
Soumis le : 20 Mai 2010
 Forme révisée acceptée le : 18 Décembre 2011
 Email de l'auteur correspondant :
 msadak.youssef@yahoo.fr

Suivis physico-chimique et énergétique de la biométhanisation expérimentale appliquée à la biomasse bovine

M'SADAK Youssef *, BEN M'BAREK Abir *, BARAKET Salma*

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

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. Le suivi de ces digesteurs a mis l'accent surtout sur l'effet de la variation de certains paramètres physico-chimiques de la digestion anaérobie, en discontinu, essentiellement sur l'évolution du pH au cours du processus de fermentation anaérobie et sur la production quantitative gazeuse. On peut dégager particulièrement que 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 mélange substrat-inoculum.

Mots clés : Biométhanisation, digestion en discontinu, bouse bovine, inoculum, agitation mécanique, productivité quantitative gazeuse

Abstract

The present work consists on studying the anaerobic digestion, applied to bovine manure made in four experimental digesters with different operating parameters. Monitoring of these digesters has focused mainly on the effect of variation of certain physicochemical parameters of anaerobic digestion, discontinuously, on pH evolution during the anaerobic fermentation process, and on quantitative gas production. It can be released particularly that experimental biogas production varies with the adopted operating parameters. It is maximal in the presence of high temperature and under mechanical agitation of the inoculum-substrate mixture.

Keywords : Anaerobic digestion, discontinuous digestion, bovine manure, inoculum, mechanical agitation, gaseous quantitative productivity.

1. Introduction

La biométhanisation est un processus de biodégradation de la matière organique (MO) fermentescible qui s'accompagne de la production de biogaz, mélange de méthane et de dioxyde de carbone [13].

La production du biogaz et plus précisément le biométhane, permettra une préservation de l'environnement [15 ; 4 ; 5 ; 20 ; 11 ; 12 ; 16 ; 19 ; 10 ; 1] et un développement durable des zones rurales et des régions enclavées, ainsi qu'une diversification des ressources énergétiques [18 ; 4 ; 2 ; 7 ; 9 ; 17].

Le bon fonctionnement du procédé de biométhanisation, particulièrement son potentiel énergétique, est conditionné, en grande partie, par les conditions physico-chimiques du substrat à traiter, parmi lesquelles l'inoculum, l'agitation et la température ont constitué les facteurs étudiés alors que, le pH et la

productivité quantitative gazeuse ont fait l'objet d'un suivi expérimental tout le long du cycle de production.

Dans cette optique, la présente étude se propose d'approfondir l'analyse de ces paramètres de fonctionnement au niveau de quatre digesteurs pilotes de laboratoire mis en œuvre pour traiter les déjections bovines à l'échelle expérimentale, tout en appréciant surtout leurs effets sur la productivité quantitative gazeuse.

2. Matériels et Méthodes

2.1. 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» du Centre de Formation

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

2.2. Matériel expérimental

2.2.1. 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 (comme inoculum) extraites de la fosse septique adoptée. Les caractéristiques de ces deux bouses sont relatées dans le tableau 1.

Tableau 1. Quelques caractéristiques physico-chimiques des bouses bovines utilisées

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

2.2.2. Dispositif expérimental

Comme c'est déjà mentionné précédemment, il s'agit de quatre digesteurs expérimentaux (capacité unitaire de 500 ml) pour le suivi des paramètres physico-chimiques et de la production quantitative du biogaz produit à partir de la biomasse bovine (Photo).

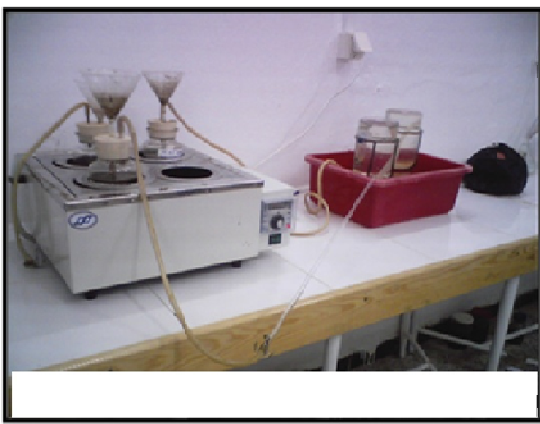


Photo. Digesteurs pilotes de laboratoire

Les conditions expérimentales relatives à chaque digesteur considéré sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2. Données générales sur les digesteurs mis en œuvre

Digesteur	Bouses bovines	Température (°C)	Agitation
Expérimental I	Fraîche	25	Sans agitation
Expérimental II	Fraîche et Noire	25	Sans agitation

Expérimental III	Fraîche	35	Sans agitation
Expérimental IV	Fraîche	35	Avec agitation

2.3. Alimentation des digesteurs avant démarrage

Le digesteur de type discontinu est alimenté par intermittence avec des substrats pailleux que l'on peut noyer 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 [3].

