien concernant les MES que la DBO₅; - l'intérêt du recours à l'épuration du biogaz produit, qui a été démontré en comparant les résultats avant et après épuration, tant sur le plan composition gazeuse que sur le plan pouvoir calorifique; - l'installation de bio méthanisation considérée nécessite quelques améliorations particulièrement pour une meilleure productivité énergétique qualitative, une meilleure réduction du pouvoir polluant des fientes et une meilleure valorisation des résidus solides et liquides.

Abstract - This work consists in studying the biomethanisation, applied to the avicolous droppings, established on the level of the pilot industrial digester in Hammam Sousse, Tunisia. The analytical follow-up of this digester related, on the one hand, to the determination of the characteristics of the avicolous effluent by the analysis of the physical, chemical and environmental parameters, and on the other hand, on the energy follow-up by the appreciation of the qualitative productivity (composition and calorific value) of biogas produced. The final objective being the performance evaluation of the adopted digester and the contribution of certain possible improvements for a better adaptation to the existing conditions. This study made it possible to arise certain number of observations which one can quote: - the best assessments of depollution are obtained on the level of the mud tank as well concerning MES as the DBO₅; - the interest of the recourse to the purification of produced biogas was shown by comparing the results before and after purification as well on the gas composition and the calorific value; - the installation of biomethanisation considered particularly requires some improvements for better qualitative productivity of energy, a better reduction of the power polluting of the droppings and a better valorization of the solid and liquid residues.

Mots clés: Digesteur industriel - Fientes avicoles - Bilan de dépollution - Composition gazeuse - Pouvoir calorifique - Rendement d'épuration.

* msadak.youssef@yahoo.fr

† mb_abiroucha@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

La fermentation méthanique est, aujourd'hui, la filière bioénergétique aux perspectives les plus prometteuses [15]. Son application industrielle, après les progrès de ces dernières années de recherches, commence à devenir une réalité [5, 17]. En effet, les techniques disponibles sont d'ores et déjà suffisamment performantes pour rendre les systèmes proposés économiquement acceptables. Mais, ceci ne constitue qu'un point de départ convenable. La poursuite des recherches permettra, à l'avenir, d'améliorer encore et d'optimiser ces systèmes [5].

En Tunisie, les technologies de bio méthanisation sont relativement nouvelles [2]. 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 ruraux à Sidi Thabet et industriels 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 dégradation de la matière organique, 'MO' par voie anaérobie est de plus en plus reconnue comme méthode fondamentale d'une technologie avancée permettant la protection de l'environnement et la conservation des ressources [3-5, 10, 15, 16, 18, 19]. 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 œuvre.

La présente étude vise essentiellement une évaluation des performances environnementales et énergétiques du digesteur pilote industriel (alimenté par des fientes avicoles) installé dans le Sahel Tunisien (Hammam Sousse, Sousse), en se limitant à un suivi physico-chimique restreint et à la détermination de son bilan de dépollution {Matières en Suspension, 'MES' et Demande Biologique en Oxygène, 'DBO₅'} et de sa productivité qualitative du biogaz (composition et pouvoir calorifique).

Elle repose aussi sur une détermination de 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).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Dispositif expérimental

2.1.1 Présentation technique du digesteur étudié

Il s'agit d'un digesteur pilote de forme cylindrique (Fig. 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 d'un tiers de fientes avicoles et de deux tiers 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 quatre (04) 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 [2] 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.



Fig. 1: Digesteur industriel à Hammam Sousse

2.1.2. 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 (Fig. 2).

