

---



---

Soumis le : 30 Avril 2010

Forme révisée acceptée le : 09 Novembre 2010

Email de l'auteur correspondant :

msadak.youssef@yahoo.fr

---



---

## Étude comparée des performances environnementales et énergétiques de la biométhanisation appliquée aux déjections animales

M'SADAK Youssef.\*, BEN M'BAREK Abir. \*, ZOGHLAMI Rahma Inès.\*, BARAKET Salma.\*

\* Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem 4042 Sousse Tunisie

---

### Résumé

Le présent travail consiste à étudier la biométhanisation appliquée à la biomasse animale au niveau de divers types de digesteurs : Les fientes avicoles sont traitées à l'échelle expérimentale, dans deux digesteurs de laboratoire ; différents par leurs concentrations en MS qui est de l'ordre de 6 % au niveau du premier et de 8 % dans le second ; et à l'échelle réelle, dans un digesteur industriel. Les bouses bovines sont traitées à l'échelle pratique, dans un digesteur rural.

Le suivi analytique a concerné particulièrement certains paramètres environnementaux (MES et DBO<sub>5</sub>) et leur évolution au cours du processus de fermentation, afin d'établir les bilans de dépollution correspondants, ainsi qu'un suivi énergétique par l'appréciation de la productivité qualitative du biogaz produit (composition gazeuse et pouvoir calorifique).

Cette étude a permis de ressortir un certain nombre de constatations dont on peut citer :

- A l'échelle expérimentale, le digesteur II présente les meilleurs bilans de dépollution (MES et DBO<sub>5</sub>). Les performances énergétiques qualitatives sont également en faveur du digesteur II (% Méthane et pouvoir calorifique).
- A l'échelle industrielle, les meilleurs bilans de dépollution sont obtenus au niveau du bassin de décantation. L'intérêt du recours à l'épuration a été démontré en comparant les résultats avant et après épuration de la qualité du biogaz produit.
- A l'échelle rurale, le processus de biométhanisation permet une dépollution moins intéressante. Le conditionnement du biogaz produit permet une légère amélioration de sa qualité.

Mots clés : Digesteurs ; déjections animales ; bilan de dépollution ; composition gazeuse ; pouvoir calorifique ; rendement d'épuration.

---

### 1. Introduction

Pour faire face à la conjoncture très fluctuante du prix des produits énergétiques et réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre [4, 3], les énergies renouvelables suscitent un intérêt croissant notamment celles issues de la biomasse, et particulièrement, le biogaz provenant de la biométhanisation des effluents [14, 15, 7, 12, 8].

La fermentation méthanique est, aujourd'hui, la filière bioénergétique aux perspectives les plus prometteuses [13]. Son application industrielle, après les progrès des

dernières années de recherches, commence à devenir une réalité [5, 16]. 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 biométhanisation sont relativement nouvelles [2]. 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).

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 et la conservation des ressources. Le bon fonctionnement (dépollution, potentialité énergétique) de ce type de procédé est conditionné largement par les conditions physico-chimiques du substrat mis en fermentation (pH, MS, ...). Dans l'optique de la maîtrise des conditions du milieu fermentaire pour une meilleure valorisation environnementale et énergétique, cette étude se propose comme objectif principal le suivi et l'évaluation d'une part, du bilan de dépollution des fientes avicoles traitées par biométhanisation à l'échelle expérimentale et industrielle et des déjections bovines à l'échelle rurale, en termes de Matière En Suspension (MES) et de Demande Biologique en Oxygène (DBO5), et d'autre part, de la productivité qualitative gazeuse (composition et pouvoir calorifique).

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Différents dispositifs expérimentaux

Les digesteurs expérimentaux ainsi que le digesteur rural sont de petits digesteurs anaérobies qui peuvent être réalisés très facilement et servir pour des opérations de démonstration. On peut ainsi vérifier la dégradabilité de différents types d'effluents organiques, ainsi que l'inflammabilité du biogaz, voire l'évaluation de sa qualité.

