

# PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES ET ÉNERGÉTIQUES DE LA BIOMÉTHANISATION APPLIQUÉE AUX DÉJECTIONS BOVINES DANS LE CONTEXTE TUNISIEN

M'SADAK Youssef\* et BEN M'BAREK Abir

Université de Sousse, Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem, 4042, Tunisie

E-mail: [msadak.youssef@yahoo.fr](mailto:msadak.youssef@yahoo.fr)

**Résumé.-** Le présent travail consiste à étudier la Biométhanisation, appliquée aux déjections bovines, établie au niveau de quatre digesteurs expérimentaux, différents de point de vue paramètres de fonctionnement, et un autre rural à l'échelle de la ferme. Le suivi de ce dernier porte sur la détermination de certaines caractéristiques physico-chimiques des bouses introduites et sur l'analyse de principaux paramètres environnementaux afin d'établir le bilan de dépollution. Le suivi des digesteurs a mis également l'accent surtout sur l'effet de la variation de certains paramètres physico-chimiques de la digestion anaérobie, en discontinu, sur la production gazeuse quantitative et qualitative. On peut dégager particulièrement que:

- Le processus de Biométhanisation rurale permet une dépollution des Matières en Suspension (MES) et de la Demande Biologique en Oxygène (DBO<sub>5</sub>).
- La production de biogaz expérimental est variable suivant les paramètres de fonctionnement adoptés. Elle est maximale en présence d'une température élevée et sous une agitation mécanique du substrat introduit.
- Le conditionnement du biogaz rural produit permet une amélioration de sa qualité aussi bien de point de vue composition que pouvoir calorifique.

**Mots clés:** Digesteurs expérimentaux; digesteur rural; déjections bovines; bilan de dépollution; quantité de biogaz; composition et pouvoir calorifique.

## ENVIRONMENTAL AND ENERGY PERFORMANCES OF THE BIOMETHANISATION APPLIED TO THE BOVINE DEJECTIONS IN THE TUNISIAN CONTEXT

**Abstract.-** This work consists in studying the Biomethanisation, applied to the bovine dejections, established on the level of four experimental digesters, different of parameters of point of view of operation, and another rural at the level of the farm. The follow-up of this last relates on the determination of certain physicochemical characteristics of the introduced dungs and to the analysis of principal environmental parameters in order to establish the assessment of depollution. The follow-up of the digesters focused also mainly on the effect of the variation of some physicochemical parameters of anaerobic digestion, discontinuous on the quantitative and qualitative gas production. One can release particularly that:

- The process of rural Biomethanisation allows an interesting depollution as Suspended Solids (MES) and Biological Oxygen Demand (DBO<sub>5</sub>).
- The production of experimental biogas is variable according to the adopted parameters of operation. It is maximal in the presence of a high temperature and under a mechanical agitation of the introduced substrate.
- The conditioning of rural biogas enables improved quality of both composition and on calorific value.

**Key words:** Experimental digesters; rural digester; bovine dejections; assessment of depollution; quantity of biogas; composition and calorific value.

## **Introduction**

Le charbon, le pétrole, le gaz naturel et divers autres sources d'énergie ont été le moteur de l'économie mondiale [1]. En effet, le développement socio-économique qui s'est produit aux deux derniers siècles aurait été impossible sans énergie. Dans les dernières années, l'agriculture est devenue, elle aussi, fortement dépendante de l'énergie et des engrais chimiques eux-mêmes fortement dépendants de l'énergie [2].

Pour faire face à la conjoncture très fluctuante des valeurs énergétiques et réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre, la prospection et le développement des nouvelles sources d'énergie ont été entrepris. Ainsi, les énergies renouvelables suscitent un intérêt croissant notamment celles issues de la biomasse [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], et plus particulièrement, le biogaz provenant de la biométhanisation des effluents agricoles [1, 3, 10, 11, 5, 12, 13, 14, 15, 16].

En l'absence d'oxygène, des bactéries dégradent partiellement la matière organique (MO), ce qui conduit à la formation d'un digestat (produit secondaire) et de biogaz (produit principal), composé majoritairement du méthane, valorisé en énergie [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33].

Cette énergie renouvelable largement disponible, peu coûteuse et non polluante est utilisée pour compléter l'énergie fossile non renouvelable et peut être convertie pratiquement en toutes formes d'énergie utile [34, 1, 35, 36, 10, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 5].

En particulier, la valorisation des déjections animales pourrait être considérée comme une solution économique, écologique et sociale à travers une autonomie énergétique et un développement agricole durable des zones rurales caractérisées par une densité animale élevée posant le plus souvent des difficultés au sein des élevages.

Le bon fonctionnement (dépollution et potentiel énergétique) du procédé de biométhanisation, est conditionné, en grande partie, par les conditions physico-chimiques du substrat à traiter, entre autres, la température, l'agitation, le pH et par le choix du type de procédé technologique (en continu ou en discontinu).

La présente étude se propose, à travers un diagnostic physico-chimique, environnemental et énergétique, d'approfondir l'analyse de certains paramètres de fonctionnement des digesteurs mis en œuvre pour traiter la biomasse bovine à l'échelle expérimentale (quatre pilotes de laboratoire) et à l'échelle rurale (un pilote de ferme) tout en appréciant la charge polluante avant et après biométhanisation et les productivités gazeuses quantitative et qualitative.