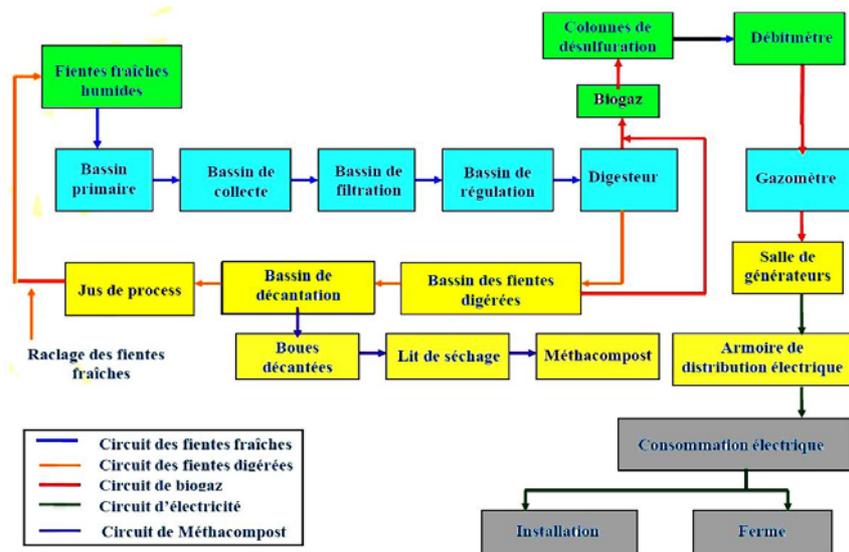


Fig. 2: Schéma synoptique de divers circuits de bio méthanisation

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.

A partir de ce dernier, les boues des fientes décantées seront séchées et transformées en méthanocompost. 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 (Fig. 2).

2.2 Suivi analytique

Le suivi a porté sur plusieurs paramètres physico-chimiques, environnementaux et énergétiques pendant une période variable entre une à quatre semaines e fonction de 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, Tunisie.

Les prises d'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 aux 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) du biogaz produit vis-à-vis des potentialités énergétiques (pourcentage de méthane, pouvoir calorifique).

2.2.1 Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques testés se sont limités aux:

2.2.1.1 pH

Le pH 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 (pH 7.2 ± 0.5). Mais, elle est généralement possible entre pH 5 et pH 9. Une baisse de pH augmente la teneur en Acides Gras Volatils, 'AGV', non ionisés, et par conséquent, les phénomènes d'inhibition sur les microorganismes [10].

2.2.1.2 Taux de matière sèche

Le taux de Matière Sèche, 'MS', est le taux complémentaire du degré d'humidité. Il s'agit donc de déterminer le degré ou taux d'humidité et le pourcentage d'eau dans la matière à l'aide d'un séchage à l'étuve.

2.2.2 Paramètres environnementaux

Le suivi environnemental a été limité aux deux paramètres suivants:

2.2.2.1 Matières en suspension

Les Matières en Suspension, 'MES', 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 [13]. L'estimation de ce paramètre fait appel à trois étapes: filtration, séchage et pesage.

2.2.2.2 Demande biologique en oxygène (DBO₅)

La Demande Biologique en Oxygène 'DBO₅' constitue un bon indicateur de la teneur en Matières Organiques, 'MO', biodégradables 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 de l'oxygène, consommé après incubation de l'échantillon durant cinq (05) jours.

2.2.3 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'.

2.2.3.1 Composition en éléments gazeux

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

2.2.3.2 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 m³ Normal de gaz sec (quantité de matière gazeuse qu'occupe 1 m³ 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 1 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 [11], la valeur calorifique du biogaz est proportionnelle à sa teneur en CH₄. Elle varie entre 5000 et 8500 kcal/Nm³.

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.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Suivi de certaines conditions physico-chimiques

3.1.1 Evolution du pH

La figure 2 ci-après montre les fluctuations du pH, mesuré une seule fois, au cours du processus de fermentation méthanique.