#### 2.1.1. Digesteurs pilotes de laboratoire

Le dispositif expérimental installé au niveau du laboratoire « biogaz » du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (C.F.P.A.E.B.) de Sidi Thabet, est constitué en réalité de quatre digesteurs (Photo 1). Deux digesteurs (différents par leurs concentrations en MS qui est de l'ordre de 6 % au niveau du premier et de 8 % dans le second) ont été retenus pour l'évaluation en cours.



Photo 1. Digesteurs pilotes de laboratoire

Le suivi des digesteurs expérimentaux a mis l'accent surtout sur l'effet de la variation du taux de MS des substrats appliqués à la digestion anaérobie en continu (Figure 1) sur la dépollution et la production qualitative de biogaz.

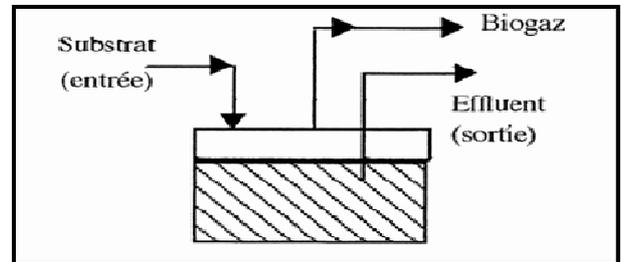


Figure 1. Schéma de principe du digesteur expérimental à alimentation continue

#### 2.1.2. Digesteur pilote rural

Il s'agit d'un digesteur enterré (Photo 2), installé à la ferme rattachée au C.F.P.A.E.B et qui est caractérisé par un très faible investissement et une grande simplicité puisqu'il est, en grande partie, auto-construit et n'utilisant pas d'appareillage sophistiqué.



Photo 2. Digesteur pilote rural

L'installation est formée d'une bouche d'alimentation, d'un digesteur souterrain de forme circulaire et d'une fosse de récupération du digestat. La figure 2 ci-après montre le schéma de principe et les composantes de cette installation.

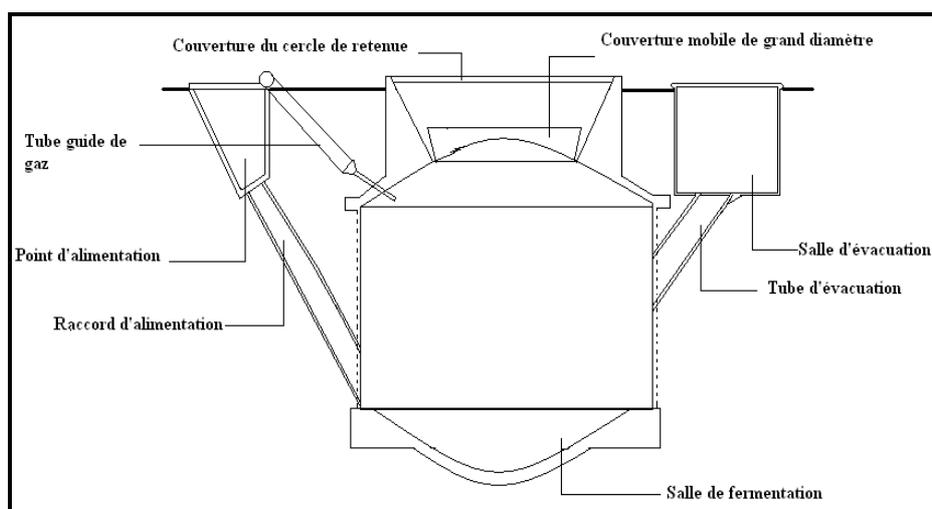


Figure 2. Composantes du digesteur rural

### 2.1.3. Digesteur pilote industriel

Il s'agit d'un digesteur de forme cylindrique (Photo 3), installé dans une ferme avicole à Hammam Sousse depuis l'année 2000. L'installation est conçue pour traiter 4 tonnes de déjections fraîches quotidiennement, représentant la production journalière d'un élevage avicole industriel autour de 20000 poules pondeuses.