## **1.- Matériel et méthodes**

### **1.1.- Site expérimental**

Le travail engagé consiste à mettre en œuvre l'expérimentation de la biométhanisation des bouses bovines en suivant un procédé de fermentation en discontinu des digesteurs pilotes expérimentaux installés au laboratoire «Biogaz» et un autre procédé en continu du digesteur pilote rural installé à la ferme rattachée au Centre de Formation

Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (C.F.P.A.E.B) de Sidi Thabet, Tunisie.

## 1.2.- Matériel expérimental

### 1.2.1.- Matières premières mises en fermentation

Il s'agit de la biométhanisation des bouses fraîches produites par les vaches disponibles (comme substrat) et des bouses bovines noires extraites de la fosse septique aménagée (comme inoculum). Les caractéristiques de ces deux bouses sont illustrées dans le tableau I.

**Tableau I.-** Caractéristiques des bouses bovines mises à l'essai

Nature de bouses bovines	MS (%)	pH
Bouse fraîche	31,5	6,5
Bouse noire	9,4	7,2

### 1.2.2.- Dispositif expérimental

Il s'agit de deux types de digesteurs:

- Quatre digesteurs expérimentaux, pilotes de laboratoire, pour le suivi des paramètres physico-chimiques et de la production quantitative du biogaz produit à partir de la biomasse bovine récupérée.
- Un digesteur pilote rural enterré à alimentation manuelle et continue, de capacité de l'ordre de 6 m<sup>3</sup>. Il 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.

Les caractéristiques de ces digesteurs et les différents types d'évaluation réalisés sont consignés, suivant le cas, dans le tableau II.

**Tableau II.-** Données générales sur les digesteurs mis en œuvre

Digesteur	Bouse utilisée	Température (°C)	Type d'évaluation
<b>Expérimental I</b> (sans agitation)	Fraîche	25	Effet de l'introduction de la bouse noire (inoculum) sur le démarrage de la fermentation et sur la quantité de biogaz produite
<b>Expérimental II</b> (sans agitation)	Fraîche et noire		
<b>Expérimental III</b> (sans agitation)	Fraîche	35	Effet de l'agitation Effet de la température
<b>Expérimental IV</b> (avec agitation)			
<b>Rural</b>	Fraiche et noire	Ambiante	Bilan de dépollution Productivité qualitative de biogaz

## 1.3.- Différentes phases de la productivité gazeuse

### 1.3.1.- Phases de remplissage et de démarrage

Il existe deux procédés de fermentation anaérobie auxquels correspondent deux types fondamentaux de digesteurs. Le digesteur est une enceinte conçue pour garantir

l'absence totale d'oxygène. Il est dit continu lorsqu'il est alimenté régulièrement en cours de fermentation avec un substrat liquide, la production de biogaz est alors continue. Le digesteur de type discontinu est alimenté par intermittence avec des substrats pailleux que l'on noie dans un purin de bactéries méthanogènes, la production de biogaz est discontinue, et en fin de digestion, le substrat a la texture du fumier de ferme [23].

Les deux modes de digestion en question ont été testés au niveau respectivement d'un digesteur pilote rural et de quatre digesteurs pilotes expérimentaux.

La biométhanisation expérimentale en discontinu exige ainsi un seul apport en substrat, inoculum et eau au début du processus. Une fois le remplissage accompli, le digesteur doit être étanche pour assurer l'anaérobiose ainsi que le bon déroulement de la fermentation. Au cours de cette phase, il est important de bien introduire les doses adéquates. Pour le digesteur rural, il a été rempli à 2/6 de son volume en bouse fraîche et à 1/6 en bouse noire. Cette opération s'est déroulée en une seule journée, le lendemain du remplissage du digesteur.

Il est introduit deux volumes de bouse contre un volume d'eau, alors que, pour les digesteurs expérimentaux, il est introduit au contraire deux volumes d'eau contre un volume de bouse. Le tableau III mentionne les quantités de chaque matière première introduite dans les digesteurs considérés.

**Tableau III.-** Quantités introduites de substrat, d'inoculum et d'eau

Digesteur	Substrat (ml)	Inoculum (ml)	Eau (ml)
<b>Expérimental I</b>	100	-	200
<b>Expérimental II</b>	60	30	180
<b>Expérimental III</b>	100	-	200
<b>Expérimental IV</b>	100	-	200
<b>Rural</b>	2.000.000 au départ + 50.000/j	1.000.000	0 au départ + 25.000/j

### 1.3.2.- Phase de production gazeuse

Cette phase peut varier selon divers paramètres. Ainsi, pour les digesteurs, supports de cette étude, un suivi des paramètres physico-chimiques et énergétiques a été établi pendant la période de production de biogaz. Le début de la production gazeuse a commencé, pour le digesteur pilote rural, après 15 jours du remplissage. Ce retard de production est principalement dû à la faible température ambiante occasionnée par une période exceptionnelle de froid excessif lors de l'expérimentation. La quantité de biogaz produit par ce digesteur n'a pas pu être suivie en raison d'un dysfonctionnement survenu au niveau du débitmètre adopté sur l'installation.

### 1.4.- Méthodes d'analyse et paramètres suivis

Les caractérisations physico-chimiques, environnementales et énergétiques quantitatives ont été opérées au laboratoire «Biogaz» du CFPAEB de Sidi Thabet, alors que les analyses qualitatives du biogaz produit ont été exécutées au Laboratoire d'Analyses

de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR), localisée à Bizerte (Tunisie).