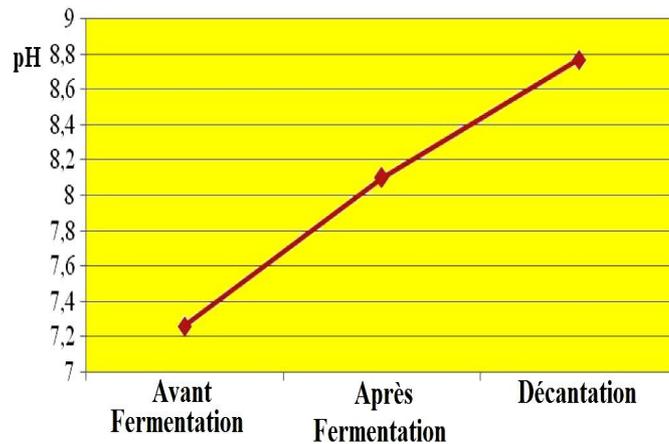


Fig. 3: Evolution du pH au cours du processus de biométhanisation

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 assez alcalin égal 8,8 dans le bassin de décantation.

Seule la valeur observée du pH au niveau du bassin de mélange est conforme avec les recommandations ($\text{pH } 7.2 \pm 0.5$). 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.

3.1.2 Evolution de la matière sèche, 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 [1].

La variation du pourcentage de la MS à différents points de l'installation est représentée par la figure 4 ci-après.

L'ajustement du pourcentage de matière sèche, 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 matière sèche 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 matière sèche.

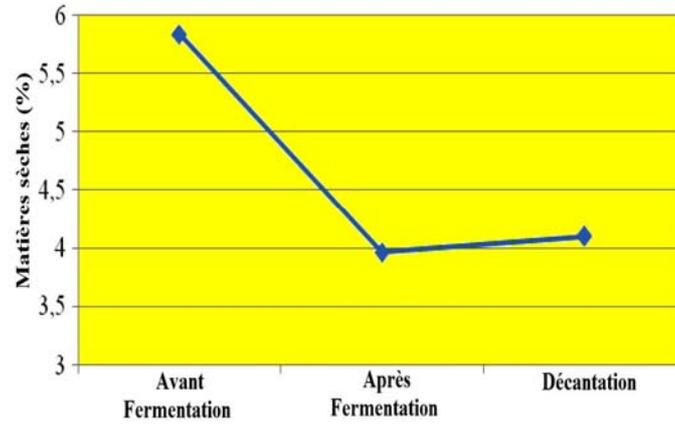


Fig. 4: Evolution de la matière sèche, MS, à différents points de l'installation

La chute du taux de MS, pourrait être également expliquée par la dégradation de la MO par les micro-organismes 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.

3.2 Etablissement des bilans de dépollution

3.2.1 Résultats relatifs aux matières en suspension, MES

L'évolution du taux de matières en suspension, MES au cours de différentes phases de fermentation est décrite par la courbe représentée sur la figure 5.

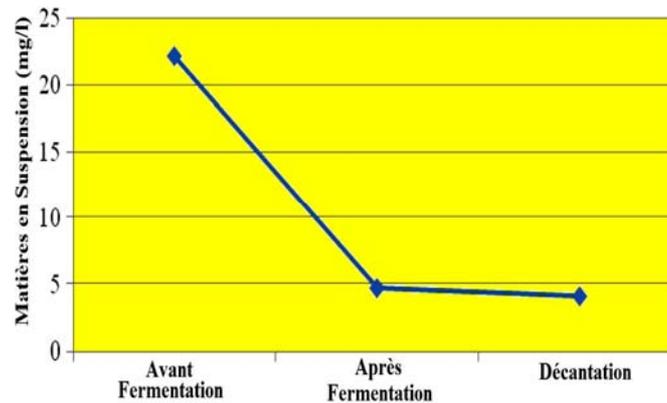


Fig. 5: Evolution des matières en suspension, MES au cours de la fermentation

Les MES sont en baisse continue tout au long du cheminement du substrat, ce qui pourrait s'expliquer par la bonne biodégradation de la matière organique, MO. Cette constatation est pleinement justifiée à travers une lecture directe des valeurs données au **Tableau 1**, qui montre une réduction supérieure à 80 % des MES au niveau du bassin de décantation.

Tableau 1: Bilan de dépollution des matières en suspension, 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.

3.2.2 Résultats relatifs à la demande biologique en oxygène, DBO₅

La figure 6 montre la variation des valeurs de la DBO₅, au cours de différentes phases de biométhanisation.