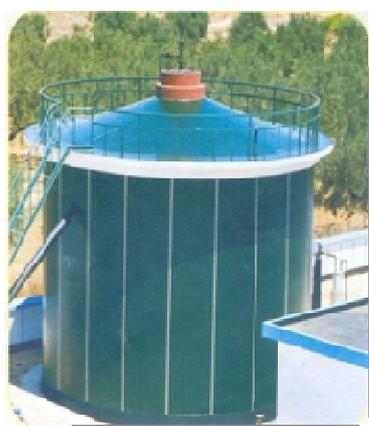


Photo 3. Digesteur industriel à Hammam Sousse

L'unité de biométhanisation installée a un objectif environnemental qui consiste à réduire la pollution générée par les fientes avicoles et un objectif énergétique qui consiste à alimenter les groupes électrogènes et satisfaire ainsi les besoins de la ferme et de la station en énergie électrique produite. Cette production est aux alentours de 200 m<sup>3</sup> de biogaz/jour pouvant être

transformés en 300 kWh électriques, dont 5 à 10% seulement sont actuellement consommés par le propriétaire.

Le tableau 1 résume quelques caractéristiques relatives aux différents digesteurs mis en œuvre.

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques générales des digesteurs employés

Type de digesteur		Expérimental	Rural	Industriel
Nature de substrat	Substrat	Fientes avicoles	Bouse bovine fraîche	Fientes avicoles
	Inoculum	Bouse bovine noire		-
Capacité		500 ml	6 m <sup>3</sup>	300 m <sup>3</sup>
Mode de digestion		En continu		
TRH (Jours)		10	10	10
Température (°C)		35	Ambiante	Ambiante
MS (%)	Substrat	20,9	31,5	20,9
	Inoculum	4,0	9,4	-
pH	Substrat	8,7	6,5	8,7
	Inoculum	7,2	7,2	-

La variation du taux de MS de la bouse bovine noire au niveau de digesteurs de laboratoire et rural est due au facteur dilution. Il s'agit, en effet, de la bouse bovine noire diluée dans les deux cas, mais le taux de dilution de cet inoculum dépend de celui du substrat mis en fermentation (fientes avicoles dans les digesteurs expérimentaux et bouses bovines fraîches dans le digesteur rural).

Les bouses bovines noires sont diluées dans le cas de digesteurs de laboratoire, puisqu'il s'agit d'un travail

expérimental à petite échelle (capacité de 500 ml par digesteur). Pour fonctionner convenablement, il a été préférable de diluer ce substrat. 6 et 8 % ne correspondent pas aux taux de MS du substrat introduit (fientes de volailles), mais aux caractéristiques de digesteurs employés. Le substrat initial (fientes de volailles) ayant 20,9 % comme taux de MS va être introduit, selon le cas, dans un digesteur fonctionnant à 6 % MS ou à 8 % MS. Une régularisation de ce taux de MS (20,9 %) a été appliquée en vue d'une adaptation aux conditions physico-chimiques visées.

Les valeurs indiquées du pH ne correspondent pas à celles des digesteurs, mais à celles du substrat et de l'inoculum introduits au niveau de chaque digesteur. Il est vrai que les valeurs du pH varient au cours du processus de fermentation et surtout en fonction des conditions opératoires. À l'échelle expérimentale, par exemple, le pH des substrats introduits dans le digesteur évolue différemment suivant les conditions au sein de chaque digesteur et en fonction de la phase (de démarrage ou de production).

Les quantités de chaque matière première introduite dans les digesteurs considérés sont mentionnées dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2. Quantification des intrants

Type de digesteur	Substrat (l)	Inoculum (l)	Eau (l)
Expérimental I	0,12	0,15	0,23
Expérimental II	0,17	0,15	0,18
Rural	2000 au départ + 50/j	1000	0 au départ + 25/j
Industriel	3,33 m <sup>3</sup>	-	6,66 m <sup>3</sup>

## 2.2. Suivi environnemental

Les paramètres environnementaux auxquels on s'est intéressé sont relatifs à la charge polluante (MES et DBO<sub>5</sub>) de la matière digérée provenant de différents digesteurs. Les analyses ont été réalisées au laboratoire « Biogaz » du C.F.P.A.E.B.