La biométhanisation expérimentale en discontinu exige ainsi un seul apport en substrat, inoculum et eau au début du processus. Une fois le remplissage réalisé, 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. On a introduit deux volumes d'eau contre un volume de bouse. Le tableau 3 mentionne les quantités de chaque matière première introduite dans les digesteurs considérés.

Tableau 3. Quantités introduites de substrat, d'inoculum et d'eau

Digesteur	Substrat (ml)	Inoculum (ml)	Eau (ml)
Expérimental I	100	-	200
Expérimental II	60	30	180
Expérimental III	100	-	200
Expérimental IV	100	-	200

2.4. Analyses physico-chimiques et énergétiques mises en œuvre

Les analyses physico-chimiques et énergétiques ont été réalisées au laboratoire « Biogaz » du CFPAEB.

2.4.1. Analyses physico-chimiques

Elles ont porté, principalement, sur le pH et la matière sèche (MS). Le pH a été suivi quotidiennement. A cet égard, l'étude a concerné son évolution selon les conditions physico-chimiques considérées, à savoir : avec ou sans inoculum, avec ou sans agitation et variation de la température. Le taux de MS a été déterminé une seule fois sur les mélanges introduits dans les divers digesteurs utilisés.

Il est à noter que le pH constitue une mesure globale des ions hydrogène à l'aide d'un pH-mètre. Par ailleurs, le taux de 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.

2.4.2. Suivi de la productivité quantitative gazeuse

Le suivi tant quantitatif que qualitatif du biogaz produit est une étape primordiale pour une vraie caractérisation de ce Coproduit principal de la biométhanisation, en vue d'une valorisation énergétique optimale. La caractérisation qualitative n'a pas fait partie de cette étude. Le suivi quantitatif gazeux a été mis en œuvre, afin de déterminer l'effet de la variation de quelques paramètres physico-chimiques sur la quantité produite de biogaz. Pour la quantification, on a disposé d'un bac rempli d'eau (Photo) dans lequel, on a installé des béciers gradués pour récupérer le gaz produit. Le gaz chasse l'eau en prenant sa place, d'où, on peut déterminer directement la quantité gazeuse produite à partir des graduations des béciers.

3. Résultats et discussion

3.1. Suivi du pH

3.1.1. Importance de l'étude du pH

On admet que le pH est le premier indicateur du mauvais fonctionnement éventuel d'un digesteur. Si le pH est au-dessous de 6,5, l'ajout de la chaux ou du bicarbonate de sodium corrige cette anomalie [6]. Par ailleurs, si le pH est au-dessus de 8,5, le biogaz sera riche en H₂S [8]. 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 [14].

Le suivi analytique a concerné le contrôle du pH avec l'ajout éventuel d'une quantité de NaOH (2,5N), afin de corriger l'anomalie observée.

Les figures 1, 2 et 3 ci-après illustrent les différentes courbes d'évolution du pH au niveau de quatre digesteurs expérimentaux étudiés, tout en montrant l'incidence comparée de certains paramètres physico-chimiques sur le pH relevé.

3.1.2. Évaluation de l'effet de l'inoculum sur le début de la fermentation

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.

La correction du pH a été réalisée dès le 1^{er} jour (vu que le pH a commencé avec une valeur de 6,2) avec une solution de NaOH pour atteindre le seuil minimum recherché de 6,5.