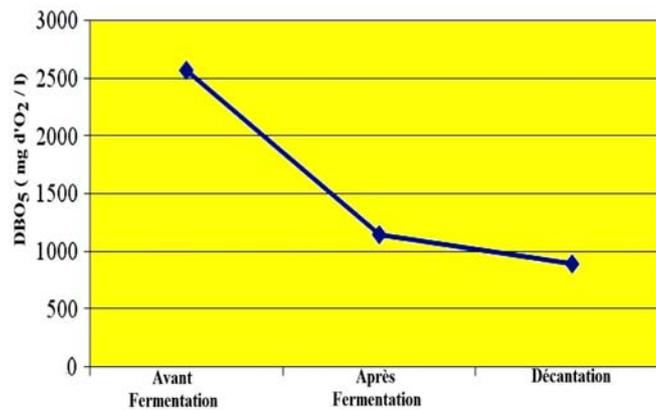


Fig. 6: Evolution de la demande biologique en oxygène, DBO₅ au cours de la fermentation

La courbe d'évolution spatio-temporelle de la DBO₅ est pratiquement superposable à celle des MES, ce qui permet de dégager les mêmes constatations.

Le **Tableau 2** présente 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 donner plus d'importance au maintien en état de fonctionnement du bassin de décantation.

Tableau 2: Bilan de dépollution de la demande biologique en oxygène, DBO₅

	Bilan de dépollution	
	mg/l	%
Bassin des fientes digérées	1419.535	55.2
Bassin de décantation	1584.210	61.6

3.3 Etablissement 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. A 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.

3.3.1 Effet de l'épuration sur la composition du biogaz produit

La figure 7 illustre la variation de la composition gazeuse du produit avant et après épuration.

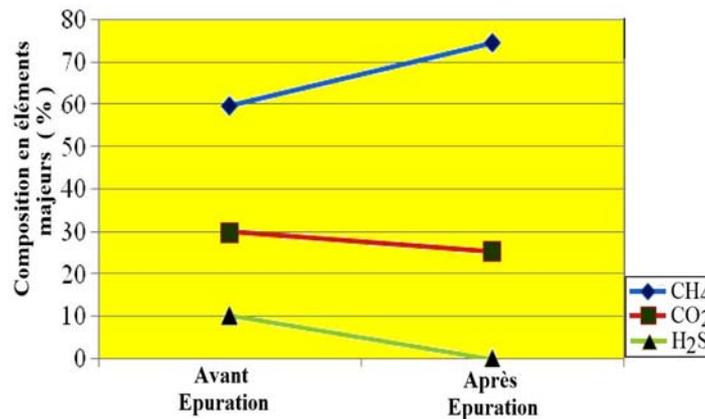


Fig. 7: Effet de l'épuration sur la variation de la composition du biogaz produit

D'après les résultats obtenus, le pourcentage en méthane, CH₄ a largement augmenté de 15 % après épuration, alors que les pourcentages respectivement en gaz carbonique, CO₂ et en hydrogène sulfuré, H₂S, au contraire, ont diminué le premier de presque 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 davantage une réduction en éléments polluants (CO_2 et H_2S), ainsi qu'une intensification en concentration de méthane, CH_4 .

3.3.2 Effet de l'épuration sur le pouvoir calorifique

Les résultats correspondant au Pouvoir Calorifique Inférieur, 'PCI' et au Pouvoir Calorifique Supérieur, 'PCS' du biogaz produit avant et après épuration sont présentés au **Tableau 3**.

Tableau 3: Variation du PC du biogaz avant et après épuration

	PCI (kcal/Nm ³)	PCS (kcal/Nm ³)
Avant épuration	5110	5684
Après épuration	6389	7106

Après épuration, il y a une nette amélioration du pouvoir calorifique. 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].

4. PROBLEMES MAJEURS RELEVES AU NIVEAU DE L'INSTALLATION ET AMELIORATIONS POSSIBLES

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 électro générateurs tombant 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. On note toutefois le nombre important des 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. Des telles interventions méritent d'être entreprises le plus vite que 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.

