
Soumis le : 30 Avril 2010
 Forme révisée acceptée le : 10 Février 2011
 Email de l'auteur correspondant :
 msadak.youssef@yahoo.fr

Évaluation des performances environnementales et énergétiques d'une installation pilote de biométhanisation industrielle appliquée aux fientes avicoles

M'Sadak Youssef *, Ben M'barek Abir *, Zoghlami Rahma Inès*

* Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem , CP 4042, Université de Sousse, Tunisie

Résumé

En Tunisie, les technologies de biométhanisation sont relativement nouvelles. Dans le secteur agricole, on parle de la filière de valorisation de déjections animales produites (Cas des digesteurs rural à Sidi Thabet et industriel à Hammam Sousse, Tunisie).

Le présent travail consiste à étudier la fermentation méthanique, appliquée aux fientes avicoles, établie au niveau du digesteur pilote industriel de Hammam Sousse. Le suivi analytique de ce digesteur a porté, d'une part, sur la détermination de certaines caractéristiques de l'effluent avicole par l'analyse des paramètres physico-chimiques (pH et MS) et environnementaux (MES et DBO₅), et d'autre part, sur le suivi énergétique par l'appréciation de la productivité qualitative (composition et pouvoir calorifique) du biogaz produit.

Mots clés: Digesteur industriel; fientes avicoles ; bilan de dépollution ; composition gazeuse ; pouvoir calorifique ; rendement d'épuration.

1. Introduction

Les émissions atmosphériques des composés polluants sont de plus en plus au centre des préoccupations environnementales [6 ; 11] en raison de leurs effets de serre et de l'impact relatif sur le changement climatique [14 ; 20]. En effet, les années 90 ont été marquées par une préoccupation de plus en plus importante de la communauté internationale des questions de réchauffement planétaire, dû au rejet des GES (Gaz à Effet de Serre), essentiellement d'origine énergétique [2].

La fermentation méthanique est, aujourd'hui, la filière bioénergétique aux perspectives les plus prometteuses [19]. Son application industrielle, après les progrès des dernières années de recherches, commence à devenir une réalité [5, 23]. 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].

La technologie de biométhanisation des déchets organiques solides est aujourd'hui en plein essor en Europe [21]. En Tunisie, les technologies de biométhanisation 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 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 dégradation de la MO par voie anaérobie est de plus en plus reconnue comme méthode fondamentale d'une technologie avancée permettant la protection de l'environnement [4 ; 5 ; 19 ; 3 ; 26] et la conservation des ressources [22 ; 24 ; 12]. 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 à Hammam Sousse, 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 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. Matériel et méthodes

2.1. Dispositif expérimental

Présentation technique du digesteur étudié :

Il s'agit d'un digesteur pilote 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 [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.

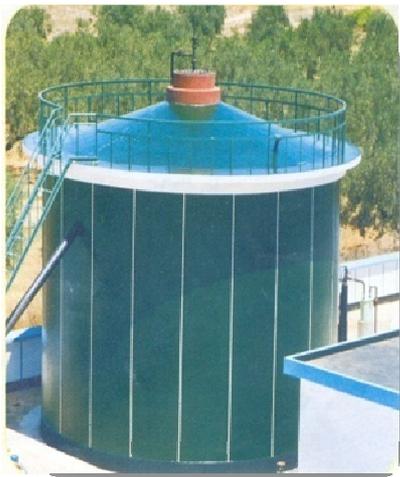


Photo 1. Digesteur industriel à Hammam Sousse

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 la station, les fientes digérées produites traversent trois bassins différents (Photo 2) : 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.



Photo 2. Vue générale de l'unité industrielle de production de biogaz de Hammam Sousse

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.

2.2. Suivi analytique

Le suivi a porté sur plusieurs paramètres physico-chimiques, environnementaux et énergétiques. Les analyses physico-chimiques et environnementales ont été effectuées au laboratoire « biogaz » du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Élevage 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 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) du biogaz produit vis-à-vis des potentialités énergétiques (% méthane, pouvoir calorifique).

Suivi des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques contrôlés se sont limités aux éléments ci-après.

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.

Les bactéries anaérobies et notamment les bactéries méthanogènes sont sensibles aux variations du pH [8]. Le pH optimal du processus de biométhanisation se situe entre 6,5 et 7,5 [18 ; 25]. Une baisse du pH augmente la teneur en Acides Gras Volatils (AGV), non ionisés, et par conséquent, les phénomènes d'inhibition sur les microorganismes [12].