Pour les MES, elles correspondent à l'ensemble de particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée [11]. Leur détermination permet d'estimer la biomasse bactérienne dans le digesteur [9]. L'analyse repose sur le principe de quantifier toutes les matières pouvant être décantables après élimination de la majeure partie de l'eau par filtration et évaporation dans l'étuve à 105 °C.

Concernant la DBO<sub>5</sub>, ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en MO biodégradable d'une eau au cours des procédés d'autoépuration. Comme toute MO biodégradable polluante entraîne une consommation d'O<sub>2</sub>, le principe de la mesure de la DBO<sub>5</sub> repose, alors, sur la

quantification de l'O<sub>2</sub> consommé après incubation de l'échantillon durant cinq jours.

## 2.3. Suivi de la productivité qualitative gazeuse

L'analyse qualitative du biogaz produit a été réalisée dans le laboratoire d'analyses de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (S.T.I.R.) localisée à Bizerte. Elle comprend généralement une détermination de la composition du biogaz produit et de son pouvoir calorifique (PC).

Pour l'analyse de la composition, on a eu recours à la technique de Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG) qui consiste à séparer les molécules d'un mélange très complexe de nature et de volatilité très diverses. Cette technique est convenable pour les composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Les composants déterminés par cette méthode sont les suivants : % Méthane (CH<sub>4</sub>), % Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), % Sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) et % Hydrogène (H<sub>2</sub>).

L'appareil ORSAT a permis de mesurer les pourcentages en volume du CO<sub>2</sub> et de l'oxygène (O<sub>2</sub>).

Le détecteur de gaz DRÄGER a servi à la détermination des teneurs en H<sub>2</sub>S.

En outre, on s'est intéressé également au potentiel énergétique, en estimant les valeurs inférieures et supérieures du pouvoir calorifique (PC), respectivement notées PCI et PCS. Rappelons que le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 m<sup>3</sup> Normal de gaz sec (quantité de matière gazeuse qu'occupe 1 m<sup>3</sup> dans les conditions normales de température et de pression dans l'air. Il est généralement exprimé en kWh/m<sup>3</sup>, kcal/m<sup>3</sup> ou kcal/kg. Les deux pouvoirs calorifiques généralement considérés s'expriment l'un en fonction de l'autre selon l'expression ci-après:

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

Le PCI est l'énergie résultante de la combustion sans tenir compte de l'énergie consacrée à la vaporisation de l'eau. Cette énergie est calculée lorsque l'eau produite par la combustion reste à l'état de vapeur. 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.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Établissement des bilans de dépollution des MES et de la DBO<sub>5</sub>

Les tableaux 3 et 4 regroupent, respectivement, les résultats des analyses relatives aux MES et à la DBO<sub>5</sub> présentes dans les différents types de digesteurs, effectuées avant et après fermentation.

La consistance des digesteurs en MS influe considérablement sur le bilan de dépollution des MES, qui augmente en fonction de la concentration en MS introduite dans le digesteur.

Tableau 3. Résultats des analyses de MES

Type de digesteur	MES initiales (mg/l)	MES finales (mg/l)	Bilan de dépollution		
			mg/l	%	
Expérimental I	15,3	13,70	1,60	10,5	
Expérimental II	20,3	12,43	7,87	38,8	
Rural	Mélange 1*	13,9	12,30	1,60	11,5
	Mélange 2*	20,5	12,20	8,30	40,4
Industriel	Bassin 1**	22,5	4,90	17,60	78,2
	Bassin 2**	22,5	4,40	18,10	80,5