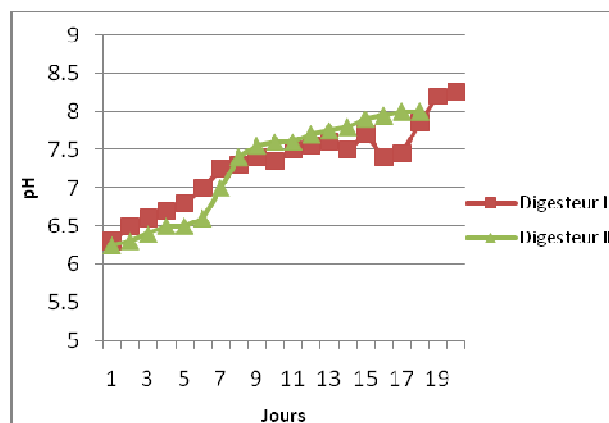


Figure 1. Variation du pH en fonction du temps (Digesteurs I et II)

On constate, d'après la figure 1, que l'ajout de l'inoculum n'a pas beaucoup d'influence sur l'évolution du pH dans les deux digesteurs I et II qui présentent presque un même comportement tout au long de la phase de démarrage.

Une légère augmentation du pH en faveur du digesteur II, a été détectée dès le 8^{ème} jour.

3.1.3. Évaluation de l'effet de l'agitation sur le processus de la fermentation

On remarque que l'agitation mécanique a un effet considérable sur le déroulement du processus de fermentation au niveau du digesteur IV, bénéficiant de cette agitation, d'une part, suite à l'augmentation des valeurs du pH, dès le 6^{ème} jour, et d'autre part, de l'importance de l'agitation sur la rapidité du processus de fermentation (Figure 2).

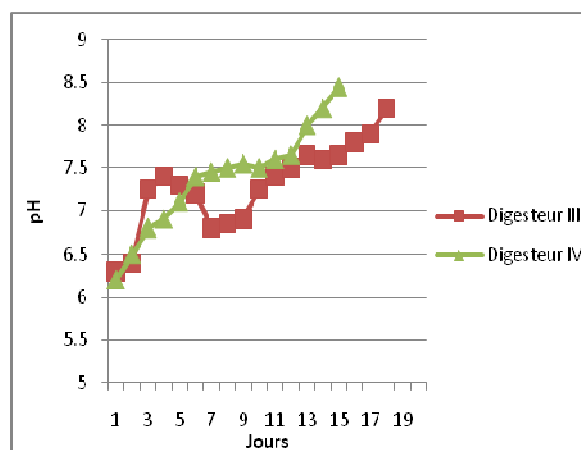


Figure 2. Variation du pH en fonction du temps (Digesteurs III et IV)

On a procédé à la correction du pH, dès le 1^{er} jour, avec une solution de NaOH pour atteindre la limite inférieure de 6,5. Pour le digesteur IV agité, le pH évolue, ainsi, rapidement pour atteindre la valeur de 8 à partir du 13^{ème} jour. Le fonctionnement s'est prolongé pour deux

autres jours. Au contraire, la période de fonctionnement dans le digesteur III s'est prolongée jusqu'au 18^{ème} jour pour un pH égal à 8,2. Le biogaz était produit même à des valeurs de pH supérieures à 7,9.

3.1.4. Évaluation de l'effet de la température sur le début de la fermentation

On constate que la température a un effet plus ou moins considérable sur l'augmentation ou la diminution des valeurs du pH au niveau de digesteurs I et III (Figure 3). La courbe d'évolution du pH au niveau du digesteur I suit une allure presque linéaire tout le long de la phase de production. Les valeurs diminuent brusquement vers le 16^{ème} jour, puis augmentent pour atteindre une valeur maximale égale à 8,25 le dernier jour. Au contraire, la courbe d'évolution du pH au niveau du digesteur III présente une allure linéaire croissante dès le 7^{ème} jour pour accéder à une valeur maximale encore égale à 8,25 le dernier jour.

La température a un effet sur la phase de démarrage et surtout le long de la première semaine du cycle de fermentation.

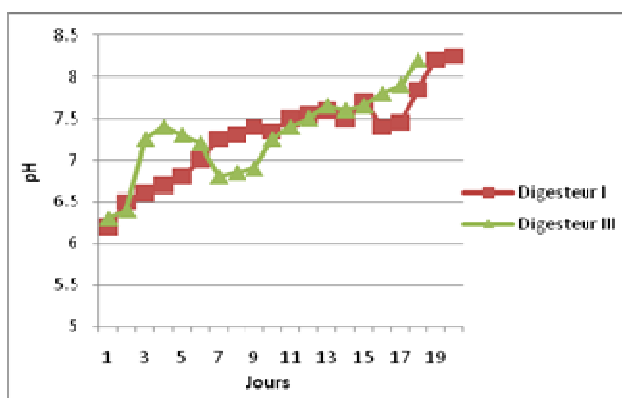


Figure 3. Variation du pH en fonction du temps (Digesteurs I et III)

3.2. Détermination de la MS

Les résultats des analyses de MS sont récapitulés, pour les divers digesteurs dans le tableau 4.