#### **1.4.1.- Analyses physico-chimiques**

Elles ont porté, principalement, sur les mesures du pH et de la Matière Sèche (MS). Le pH a été suivi quotidiennement uniquement pour le cas des digesteurs expérimentaux. Concernant le taux de MS, cette analyse a été effectuée une seule fois sur les mélanges introduits pour les quatre digesteurs expérimentaux, alors que pour le digesteur rural, on s'est intéressé respectivement au mélange initialement introduit (bouse fraîche + bouse noire) et au mélange introduit ultérieurement (bouse fraîche uniquement).

#### **1.4.2.- Suivi environnemental**

Les paramètres environnementaux auxquels on s'est intéressé sont relatifs à la charge polluante: Taux des Matières En Suspension (MES), Demande Biologique en Oxygène (DBO<sub>5</sub>) et Demande Chimique en Oxygène (DCO) de la matière digérée provenant uniquement du digesteur rural.

Pour les MES, elles correspondent à l'ensemble de particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée [45]. Sa détermination permet d'estimer la biomasse bactérienne dans le digesteur [46]. 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 Matière Organique (MO) biodégradable d'une eau au cours des procédés d'autoépuration. Comme toute MO biodégradable polluante entraîne une consommation de l'oxygène (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 5 jours.

Pour la DCO, elle traduit, en quantité d'O<sub>2</sub> dans les conditions de l'essai, le potentiel d'oxydation d'un oxydant chimique décomposé par les substances réductrices contenues dans l'échantillon examiné. La DCO intéresse indifféremment les substances minérales et organiques. Elle permet la mesure de la totalité des substances oxydables, ce qui inclut celles qui sont biodégradables.

#### **1.4.3.- Suivi de la productivité quantitative gazeuse**

Le suivi quantitatif a porté uniquement sur la production gazeuse des digesteurs expérimentaux afin de déterminer l'effet de la variation de quelques paramètres physico-chimiques sur la quantité produite de biogaz. Pour la quantification gazeuse, on a disposé d'un bac rempli d'eau dans lequel, on a installé des béchers gradués pour récupérer le gaz produit (le gaz va chasser l'eau et prendre sa place, d'où, on peut lire directement la quantité produite à partir des graduations).

#### **1.4.4. Suivi de la productivité qualitative gazeuse**

Le suivi qualitatif de la production gazeuse s'est limité au digesteur rural. Le prélèvement de l'échantillon a été réalisé une seule fois sur le gaz inflammable produit. On procède pour le prélèvement du gaz comme suit: Une vessie de ballon utilisée comme

chambre à air a servi pour le stockage du gaz produit. Cette vessie est remplie au fur et à mesure qu'il y a production gazeuse.

L'analyse de la productivité qualitative de biogaz comprend généralement une détermination de la composition du biogaz produit et du rendement technologique du digesteur étudié exprimé, soit en m<sup>3</sup> de gaz produit/m<sup>3</sup> utile de digesteur/jour, soit en CH<sub>4</sub>/unité de volume du digesteur/jour.

L'étude s'est limitée à la composition du biogaz produit. Pour l'analyse, 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: % de méthane (CH<sub>4</sub>), % de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), % de Sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) et % d'hydrogène (H<sub>2</sub>) [47].

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 (0°C sous 1 Atmosphère) dans l'air à une pression absolue constante égale à 1,01325 bars. Il est généralement exprimé en kWh/m<sup>3</sup>, kcal/m<sup>3</sup> ou kcal/kg [48].

Les deux pouvoirs calorifiques généralement considérés s'expriment l'un en fonction de l'autre selon l'expression ci-après [47, 48].

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

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.

## **2.- Résultats et discussion**

### **2.1.- Suivi physico-chimique**

#### **2.1.1.- Conditions à remplir avant le démarrage de la Biométhanisation**

Le démarrage de la fermentation anaérobie est une phase critique dans la production du biogaz, donc elle doit être bien soignée, afin que le processus débute le plus rapidement que possible. Les paramètres les plus exigeants pour un démarrage rapide sont un pH proche de la neutralité et une stabilité entre les populations bactériennes. Pour cela, il s'est avéré indispensable d'introduire la bouse noire qui garantit l'existence des bactéries. Il fallait, encore, avoir une température convenable pour le fonctionnement des bactéries et surtout assurer une agitation permettant une répartition homogène des bactéries méthanogènes au sein du digesteur, ce qui améliore la production gazeuse.

### **2.1.2.- Suivi du pH**

La phase de démarrage est indispensable pour la constitution des populations bactériennes qui vont effectuer la fermentation, et par la suite, vont assurer une marge de pH permettant la production de biogaz.

On admet que le pH est le premier indicateur du mauvais fonctionnement éventuel d'un digesteur. Le pH optimum de la digestion anaérobie se situe autour de la neutralité, il est de 6,8 à 7,5. Si la valeur du pH est inférieure à 6,5 ou supérieure à 7,5, les bactéries seront alors inhibées [49].

Le suivi analytique a concerné le contrôle du pH avec l'ajout éventuel d'une quantité de NaOH (2,5N) afin de corriger le pH, en cas de chute au-dessous de la valeur limite pour la production de biogaz, qui est de 6,5. A cet égard, on a procédé à l'ajout de NaOH au cours des expérimentations mises en œuvre.