(\*)Mélange 1 : Mélange initialement introduit

Mélange 2 : Mélange ultérieurement introduit

(\*\*)Bassin 1 : Bassin des fientes digérées

Bassin 2 : Bassin de décantation

Tableau 4. Résultats des analyses de la DBO<sub>5</sub>

Type de digesteur	DBO <sub>5</sub> initiale (mg/l)	DBO <sub>5</sub> finale (mg/l)	Bilan de dépollution		
			mg/l	%	
Expérimental I	1128,05	548,93	579,12	51,3	
Expérimental II	1340,95	373,91	967,04	72,1	
Rural	Mélange 1*	406,70	323,70	83,00	20,4
	Mélange 2*	573,50	354,20	219,30	38,2
Industriel	Bassin 1**	2572,30	1152,76	1419,54	55,2
	Bassin 2**	2572,30	900,01	1584,21	61,6

(\*)Mélange 1 : Mélange initialement introduit

Mélange 2 : Mélange ultérieurement introduit

(\*\*)Bassin 1 : Bassin des fientes digérées

Bassin 2 : Bassin de décantation

On considère les bilans de dépollution des MES du premier digesteur expérimental et du mélange 1 au niveau

du digesteur rural comme non satisfaisants. Ceci peut être dû à la grande quantité d'eau présente et à la concentration relativement faible en MS ( $\leq 6\%$ ) pour le cas du digesteur expérimental. A partir de 8% MS (digesteur expérimental II), la réduction des MES est plus intéressante. Les MES sont en baisse continue tout au long du cheminement du substrat au cours du processus de biométhanisation. Au niveau du digesteur rural, et en allant du premier au second mélange, il y a une amélioration de la réduction de la charge polluante évaluée à 29% qui pourrait être expliquée par une bonne biodégradation de la MO. Cette biodégradation est meilleure dans le cas du digesteur industriel dont la réduction est supérieure à 80% des MES au niveau du bassin de décantation. 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.

Comme pour le bilan des MES, le bilan de dépollution de la DBO<sub>5</sub> augmente en fonction de la concentration en MS introduite dans le digesteur. Cette observation est valable à condition que la concentration en MS ne dépasse pas 10% [1], ce qui est confirmé par les résultats relevés pour le digesteur expérimental II à 8% MS qui présente le meilleur bilan de dépollution de DBO<sub>5</sub> par comparaison avec les résultats du digesteur I qui a enregistré un bilan de dépollution relativement satisfaisant. De même, le digesteur industriel présente un bilan de dépollution relativement satisfaisant et la réduction de la charge polluante dépasse 55% dans les deux bassins. Cette potentialité est plus accentuée au niveau du bassin de décantation avec une légère augmentation de l'ordre de 6% au niveau du bassin de décantation par rapport au bassin des fientes digérées.

#### 3.2. Évaluation qualitative de la productivité gazeuse

La qualité du biogaz est évaluée essentiellement par le pourcentage de méthane (CH<sub>4</sub>) qu'il contient. Un biogaz est d'autant meilleur que son pourcentage en méthane est élevé. La qualité du biogaz selon [1] varie en fonction de la température, du TRH et de la concentration en MS. Le biogaz produit par le digesteur rural a subi un conditionnement (filtration, réduction de l'humidité, ...), de même, le digesteur industriel a subi un traitement par épuration en faisant appel à une désulfuration avec l'hématite de fer. 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. À cet égard, le suivi a été réalisé avant et après conditionnement pour apprécier l'intérêt du post-traitement. L'évaluation de la performance du conditionnement réalisé sera interprétée à partir des résultats d'analyses de la composition du biogaz et de son pouvoir calorifique.

Tableau 5

Expression des résultats de la composition du biogaz produit

Type de digesteur		CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (%)	H <sub>2</sub> (%)
Expérimental I		63,3	20,0	16,16	0,54
Expérimental II		63,4	30,0	5,89	0,70
Rural	Avant conditionnement	58,1	40,9	Traces	Traces
	Après conditionnement	66,1	32,7	Traces	Traces
Industriel	Avant épuration	60,0	30,0	10,00	Traces
	Après épuration	75,0	25,0	0,00	Traces

Pour le cas des digesteurs expérimentaux, le % CH<sub>4</sub> produit généralement s'élève selon l'augmentation de la concentration en MS. Toutefois, l'élévation est négligeable. Il convient de noter que la teneur en méthane est influencée également par d'autres paramètres non suivis (C/N, ...).