Taux de Matière Sèche : Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. Ainsi, pour se développer correctement, les micro-organismes présents dans le digesteur ont besoin d'une quantité d'eau élevée. Une teneur en humidité de 50% dans le milieu réactionnel semble être un minimum pour permettre le développement des populations bactériennes [22].

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 de l'échantillon à l'étuve.

Suivi des paramètres environnementaux

Matières En Suspension : Les matières en suspension (MES) correspondent à l'ensemble de particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée [16]. Le principe de mesure des MES est la filtration sous vide ou sous pression de l'échantillon.

Les nuisances dues aux MES sont de deux types : Une action mécanique qui conduit à la formation de sédiments, à l'augmentation de la turbidité de l'eau, ce qui limite la pénétration des rayonnements et peut occasionner des lésions à la faune, ainsi qu'une action chimique, les MES nécessitant de l'oxygène pour leur métabolisation.

L'échantillon est filtré sur fibre de verre sous vide ou sous pression et séché à l'étuve à 105°C. Le résidu déposé sur le filtre est pesé et les résultats sont exprimés en mg/l.

Demande Biologique en Oxygène : La Demande Biologique en Oxygène (DBO₅) correspond à la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'échantillon à analyser pour oxyder les matières organiques, dissoutes ou en suspension dans l'eau de l'échantillon. Il s'agit donc d'une consommation potentielle d'oxygène par voie biologique.

Ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en matières organiques biodégradables d'une eau (toute matière organique biodégradable polluante entraîne une consommation de l'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 5 jours. Au cours de l'incubation de l'échantillon, se produisent des réactions physico-chimiques et biologiques, qui se traduisent par une métabolisation des matières organiques et une consommation d'oxygène.

Si l'eau contient des concentrations en substances réductrices importantes, celles-ci absorbent rapidement l'oxygène de l'eau. Cette phase achevée, deux réactions d'oxydation se produisent : Une oxydation lente par voie chimique des composés organiques et minéraux, et une métabolisation des matières organiques assimilables.

La DBO a été fixée à 5 jours. La méthode de mesure de la DBO₅ consiste en l'incubation de l'échantillon du substrat en présence de solutions salines, d'une solution de phosphate et d'ATU (Allyl Thio Urée) pendant 5 jours, à l'obscurité et à 20°C. Les résultats sont exprimés en mg d'O₂/l.

Suivi qualitatif de la productivité gazeuse

L'évaluation de la productivité gazeuse impose les suivis quantitatif et qualitatif du gaz produit au niveau du digesteur considéré. Suite au dysfonctionnement du débitmètre installé, le suivi quantitatif n'a pas été 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.

Composition en éléments gazeux : La qualité du biogaz est évaluée essentiellement par la mesure du % méthane (CH₄) qu'il contient. En effet, le biogaz est d'autant meilleur que son % méthane est élevé.

Pour cette analyse de composition, on a eu recours à la technique de chromatographie en phase gazeuse (Photo 3)

qui permet de séparer des molécules d'un mélange éventuellement très complexe de nature et de volatilité très diverses. Elle s'applique principalement aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Le mélange à analyser est vaporisé à l'entrée d'une colonne, qui renferme une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire, puis il est transporté à travers celle-ci à l'aide d'un gaz porteur (azote liquide N_2). Les différentes molécules du mélange vont se séparer et sortir de la colonne les unes après les autres après un certain laps de temps qui est fonction de l'affinité de la phase stationnaire avec ces molécules.



Photo 3. Chromatographe en Phase Gazeuse pour évaluer la composition en méthane

L'étude la composition gazeuse repose aussi sur la détermination du % dioxyde de carbone (CO_2), du % sulfure d'hydrogène (H_2S) et du % hydrogène (H_2). Par opposition au méthane, plus les % de ces éléments sont réduits, plus la qualité du biogaz produit est meilleure.

Les appareils illustrés ci-après (Photos 4 et 5) réalisent d'autres analyses relatives à la composition de biogaz respectivement en CO_2 et en H_2S .