#### **2.1.2.1.- Effet de l'inoculum sur le démarrage de la fermentation**

Au démarrage, le pH commence avec une valeur de 6,2 au 1<sup>er</sup> jour pour les deux digesteurs I et II considérés. On a pu constater que l'ajout de l'inoculum n'a pas beaucoup d'influence sur l'évolution du pH dans le cas du digesteur II, en comparaison avec l'évolution au niveau du digesteur I. La correction du pH a été réalisée dès le 1<sup>er</sup> jour avec une solution de NaOH pour atteindre le seuil minimum recherché de 6,5. Les deux digesteurs en question réagissent ainsi presque de la même façon.

#### **2.1.2.2.- Effet de l'agitation sur le démarrage de la fermentation**

Au niveau des digesteurs III et IV, on a pu discerner que l'agitation mécanique a un effet appréciable sur la rapidité du processus de fermentation. Pour le digesteur IV agité, le pH évolue, ainsi, rapidement pour atteindre une valeur maximale au 15<sup>ème</sup> jour dépassant le pH limite (supérieur à 8). Le pH atteint déjà la valeur de 8 à partir du 13<sup>ème</sup> jour. Pour le digesteur III, la période de fonctionnement s'est prolongée jusqu'au 18<sup>ème</sup> jour, le biogaz était produit même à des valeurs de pH atteignant 7,9 et il s'est annulé pour un pH égal à 8,2.

Rappelons que l'on a procédé à la correction du pH dès le 1<sup>er</sup> jour avec une solution de NaOH pour atteindre la limite inférieure de 6,5.

#### **2.1.2.3.- Effet de la température sur le démarrage de la fermentation**

L'évolution du pH au niveau du digesteur III a présenté trois phases: une première phase de croissance du 2<sup>ème</sup> au 4<sup>ème</sup> jour en passant d'un pH variant de 6,4 à 7,4. Le pH diminue par la suite jusqu'au 8<sup>ème</sup> jour pour atteindre une valeur de pH de 6,85 (phase de décroissance). Vers le 9<sup>ème</sup> jour, le pH augmente d'une façon linéaire pour accéder à une valeur maximale le dernier jour de la production gazeuse. Contrairement au digesteur III, la courbe d'évolution du pH au niveau du digesteur I suit une allure presque linéaire le long de deux semaines (jusqu'au 16<sup>ème</sup> jour). Les valeurs diminuent brusquement puis augmentent pour atteindre une valeur maximale égale à 8,25 le dernier jour.

### 2.1.3.- Détermination de la MS

Les résultats des analyses de MS sont récapitulés, pour les divers digesteurs, dans le tableau IV.

**Tableau IV.-** Pourcentages (%) MS des substrats introduits dans les différents digesteurs

Digesteur	Pourcentages (%) MS des mélanges introduits	
<b>Expérimental I</b>	15,8	
<b>Expérimental II</b>	13,6	
<b>Expérimental III</b>	16,6	
<b>Expérimental IV</b>	15,3	
<b>Rural</b>	Introduction initiale (bouse fraîche + Bouse noire)	Introduction ultérieure (bouse fraîche)
	5,3	7,5

L'analyse des données du tableau IV permet de constater qu'au niveau de tous les digesteurs expérimentaux, les pourcentages de MS sont presque similaires (allant de 13,6% à 16,6%). La plus faible valeur de MS a été enregistrée dans le cas du digesteur II.

Rappelons que l'objectif recherché lors de cette expérimentation était la comparaison de la biométhanisation en faisant varier certains paramètres (inoculum, agitation et température) tout en gardant autant que possible des conditions expérimentales analogues (pH, MS, ...).

En ce qui concerne le digesteur rural, le mélange introduit présente un taux de MS faible par rapport au substrat introduit ultérieurement (5,3% contre 7,5%). Il est également plus faible que celui utilisé dans le digesteur II. Une telle pratique rurale a été dictée par l'intérêt d'une bonne dilution des bouses introduites pour une meilleure production de biogaz.

### 2.2.- Suivi environnemental

Ce suivi a touché seulement le digesteur rural. L'analyse des MES et de la DBO<sub>5</sub> a été effectuée sur les deux mélanges initialement et ultérieurement introduits, alors que pour la DCO, les mesures ont été réalisées une seule fois sur le mélange initial. Les résultats sont donnés dans le tableau V.

Le bilan de dépollution des MES comme celui de la DBO<sub>5</sub> augmente en fonction de la concentration de MS introduite dans le digesteur. En effet, la réduction des MES est plus importante quand le pourcentage de MS est plus élevé.

Les digesteurs sont avant tout des outils de dépollution et le rendement d'épuration donnent une image sur l'efficacité du traitement [49]. Malheureusement, on n'a pas eu la chance de vérifier intégralement cette efficacité puisque l'on n'a pas pu déterminer le bilan de dépollution de la DCO, suite au dysfonctionnement survenu au niveau de l'appareillage de mesure disponible.