Le % CO<sub>2</sub> s'élève aussi avec l'augmentation de la concentration en MS. Ceci pourrait être expliqué par la dissolution de l'ammoniac sous forme d'ammoniaque, élevant ainsi la valeur du pH.

Le % H<sub>2</sub>S a diminué avec l'élévation de la concentration en MS dans les conditions adoptées. Il est à signaler que ce paramètre est généralement moins élevé que celui relevé.

Dans l'état actuel, un tel taux engendre le phénomène de corrosion et l'épuration du biogaz produit s'avère fortement recommandée avant utilisation.

D'où, le recours pratique au conditionnement du biogaz bovin (filtration, réduction de l'humidité, ...) et l'épuration du biogaz avicole (désulfuration avec l'hématite de fer).

Le % H<sub>2</sub>S doit être présent sous forme de traces [10]. A ce propos, le % H<sub>2</sub>S doit varier entre 0 et 2 % [6].

Les % élevés de H<sub>2</sub>S peuvent être expliqués par le type de MO méthanisée. Ils sont plus élevés dans le cas de la biomasse avicole (acidité élevée) aussi bien sur le plan expérimental que sur le plan réel.

Pour le cas des digesteurs rural et industriel, le biogaz produit a subi un post-traitement (épuration). L'analyse des résultats de l'évaluation de la performance du post-traitement réalisé permet de dégager que le % CH<sub>4</sub> avant conditionnement a augmenté de 8% après conditionnement (cas du digesteur rural) et de 15% (cas du digesteur industriel), ce qui donne respectivement des rendements

### 3.2.1. Composition gazeuse

Les résultats des analyses relatives à la composition du biogaz produit par les digesteurs testés sont donnés dans le tableau 5.

d'épuration de 13,8% et de 25%. Ceci montre l'importance du post-traitement du biogaz assurant davantage une réduction en éléments polluants (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, ...) ainsi qu'une intensification en concentration du CH<sub>4</sub>. Les résultats obtenus sont des indices du bon fonctionnement du procédé d'épuration et de l'efficacité du post-traitement du biogaz.

### 3.2.2. Pouvoir calorifique

Les résultats énergétiques correspondant à la mesure des PCI, et par la suite, à la détermination des PCS au niveau de différents digesteurs considérés, sont donnés dans le tableau 6 ci-après.

On remarque une légère augmentation des PCI et des PCS en fonction de la concentration en MS dans le cas des digesteurs expérimentaux. Toutes les valeurs calorifiques relevées sont conformes à celles indiquées par [10] qui signale une fourchette comprise généralement entre 5000 et 8500 kcal/Nm<sup>3</sup>. Après épuration, il y a une nette amélioration du pouvoir calorifique surtout dans le cas du digesteur industriel présentant un rendement égal à 25%. On peut dire que le biogaz industriel produit présente des potentialités énergétiques valables avant et après épuration. Le rendement d'épuration du digesteur rural est faible en raison surtout du procédé inefficace de conditionnement mis en œuvre.

Tableau 6. Résultats relatifs aux pouvoirs calorifiques

Type de digesteur		PCI (kcal/Nm <sup>3</sup> )	PCS (kcal/Nm <sup>3</sup> )
Expérimental I		5394	6011
Expérimental II		5429	6045
Rural	Avant conditionnement	4973	5532
	Après conditionnement	5210	5932
Industriel	Avant épuration	5110	5684
	Après épuration	6389	7106

#### 4. Conclusion

À la lumière des résultats obtenus lors de cette étude se rapportant à la valorisation environnementale et énergétique des déjections animales, dans divers types de digesteurs alimentés en continu, nous avons pu tirer quelques renseignements intéressants sur l'effet de la concentration en MS aussi bien sur la réduction de la charge polluante de point de vue MES et DBO<sub>5</sub> que sur les performances énergétiques du biogaz expérimental produit. Cette observation est valable à condition que la concentration en MS ne dépasse pas 10%, ce qui est confirmé par les résultats relevés pour le digesteur expérimental II (8 % MS) qui présente les bilans de dépollution les plus significatifs, que ce soit pour les MES (38,8%) que pour la DBO<sub>5</sub> (72,1%).