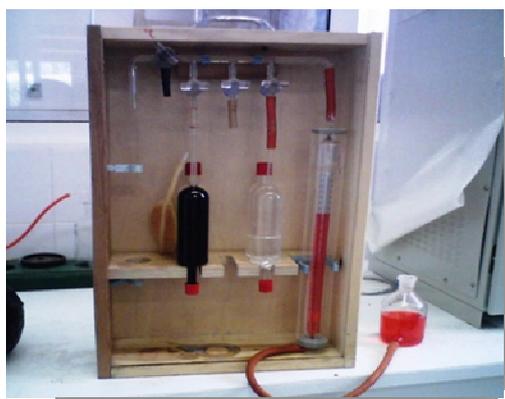


Photo 4. L'ORSAT : Dispositif de mesure du % CO_2



Photo 5. Le DRAGER : Dispositif de mesure du % H_2S

Pouvoir calorifique : Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 m^3 Normal de gaz sec (quantité de matière gazeuse qu'occupe 1 m^3 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/Nm^3) et liés par la relation suivante :

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 CH_4 . Elle varie entre 5000 et $8500\text{ kcal}/\text{Nm}^3$.

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 1 kg d'eau en vapeur.

L'appareil illustré ci-après (Photo 6) réalise les analyses relatives au pouvoir calorifique.



Photo 6. Chromatographe pour estimer le Pouvoir Calorifique du biogaz

2.3. Analyse statistique des résultats

Les résultats obtenus ont été interprétés en utilisant le logiciel statistique SPSS.17. L'interprétation fait appel respectivement à l'Analyse de la Variance (ANOVA) et à la Comparaison des Moyennes des différents types de traitement (Test Duncan) tout en recherchant là où les moyennes sont considérées comme étant égales. Si au contraire, il y a une différence significative, le Test Duncan permet de compléter l'interprétation et d'identifier les groupes de moyennes homogènes.

3. Résultats et discussion

3.1. Suivi de certaines conditions physico-chimiques

Évolution du pH : La figure 1 montre les variations du pH, mesuré une seule fois, au cours du processus de fermentation méthanique.

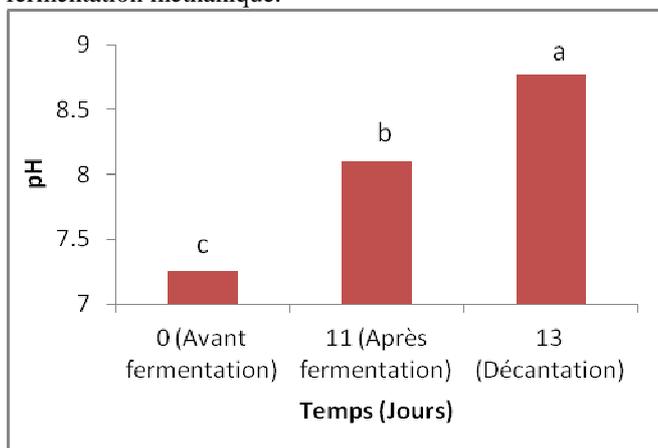


Figure 1. Évolution du pH au cours du processus de biométhanisation

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 8,2 dans le premier bassin recevant les fientes digérées, à un pH assez alcalin égal à 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 $7,2 \pm 0,5$). 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.

Évolution de la MS : La variation des % MS à différents points de l'installation est représentée par la figure 2.

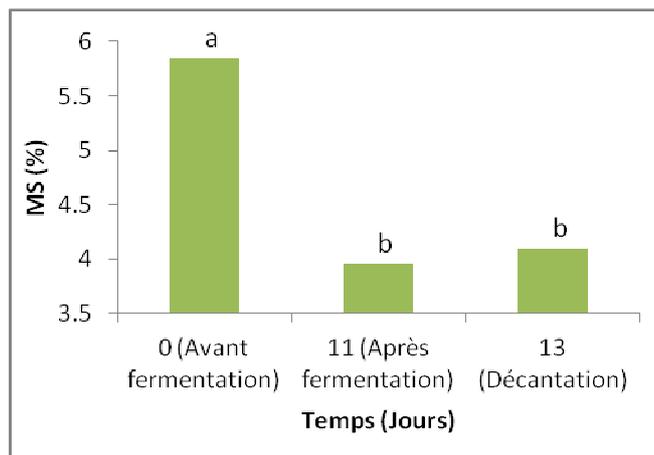


Figure 2. Évolution de la MS à différents points de l'installation

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]. L'ajustement du % 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 leur 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 micro-organismes au cours de la fermentation.

Après digestion, il n'existe pas des différences significatives entre les valeurs enregistrées dans le bassin des fientes digérées et dans le décanteur.