**Tableau V.-** Suivi de principaux paramètres environnementaux du digesteur rural  
(Mélange 1: Mélange initialement introduit et Mélange 2: Mélange ultérieurement introduit)

<b>Paramètres suivis</b>	<b>Mélange 1*</b>	<b>Mélange 2*</b>
MES avant fermentation (mg/l)	13,9	20,5
MES après fermentation (mg/l)	12,3	12,2
<b>Bilan de dépollution des MES (%)</b>	<b>11,5</b>	<b>40,4</b>
DBO <sub>5</sub> début fermentation (mg d'O <sub>2</sub> /l)	406,7	573,5
DBO <sub>5</sub> fin fermentation (mg d'O <sub>2</sub> /l)	323,7	354,2
<b>Bilan de dépollution de la DBO<sub>5</sub> (%)</b>	<b>20,4</b>	<b>38,1</b>
DCO (mg d'O <sub>2</sub> /l) début fermentation	14,6	-

### 2.3.- Suivi quantitatif de la productivité gazeuse des digesteurs expérimentaux

La production de gaz dans les digesteurs expérimentaux, conduits en discontinu, a débuté après la phase de démarrage avec une quantité croissante progressivement pour atteindre un niveau de production stable, puis, elle commence à chuter.

#### 2.3.1.- Incidence de l'inoculum sur la productivité gazeuse

L'entrée en production de biogaz pour le digesteur II a débuté dès que la valeur limite inférieure de pH convenable pour la production de biogaz a été atteinte (le 5<sup>ème</sup> jour). Contrairement, dans le cas du digesteur I, la phase de démarrage a présenté des valeurs de pH convenables pour la production de biogaz, mais, il n'y avait de biogaz produit que le 7<sup>ème</sup> jour. Ce résultat pourrait être probablement dû aux populations bactériennes non encore suffisamment formées.

L'entrée rapide en production du digesteur II est due à la présence de bouse noire qui garantit l'existence des populations bactériennes, permettant ainsi un gain de deux jours dans la phase de démarrage. Néanmoins, ceci a une influence sur la durée de sa phase de production qui a été plus courte, en raison de son entrée en production plus rapide.

À propos de la production journalière, malgré que le pic enregistré du biogaz produit corresponde au digesteur I, la quantité totale de production a été un peu plus élevée en faveur du digesteur II (141 ml de biogaz produit contre 136 ml pour le digesteur I).

#### 2.3.2.- Incidence de l'agitation sur la productivité gazeuse

Le suivi de l'incidence de l'agitation sur le déroulement du processus de production de biogaz est comparable à l'effet de l'ajout de l'inoculum de point de vue rapidité du processus de production (relation de proportionnalité).

L'effet considérable de l'agitation dans un digesteur est dû au fait que l'agitation permet de dégager les bulles de gaz à partir des couches profondes, de maintenir l'homogénéité de la température à différents niveaux et d'éviter la consolidation de la croûte à la surface du digesteur. Elle favorise, en plus, l'approvisionnement des bactéries en substances nutritives et leur transport au substrat frais, nouvellement introduit. Ceci influe positivement sur l'évolution de la productivité du digesteur IV (187 ml de biogaz produit contre 134 ml pour le digesteur III). Les pics de production journalière enregistrés, sont de l'ordre de 25 ml/j et 27 ml/j correspondant respectivement aux digesteurs III et IV.

### 2.3.3.- Incidence de la température sur la productivité gazeuse

Le suivi de l'effet de l'augmentation de la température sur le déroulement du processus de production de biogaz a été apprécié en comparant les courbes d'évolution de la productivité de deux digesteurs I et III. Plus la température est élevée ( $T^\circ = 35^\circ\text{C}$  au lieu de  $T^\circ = 25^\circ\text{C}$ ), plus la productivité gazeuse était importante et le processus de production était rapide.

## 2.4.- Caractérisation qualitative de la productivité gazeuse du digesteur rural

### 2.4.1.- Composition du biogaz produit

Le biogaz produit par le digesteur rural a subi un conditionnement (filtration et réduction de l'humidité). À cet égard, le suivi a été réalisé avant et après conditionnement pour apprécier qualitativement l'importance de ce dernier. L'évaluation de la performance de conditionnement réalisé est interprétée à partir des résultats d'analyse de la composition du biogaz produit relatés dans le tableau VI.

**Tableau VI.-** Composition du biogaz produit au niveau du digesteur rural

	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>H<sub>2</sub>S (%)</b>	<b>H<sub>2</sub> (%)</b>
<b>Avant conditionnement</b>	58,1	40,9	Traces	Traces
<b>Après conditionnement</b>	66,1	32,7	Traces	Traces

D'après les résultats obtenus, le pourcentage de méthane (CH<sub>4</sub>) avant conditionnement est proche de la réalité de la biomasse bovine traitée (58%). Ce pourcentage a augmenté de 8% après conditionnement, ce qui donne de l'importance au traitement du biogaz, puisqu'il assure davantage une réduction en éléments polluants (CO<sub>2</sub>, ...) ainsi qu'une intensification de la concentration en CH<sub>4</sub>.

À propos du pourcentage de CO<sub>2</sub>, il s'est réduit avec l'augmentation de la concentration en MS. Ceci pourrait être expliqué par la dissolution de l'ammoniac, élevant ainsi la valeur du pH.

### 2.4.2.- Pouvoir calorifique du biogaz produit

Les résultats obtenus correspondant aux pouvoirs calorifiques PCI et PCS avant et après conditionnement du biogaz sont indiqués dans le tableau VII. Selon MONZAMBE (2002), la valeur calorifique du biogaz est proportionnelle à sa teneur en CH<sub>4</sub>. Elle varie entre 5000 et 8500 kcal/m<sup>3</sup> [50]. L'analyse des résultats permet de constater que les pouvoirs calorifiques répondent aux normes, tout en dévoilant l'intérêt qualitatif du conditionnement adopté.