L'évaluation des performances énergétiques de deux digesteurs expérimentaux des fientes avicoles montre un intérêt certain et une qualité acceptable sur les plans composition (plus de 63% CH<sub>4</sub>) et pouvoir calorifique (PCI supérieur à 5394 kcal/Nm<sup>3</sup>). À l'échelle pratique, l'évaluation des performances environnementales de deux digesteurs (rural et industriel) montre un intérêt sur les plans réduction des MES et de la DBO<sub>5</sub> en faveur du digesteur industriel.

Le biogaz rural ou industriel subissant une étape de post-traitement qui permet d'augmenter davantage ses potentialités énergétiques sur les plans %Méthane et PCI de 25% (cas du digesteur industriel).

#### 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. Il en est de même pour la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (S.T.I.R.) de Bizerte qui a réalisé les analyses qualitatives du biogaz produit.

#### Références bibliographiques

- [1] Akrouit J. 1992. Etude énergétique de la fermentation méthanique des fientes de volailles : optimisation des facteurs influents et modélisation du système. Doctorat de spécialisation ; ENI. Tunisie. 143p.
- [2] ALCOR et AXENNE, 2003. Etude 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] Amand G., Bonnouvrier A., Chevalier D., Dezat E., Nicolas C., Ponchant P., 2008. Les consommations d'énergie dans les bâtiments avicoles. Quelques repères sur les consommations d'énergie et propositions de pistes d'amélioration. Editeur : ITAVI, 1ère édition, 24p.
- [4] Béline F. et 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. et Héduit M., 1982. Un nouveau procédé de fermentation méthanique en continu pour les lisiers : Production d'énergie, dépollution et désodorisation. Revue Génie Rural, Janvier-Février 1982, n° 1-2, p. 5-10.
- [6] Dupont L. et Paillart A., 2009. Règles de sécurité des installations de méthanisation agricole. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques INERIS - Direction des Risques Accidentels, 24 p.
- [7] Fuchs J., 2008. Effets de composts et de digestats sur l'environnement, sur la fertilité du sol et sur la santé des plantes. Institut de Recherche en Agriculture Biologique, FiBL. Revue UFA, n° 11, p. 44-45.
- [8] Guendouz J., Buffière P., Cacho J., Carrère M., Delgenes J-P., 2010. Dry anaerobic digestion in batch mode: Design and operation of a laboratory-scale, completely mixed reactor. Waste Management, 4p (Article in press).
- [9] Moletta R. 1989. Contrôle et conduite des digesteurs anaérobies. Revue des Sciences de l'Eau, n° 2, p. 265-293.
- [10] Monzambe M. 2002. La problématique de la biométhanisation en République démocratique du Congo. Université du Québec, 38p.
- [11] Ramade F. 1993. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. ÉdisScience Internationale, Paris.
- [12] 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, n° 99, p. 8112-8117.
- [13] Schievano A., D'Imporzano G., Adani F., 2009. Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production. Journal of Environmental Management, n° 90, p. 2537-2541.
- [14] Tou I., Igoud S. et Touzi A., 2001. Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales. Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse, p. 103-108.
- [15] Tsai W.T., Chou Y.H., Chang Y.M., 2004. Progress in energy utilization from agrowastes in Taiwan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n° 8, p. 461-481.
- [16] Van den Berg L., 1982. Anaerobic digestion of wastes. Conservation & Recycling, n° 1, p. 5-14.