À la sortie du digesteur, la concentration de l'effluent récupéré en MS est aux alentours de 4 %, ce qui le stabilise biologiquement et réduit ainsi considérablement les odeurs néfastes.

3.2. Établissement des bilans de dépollution

Réduction de la charge polluante des MES

L'évolution du taux des MES au cours de différentes phases de fermentation est décrite par le graphique représenté sur la figure 3.

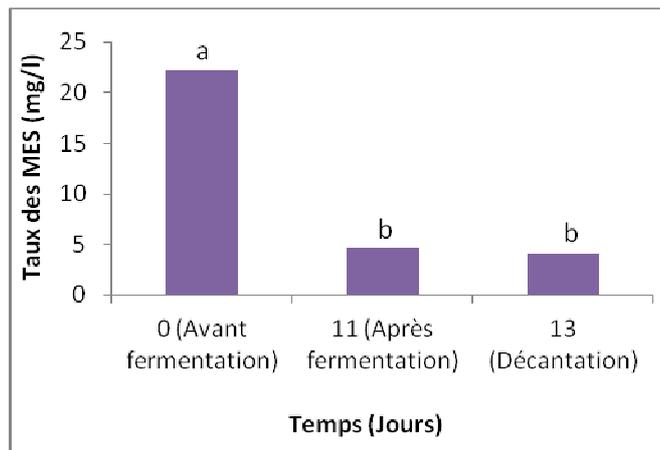


Figure 3. Évolution des MES au cours de la fermentation

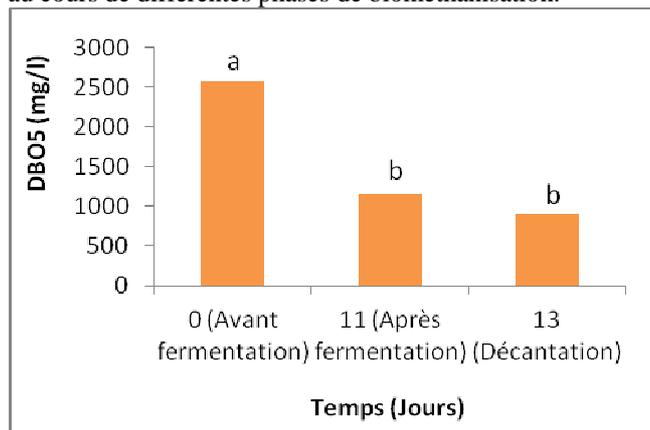
Les MES sont en baisse continue tout au long du cheminement du substrat, ce qui pourrait s'expliquer par la bonne biodégradation de la MO.

La réduction de cette charge polluante est plus importante au niveau du bassin de décantation (80,5 %) contre 78,2 % pour le bilan de dépollution de la charge existante au niveau du bassin des fientes digérées.

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.

Réduction de la charge polluante de la DBO₅

La figure 4 montre la variation des valeurs de la DBO₅ au cours de différentes phases de biométhanisation.

Figure 4. Évolution de la 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.

Les résultats correspondants montrent une réduction de la charge polluante dépassant 55 % suite à la digestion

anaérobie des fientes avicoles. Cette potentialité est plus accentuée au niveau du bassin de décantation par rapport au bassin des fientes digérées (55,2 % contre 61,6 %).

La décantation de la matière digérée favorise donc la réduction de la charge polluante, ce qui fait que le pouvoir de dépollution est appréciable et les résultats sont encourageants pour donner plus d'importance au maintien en état de fonctionnement du bassin de décantation.

3.3. 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 une 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.

Effet de l'épuration sur la composition du biogaz produit

La figure 5 illustre la variation de la composition gazeuse du produit avant et après épuration.

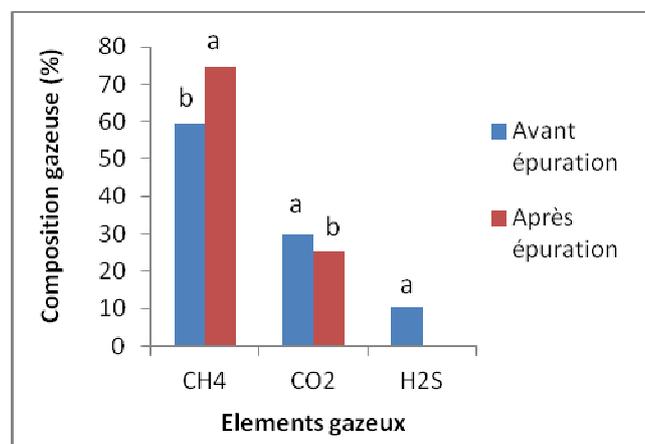


Figure 5. Effet de l'épuration sur la composition du biogaz produit

D'après les résultats obtenus, le % CH₄ a largement augmenté de 15 % après épuration, alors que les % CO₂ et % 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 (% CH₄) est élevé et que les autres constituants sont réduits autant que possible.