**Tableau VII.-** Résultats de pouvoir calorifique du biogaz de digesteur rural

	<b>PCI (kcal /Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>PCS (kcal /Nm<sup>3</sup>)</b>
<b>Avant conditionnement</b>	4973	5532
<b>Après conditionnement</b>	5210	5932

## Conclusion

Les résultats des expérimentations réalisées lors de cette étude, relative à la biométhanisation appliquée à la biomasse bovine, montrent que la performance d'un digesteur, quelque soit expérimental ou rural, d'un point de vue production gazeuse dépend essentiellement de la nature des matières à fermenter, de l'agitation du substrat, de la température maintenue au cours de la digestion et aussi de l'ajustement du pH et de la MS introduite.

Il ressort essentiellement les constatations ci-après.

- Les suivis des MES et de la DBO<sub>5</sub> dans le cas du digesteur rural des bouses bovines ont montré que la biométhanisation permet une réduction de la charge polluante qui prend plus d'importance avec l'augmentation de la concentration en MS de la matière à fermenter démontrant ainsi que la biométhanisation est un procédé très bénéfique en termes de valorisation énergétique et de recyclage de la MO pour la préservation de l'environnement.
- L'évaluation quantitative du biogaz produit par les divers digesteurs expérimentaux étudiés révèle que la production maximale enregistrée de biogaz est obtenue avec une fermentation discontinue à une température égale à 35°C et avec agitation (digesteur IV) aussi bien sur le plan pic de production (27 ml/j) que sur le plan quantité totale produite (187 ml).
- La caractérisation qualitative du biogaz rural issu des bouses bovines montre un intérêt certain du post-traitement par conditionnement et une qualité acceptable sur les plans composition et pouvoir calorifique.

Dans l'avenir, il est recommandé de réaliser les mêmes suivis environnemental et énergétique sur les deux types de digesteurs (expérimental et rural) en adoptant le même mode de digestion (procédé en discontinu ou en continu), et surtout être soumis aux mêmes conditions pour mieux valoriser les résultats obtenus. Une étude comparée permet de choisir les conditions de fonctionnement assurant la bonne performance du digesteur à mettre en œuvre.

## Remerciements

Ce travail a été rendu possible grâce à la contribution:

- du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet, Tunisie, qui a mis à notre disposition son laboratoire «Biogaz» (analyses physico-chimiques et caractérisations quantitatives) et ses digesteurs (expérimentaux et rural) acquis dans le cadre de la Coopération Tuniso-Chinoise.
- de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte qui nous a permis la réalisation des analyses qualitatives du biogaz produit.

## Références bibliographiques

- [1].- Tou I., Igoud S., Touzi A., 2001.- Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales. Rev. Energ. Ren.: Production et Valorisation-Biomasse: 103-108. [http://www.cder.dz/download/bio\\_17.pdf](http://www.cder.dz/download/bio_17.pdf)
- [2].- Servigne P., 2012.- Une agriculture sans pétrole. Pistes pour des systems alimentaires résilients. Barricade, liege, Belgique, 36 p. [www.barricade.be/sites/.../2012servigne-agriculturesanspetrole-4.pdf](http://www.barricade.be/sites/.../2012servigne-agriculturesanspetrole-4.pdf)

- [3].- Mbuligwe S.E., Kassenga G.R., 2004.- Feasibility and strategies for anaerobic digestion of solid waste for energy production in Dar es Salaam City, Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling* (42), 2004, 183-203.  
[top25.sciencedirect.com/.../resources-conservation-an...](http://top25.sciencedirect.com/.../resources-conservation-an...)
- [4].- Afilal M.E., Moncif M., Benyamna A., 2007.- Valorisation des déchets organiques par fermentation méthanique. *Rev. Energ. Ren. : CER'07 Oujda*: 9-12.  
[www.cder.dz/download/cer07\\_2.pdf](http://www.cder.dz/download/cer07_2.pdf)
- [5].- 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* (90): 2537-2541.  
[www.researchgate.net/...Substituting\\_energy\\_crops\\_](http://www.researchgate.net/...Substituting_energy_crops_)
- [6].- Afilal M.E., Bakx A., Belakhdar N., Membrez Y., 2010.- Evaluation of the biogas potential of organic waste in the northern provinces of Morocco. *Rev. Energ. Ren.*, vol. 13 n° 2: 249-255. [www.cder.dz/download/Art13-2\\_5.pdf](http://www.cder.dz/download/Art13-2_5.pdf)
- [7].- Afilal M.E., Belkhadir N., Daoudi H., Elasri O., 2013a.- Fermentation méthanique des différents substrats organiques (Methanic fermentation of different organic substrates). *J. Mater. Environ. Sci.*, 4 (1): 11-16.  
[www.jmaterenvirosci.com/Document/vol4/2-JMES-190-2012-Afilal.pdf](http://www.jmaterenvirosci.com/Document/vol4/2-JMES-190-2012-Afilal.pdf)
- [8].- Afilal M.E., Belkhadir N., Merzak Z., 2013b.- Biogas Production from Anaerobic Digestion of Manure Waste Moroccan Case. *Global Journal of Science Frontier Research Biological Sciences*, vol. XIII Issue I, 3 p.  
[journalofscience.org/index.php/GJSFR/article/.../636](http://journalofscience.org/index.php/GJSFR/article/.../636)
- [9].- Afilal M.E., Elasri O., Merzak Z., 2014.- Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz (Organic waste characterization and evaluation of its potential biogas). *J. Mater. Environ. Sci.*, 5 (4): 1160-1169.  
[www.jmaterenvirosci.com/Document/.../144-JMES-808-2014-Afilal.pdf](http://www.jmaterenvirosci.com/Document/.../144-JMES-808-2014-Afilal.pdf)
- [10].- Tsai W.T., Chou Y.H., Chang Y.M., 2004.- Progress in energy utilization from agrowastes in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (8), 2004, 461-481. [top25.sciencedirect.com/.../energy/.../renewable-and-s](http://top25.sciencedirect.com/.../energy/.../renewable-and-s).
- [11].- 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. Éd. ITAVI, 1<sup>ère</sup> édition, 28 p. [www.itavi.asso.fr/elevage/batiment/energie\\_aviculture\\_ademe.pdf](http://www.itavi.asso.fr/elevage/batiment/energie_aviculture_ademe.pdf)
- [12].- 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*, 30 (10), 2010, 1768-1771.  
[www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20096555](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20096555)
- [13].- M'Sadak Y., Ben M'Barek A., Baraket S., 2012.- Suivis physico-chimique et énergétique de la Biométhanisation expérimentale appliquée à la biomasse bovine.