4.2 Principales recommandations

Les recommandations essentielles présentées 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 des 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. Parmi les solutions réalisables, on peut citer celles présentées sur la figure suivante.

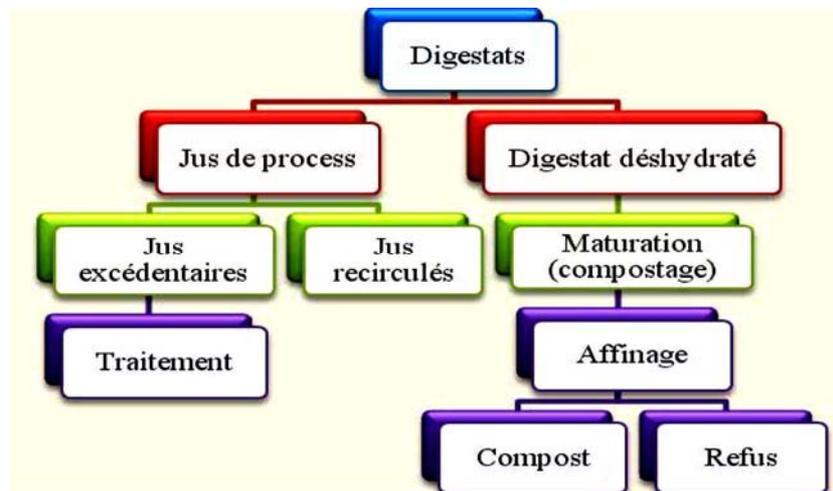


Fig. 8: Divers conditionnements possibles des digestats

Il convient de signaler également que le recours à la déshydratation mécanique (système de pressage) et au conditionnement (affinage, ensachage,...) 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).

5. CONCLUSION

Si la biométhanisation a le mérite d'être une filière de production d'énergie à partir de sources d'énergie renouvelables, sa contribution au développement durable dépasse largement cette plus value [7, 15]. Elle constitue une source de diversification pour le monde agricole, comme elle a vite trouvé sa place comme processus de dépollution appliquée au traitement des effluents ou des déchets. Elle contribue d'une manière très significative à la réduction des émissions des Gaz à Effet Serre, 'GES' du secteur agricole particulièrement le méthane [3, 6-9, 12, 19].

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 [13].

Les suivis environnemental et énergétique, menés au niveau du digesteur pilote industriel à Hammam Sousse, 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.

A 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 physicochimiques 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.

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 a besoin de quelques modifications en vue d'améliorer davantage son efficacité en matière de performances environnementales et énergétiques, comme par exemple l'installation d'un système de chauffage ou bien en vue d'améliorer

l'intérêt financier (rentabilité) du projet en valorisant mieux les quantités de digestats produits (méthacompost comme fraction solide et jus de process comme fraction liquide).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient 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 (C.F.P.A.E.B.) de Sidi Thabet, Tunisie, qui ont mis à leur disposition respectivement le digesteur industriel, le digesteur rural et le laboratoire 'Biogaz' (détermination du bilan de dépollution) avec ses digesteurs expérimentaux. Il en est de même pour la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (S.T.I.R.) de Bizerte, qui a contribué à la réalisation des analyses qualitatives du biogaz produit.