En général, il est conseillé de traiter le biogaz pour limiter la corrosion des appareils faisant appel à son usage. Cette corrosion est due à l'hydrogène sulfuré, mais aussi à la présence d'eau et de gaz carbonique (qui forme un acide

faible lorsqu'il est dissous dans l'eau) et parfois à la présence de composés chlorés (cas des gaz de décharge).

Le % H₂S a été réduit presque complètement suite à l'épuration. Avant traitement, un tel taux (10,3 %) engendre le phénomène de corrosion et l'épuration du biogaz produit s'avère fortement recommandée avant utilisation. D'où, la nécessité pratique de l'épuration du biogaz avicole. Selon [13], le % H₂S doit être présent sous forme de traces, ce qui est le cas après traitement.

Les % élevés de H₂S peuvent être expliqués par l'acidité élevée de la biomasse avicole.

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 (CO₂ et H₂S) ainsi qu'une intensification en concentration CH₄.

Certains usages nécessitent un traitement poussé, non seulement pour supprimer le risque de corrosion, mais aussi pour augmenter le % CH₄. C'est le cas pour l'utilisation comme carburant sur véhicules.

Au niveau de cette installation, une partie du biogaz produit est utilisée pour des usages thermiques de cuisson et de chauffage de l'eau dans la ferme. Toutefois, la grande partie du gaz produit est utilisée pour la production d'électricité grâce à deux électrogénérateurs de 24 kVA chacun, fonctionnant en alternance.

Effet de l'épuration sur le pouvoir calorifique

Après épuration, il y a une nette amélioration du pouvoir calorifique (Figure 6). On peut dire que le biogaz industriel produit présente des potentialités énergétiques satisfaisantes avant et après épuration.

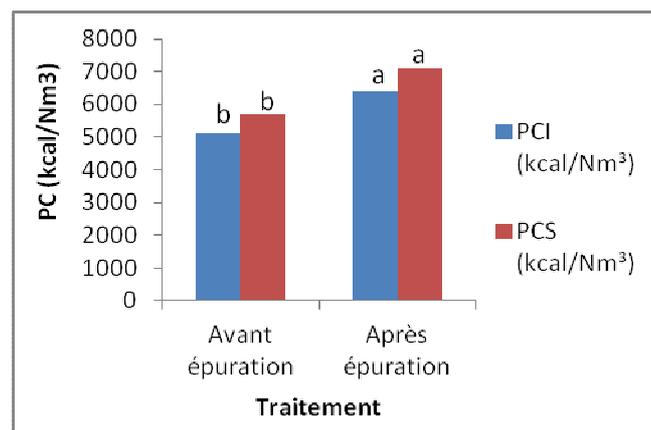


Figure 6. Variation du Pouvoir Calorifique du biogaz avant et après épuration

Toutefois, il convient d'améliorer encore le rendement d'épuration du biogaz pour rejoindre le maximum théorique égal à 8500 kcal/Nm³ [13].

3.4. 2.4. Problèmes majeurs relevés au niveau de l'installation et améliorations possibles

Observations générales

Selon les résultats du suivi réalisé, l'installation présente globalement un bon fonctionnement. Cependant, il est à noter que le biogaz n'est pas convenablement valorisé. En effet, les deux électrogénérateurs 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.

Principales recommandations

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

- Le diagnostic complet du 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.

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.

- Les fientes de volailles, une fois traitées, peuvent être valorisées comme fertilisants agricoles, d'où, 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 GES provenant du méthane rejeté).

4. 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 [9 ; 19]. 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 GES du secteur agricole particulièrement le méthane [7 ; 3 ; 10 ; 11 ; 9 ; 15]. 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 [16].

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.

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 son % méthane et son PCI. Cette constatation est d'autant plus justifiée en analysant les résultats du suivi de deux 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 relevés au décanteur.

Les résultats obtenus prouvent 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, ou bien en vue d'améliorer la rentabilité du projet en valorisant mieux les quantités de digestats solide et liquide produits (co-produits secondaires de la biométhanisation).