- Revue Nature & Technologie, n° 7, Juin 2012, 81-86.  
[http://www.univ-chlef.dz/RevueNatec/Art\\_07\\_10.pdf](http://www.univ-chlef.dz/RevueNatec/Art_07_10.pdf)
- [14].- M'Sadak Y., Zoghliami R.I., 2012.- Caractérisations physico-chimique, environnementale et énergétique de la Biométhanisation industrielle avicole en Tunisie semi-aride. Algerian Journal of Arid Environment (AJAE), vol. 2 n° 2: 16-27. [www.univ-ouargla.dz/Pagesweb/PressUniversitaire/doc/.../E020202.pdf](http://www.univ-ouargla.dz/Pagesweb/PressUniversitaire/doc/.../E020202.pdf)
- [15].- M'Sadak Y., Ben M'Barek A., Zoghliami R.I., 2013.- Diagnostics environnemental et énergétique des digesteurs anaérobies expérimentaux des fientes avicoles. Revue Nature et Technologie, n°. 8 (C): 19-26. [www.univ-chlef.dz/revuenatec/Art\\_08\\_C\\_03.pdf](http://www.univ-chlef.dz/revuenatec/Art_08_C_03.pdf)
- [16].- M'Sadak Y., Ben M'Barek A. 2013.- Energy, environmental and agronomic valorizations of the rural biomethanisation of the bovine biomass. International Journal of Innovation and Applied Studies (IJIAS), vol. 4, n° 2, 343-352. [www.issr-journals.org/ijias/fr/authid.php?id=612](http://www.issr-journals.org/ijias/fr/authid.php?id=612)
- [17].- 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. Revue Génie Rural, Janvier-Février, n° 1-2, 5-10.
- [18].- Jain M.K., Singh R., Tauro P., 1982.- Biochemical changes during anaerobic digestion of animal wastes. Journal Water Research, 16 (4), 411-415.
- [19].- Shiralipour A., Smith P.H., 1984.- Conversion of biomass into methane gas. Journal Biomass, 6 (1-2), 85-92. <http://www.refdoc.fr/Detailnotice?idarticle=12234264>
- [20].- Hessami M.A., Christensen S., Gani R., 1996.- Anaerobic Digestion of Household Organic Waste to Produce Biogas. In: Proceedings of the World Renewable Energy Congress (WREC'96), 954-957.
- [21].- Mallard P., Rogeau D., Gabrielle B., Vignoles M., Sablayrolles C., Le Corff V., Carrère M., Renou S., Vial E., Muller O., Pierre N., Coppin Y., 2005.- Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Rapport final de l'étude répondant au Marché No. 0375C0081 entre l'ADEME et le Groupement CEMAGREF-INRA-CREED-Anjou Recherche-Ecobilan-Orval, 331 p.  
[www2.ademe.fr/servlet/getBin?name...pdf](http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name...pdf)
- [22].- Maurer M., 2005.- Programme Energivie - Biogaz agricole. Note de synthèse : Analyse des points bloquants à l'émergence de sites pilotes, 7 p.  
[www.energivie.info/.../biogaz/...biogaz/annexe-emergence-biogaz-alsace...](http://www.energivie.info/.../biogaz/...biogaz/annexe-emergence-biogaz-alsace...)
- [23].- Almoustapha O., Millogo-Rasolodimby J., 2008.- Production de biogaz et de compost à partir de eichhorniacrassipes, (mart) solms-laub (pontederiaceae) pour un développement durable en Afrique sahélienne. Revue Vertigo, 8 (1).  
<http://vertigo.revues.org/1227>
- [24].- Saidi A., Abada B., 2007.- La biométhanisation: une solution pour un développement durable. Rev. Energ. Ren.: CER'07 Oujda: 31-35.