REFERENCES

- [1] J. Akrouf, '*Etude Energétique de la Fermentation Méthanique des Fientes de Volailles: Optimisation des Facteurs Influent et Modélisation du Système*', Doctorat de Spécialité, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis, 143 p., 1992.
- [2] Alcor – Axenne, '*Etude Stratégique pour le Développement des Energies en Tunisie. Bilan des Réalisations*', Agence Nationale des Energies Renouvelables, 'ANER', pp. 148 – 157, 2003.
- [3] I. Angelidaki and L. Ellegaard, '*Codigestion of Manure and Organic Wastes in Centralized Biogas Plants*', Applied Biochemistry and Biotechnology, Vol. 109, N°1-3, pp. 95 - 105, 2003.
- [4] F. Béline et A. Gac, '*La Méthanisation: un Moyen de Valoriser la Matière Organique des Déjections Animales et de Réduire les Emissions de Gaz à Effet de Serre*', Sinfotech – Les fiches Savoir-Faire, Cemagref, 4 p., 2007.
- [5] P. Brondeau, B. de La Farge and M. Héduit, '*Un Nouveau Procédé de Fermentation Méthanique en Continu pour les Lisiers: Production d'Energie, Dépollution et Désodorisation*', Génie Rural, N°1-2, pp. 5 - 10, Janvier-Février 1982.
- [6] H. Fruteau et Y. Membrez, '*Réalisation d'un Référentiel Technico-Economique des Unités de Méthanisation de Produits Organiques Agricoles et non Agricoles à Petite Echelle en Europe lots 1 et 2*', EREP SA, 11 p., 2004.
- [7] J.B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi and Oleskowicz-Popiel, '*The Future of Anaerobic Digestion and Biogas Utilization*', Bioresource Technology, Vol. 100, N°22, pp. 5478 – 5484, 2009.
- [8] A. Lehtomäki, S. Huttunen and J.A. Rintala, '*Laboratory Investigations on Co-Digestion of Energy Crops and Crop Residues with Cow Manure For Methane Production: Effect of Crop to Manure Ratio*', Resources, Conservation and Recycling, Vol. 51, N°3, pp. 591-609, 2007.
- [9] M. Macias-Corral, Z. Samani, A. Hanson, G. Smith, P. Funk, H. Yu and J. Longworth, '*Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste and Agricultural Waste*

- and the Effect of Co-Digestion With Dairy Cow Manure. *Bioresource Technology*, Vol. 99, N°17, pp. 8288 - 8293, 2008.
- [10] R. Moletta, 'Contrôle et Conduite des Digesteurs Anaérobies', *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 2, N°2, pp. 265-293, 1989.
- [11] M. Mozambe, 'La Problématique de la Biométhanisation en République Démocratique du Congo', Université du Québec, 38 p., 2002.
- [12] M. Pognani, G. D'Imporzano, B. Scaglia and F. Adani, 'Substituting Energy Crops With Organic Fraction of Municipal Solid Waste for Biogas Production at Farm Level: a Full-Scale Plant Study', *Process Biochemistry*, Vol. 44, N°8, pp. 817 - 821, 2009.
- [13] F. Ramade, 'Dictionnaire Encyclopédique de l'Ecologie et des Sciences de l'Environnement', Ediscience Internationale, Paris, 1993.
- [14] J. Raynal, J.P. Delgenes and R. Moletta, 'Two-Phase Anaerobic Digestion of Solid Wastes by a Multiple Liquefaction Reactors Process', *Bioresource Technology*, Vol. 65, N°1, pp. 97 - 103, 1998.
- [15] A. Schievano, M. Pognani, G. D'Imporzano and F. Adani, 2008. 'Predicting Anaerobic Biogasification Potential of Ingestates and Digestates of a Full-Scale Biogas Plant Using Chemical and Biological Parameters', *Bioresource Technology*, Vol. 99, N°17, pp. 8112 – 8117, 2008.
- [16] I. Tou, S. Igoud et A. Touzi, 'Production de Biométhane à partir des Déjections Animales', *Revue des Energies Renouvelables: Production et Valorisation – Biomasse*, pp. 103 - 108, 2001.
- [17] L. van den Berg, 'Anaerobic Digestion of Wastes', *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 5, N°1, pp. 5 – 14, 1982.
- [18] D. Verrier, J.N. Morfaux, G. Albagnac and J.P. Touzel, 'The French Programme on Methane Fermentation', *Biomass*, Vol. 2, N°1, pp. 17 – 28, 1982.
- [19] P.W. Westerman and J.R. Bicudo, 'Management Considerations for Organic Waste Use in Agriculture', *Bioresource Technology*, Vol. 96, N°2, pp. 215 - 221, 2005.