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 Élevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet, Tunisie qui ont mis à leur disposition respectivement le digesteur industriel et le laboratoire «Biogaz» (analyses physico-chimiques et bilan de dépollution). Il en est de même pour la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte qui a contribué aux analyses qualitatives du biogaz produit.

Références bibliographiques

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

- [2] ALCOR, AXENNE, 2003. Étude stratégique pour le développement des énergies en Tunisie. Bilan des réalisations et Rapport final de l'Agence Nationale des Energies Renouvelables (ANER), p. 148-157.
- [3] Angelidaki I., Ellegaard L., 2003. Co-digestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Appl. Biochem. Biotech.* 109, p. 95-105.
- [4] Béline F., Gac A., 2007. La méthanisation : un moyen de valoriser la matière organique des déjections animales et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. *Sinfotech – Les Fiches Savoir-Faire*, CEMAGREF, 4p.
- [5] Brondeau P., De La Farge B., Héduit M., 1982. Un nouveau procédé de fermentation méthanique en continu pour les lisiers : Production d'énergie, dépollution et désodorisation. *Génie Rural Janvier-Février* n° 1-2, p. 5-10.
- [6] Degré A., Verhève D., Debouche C., 2001. Émissions gazeuses en élevage porcin et modes de réduction : Revue bibliographique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ* 5 (3), p. 135-143.
- [7] Fruteau H., Membrez Y., 2004. Réalisation d'un référentiel technico-économique des unités de méthanisation de produits organiques agricoles et non agricoles à petite échelle en Europe lots 1 et 2. *EREP SA*, 11p.
- [8] Hilkiyah Igoni A., Ayotamuno M.J., Eze C.L., Ogaji S.O.T., Probert S.D., 2008. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid waste. *Applied Energy* 85, p. 430-438.
- [9] Holm-Nielsen J.B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P., 2009. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology* 100, p. 5478-5484.
- [10] Lehtomaki A., Huttunen S., Rintala J.A., 2007. 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* 51, p. 591-609.
- [11] 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* 99, p. 8288-8293.
- [12] Moletta R., 1989. Contrôle et conduite des digesteurs anaérobies. *Revue des Sciences de l'Eau*, 2, p. 265-293.
- [13] Monzambe M., 2002. La problématique de la biométhanisation en République Démocratique du Congo. *Université du Québec*, 38p.
- [14] Ochsenbein C., 2006. Biodynamie et énergie : Comment faire pour mieux gérer les ressources énergétiques à la ferme?. *Licence Professionnelle d'Agriculture Durable, Syndicat d'Agriculture Bio-Dynamique à Colmar*, 19 p.
- [15] Pognani M., D'Imporzano G., Scaglia B., Adani F., 2009. Substituting energy crops with organic fraction of municipal solid waste for biogas production at farm level: A full-scale plant study. *Process Biochemistry* 44, p. 817-821.
- [16] Ramade F., 1993. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*, Édiscience internationale, Paris.
- [17] Raynal J., Delgenks J-P., Moletta R., 1998. Two-Phase Anaerobic Digestion Of Solid Wastes By A Multiple Liquefaction Reactors Process. *Bioresource Technology* 65, p. 97-103.
- [18] Roque H., 1981. *Fondements théoriques du traitement biologique des eaux*. Chapitre 3 : Traitement anaérobie. p. 1476-1532.
- [19] 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* 99, p. 8112-8117.
- [20] Scaglia B., Confalonieri R., D'Imporzano G., Adani F., 2010. Estimating biogas production of biologically treated municipal solid waste. *Bioresource Technology* 101, p. 945-952.
- [21] Tambone F., Genevini P., D'Imporzano G., Adani F., 2009. Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresource Technology* 100, p. 3140-3142.
- [22] Tou I., Igoud S., Touzi A., 2001. Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation - Biomasse*, p. 103-108.
- [23] Van Den Berg L., 1982. Anaerobic digestion of wastes. *Conservation & Recycling*, Vol. 5, No. 1, p. 5-14.
- [24] Verrier D., Morfaux J. N., Albagnac G., Touzel J. P., 1982. The french programme on methane fermentation. *Biomass* 2, p. 17-28.
- [25] Ward A.J., Hobbs Ph.J., Holliman P.J., Jones D.L., 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* 99, p. 7928-7940.
- [26] Westerman P., Bicudo J., 2005. Management considerations for organic waste use in agriculture. *Bioresour. Technol.* 96, p. 215-221.