[www.cder.dz/download/cer07\\_7.pdf](http://www.cder.dz/download/cer07_7.pdf)

- [25].- Beauregard, S. 2008.- La méthanisation du lisier de porcs dans une optique de développement durable. Conférence présentée dans le cadre des 17<sup>ème</sup> Journées Agricoles et Agroalimentaires, Montréal-Laval-Lanaudière, Journée sur la Production Porcine, Saint-Charles-Boromé, 14 p.
- [26].- Brodeur C., Crowley D., Desmeules X., Pigeon S., St-Arnaud R.M., 2008.- La Biométhanisation à la ferme. Publication n°. EVC 033, Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 18 p.
- [27].- 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): 430-438. [ideas.repec.org/a/eee/.../v85y2008i6p430-438.html](http://ideas.repec.org/a/eee/.../v85y2008i6p430-438.html)
- [28].- Pouech Ph., 2008.- Principales caractéristiques des digestats. Recueil des interventions de la Journée Technique Nationale, ADEME, France: « Réussir un projet de méthanisation associant des déchets ménagers agricoles et industriels. Les points clés. », 6 p.
- [29].- Bouallagui H., Lahdheb H., Ben Romdan E., Rachdi B., Hamdi M., 2009.- Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of Environmental Management* (90), 1844-1849.  
[www.sciencedirect.com/science/.../pdf?...1...](http://www.sciencedirect.com/science/.../pdf?...1...)
- [30].- Delacour E., 2009.- La méthanisation : production d'énergie et de compost à partir des déchets collectés sur le territoire. *Bioénergies, quelles utilisations et quels enjeux en Picardie ? Printemps de l'industrie*, 18 p.
- [31].- Frantz R., Meier Wawrzyniak V., 2009.- La méthanisation agricole en France: Quelle technologie? Voie liquide continue ? Voie sèche ? *Ateliers SIMA 2009*, 17 p.
- [32].- 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): 3140-3142.  
[air.unimi.it/.../Tambone%20et%20al%2020091%20B...](http://air.unimi.it/.../Tambone%20et%20al%2020091%20B...)
- [33].- Karellas S., Boukis I., Kontopoulos G., 2010.- Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14): 1273-1282.  
[www.sciencedirect.com/science/.../pdf?...1...](http://www.sciencedirect.com/science/.../pdf?...1...)
- [34].- Erguder T.H., Tezel U., Guven E., Demirer G.N., 2001.- Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Manage.*, 21 (7): 643-650.
- [35].- Angelidaki I., Ellegaard L., 2003.- Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: status and future trends. *Appl. Biochem. Biotech.*, 109 (1-

3): 95-105.

- [36].- RECORD, 2003.- Méthanisation des déchets organiques. Étude bibliographique, No. 01-0408/1A, 194 p.  
[www.emse.fr/tice/uved/gidem/res/record\\_methanisation.pdf](http://www.emse.fr/tice/uved/gidem/res/record_methanisation.pdf)
- [37].- Westerman P., Bicudo J., 2005.- Management considerations for organic waste use in agriculture. *Bioresour. Technol.* (96): 215-221.  
[www.sciencedirect.com/science/.../pdf?...1...](http://www.sciencedirect.com/science/.../pdf?...1...)
- [38].- Albertson-Maurice L., Pruden A., Oliver R.T., 2006.- Enhanced anaerobic digestion of biomass waste for optimized production of renewable energy and solids for compost. *International Congress Series*, vol. 1293, 221-229.  
[www.sciencedirect.com/science/journal/.../1293](http://www.sciencedirect.com/science/journal/.../1293)
- [39].- Gomez X., Cuetos M.J., Cara J., Moran A., Garcia A.I., 2006.- Technical Note Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy* (31): 2017-2024.
- [40].- Buffière P., Carrère M., Lemaire O., Vasquez J., 2007.- Guide méthodologique pour l'exploitation des unités de méthanisation de déchets solides. *Projet METHAPI-Expertise*, 40 p.
- [41].- Chavanne X. et Frang J.P., 2008.- Le rendement énergétique de la production d'éthanol à partir de maïs. *C. R. Geoscience* (340): 263-287.
- [42].- 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 (17): 8288-8293. [www.unboundmedicine.com/.../Anaerobic\\_digestion...](http://www.unboundmedicine.com/.../Anaerobic_digestion...)
- [43].- 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 (17): 8112-8117.  
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09608...>
- [44].- Holm-Nielsen J.B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P., 2009.- The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology* 100 (22): 5478-5484. [top25.sciencedirect.com/.../bioresource-technology/...](http://top25.sciencedirect.com/.../bioresource-technology/...)
- [45].- Ramade F., 1993.- *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*, Édiscience internationale, Paris, France, 822 p.
- [46].- Moletta R., 1989.- Contrôle et conduite des digesteurs anaérobies. *Revue des Sciences de l'Eau* (2): 265-293. [www.rse.inrs.ca/art/volume2/v2n2\\_265.pdf](http://www.rse.inrs.ca/art/volume2/v2n2_265.pdf)
- [47].- Hess J. 2007.- Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. Thèse de Doctorat, Université de Nice- Sophia Antipolis-UFR Sciences, France, 228 p.

[https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00257347/PDF/These\\_JHess.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00257347/PDF/These_JHess.pdf)

- [48].- Moletta R., 2015.- La méthanisation, 3ème Éd., Lavoisier, Paris, France, 513 p.  
<https://books.google.ca/books?isbn=2743069910>
- [49].- Roque H., 1981.- Fondements théoriques du traitement biologique des eaux. Chap. 3-6: Traitement anaérobie: 1476-1532.
- [50].- Mozambe M., 2002.- La problématique de la biométhanisation en République démocratique du Congo. Université du Québec, Canada, 38 p.