Tableau 4. % MS des substrats introduits dans les différents digesteurs

Digesteur	% MS des mélanges introduits
Expérimental I	15,8
Expérimental II	13,6
Expérimental III	16,6
Expérimental IV	15,3

L'analyse des données de ce tableau permet de constater qu'au niveau de tous les digesteurs

expérimentaux, les % 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 faisant recours aux ajustements nécessaires.

3.3. Suivi quantitatif de la productivité gazeuse des digesteurs expérimentaux

La production de gaz dans les digesteurs expérimentaux, conduits en discontinu, débute après la phase de démarrage avec une quantité croissante progressivement pour atteindre un niveau de production stable, puis elle commence à chuter (Figures 4, 5 et 6).

3.3.1. 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^{ème} 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^{ème} jour (Figure 4). Ce résultat pourrait être probablement dû à un retard de multiplication des populations bactériennes.

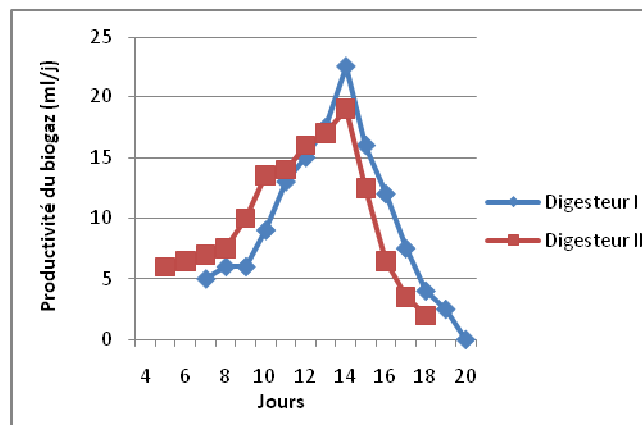


Figure 4. Variation de la productivité gazeuse en fonction de l'inoculum (Digesteurs I et II).

L'entrée rapide en production du digesteur II est due à la présence de bouses noires qui garantit l'existence des populations bactériennes, permettant ainsi un gain de deux jours dans la phase de démarrage. Mais ce gain relevé a une influence sur la durée de la phase de production qui a été plus courte, en raison de l'entrée plus rapide en production.

À propos de la production, elle a été un peu plus élevée en faveur du digesteur II, avec une quantité totale produite d'environ 141 ml, par contre, le digesteur I a enregistré une production de l'ordre de 136 ml (Figure 4).

3.3.2. Incidence de l'agitation sur la productivité gazeuse

Le suivi de l'effet de l'agitation sur le déroulement du processus de production de biogaz (Figure 5) est comparable à l'effet de l'ajout de l'inoculum, de point de vue rapidité du processus de fermentation et en termes de production.

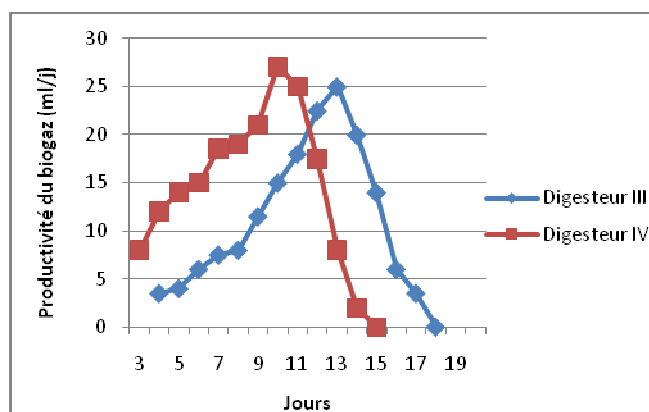


Figure 5. Variation de la productivité gazeuse en fonction de l'agitation (Digesteurs III et IV)

L'effet considérable de l'agitation dans un digesteur est dû au fait que l'agitation favorise l'approvisionnement des bactéries en substances nutritives et leur transport au substrat frais nouvellement introduit. Cette agitation a influé positivement sur l'évolution de la productivité du digesteur IV agité (Figure 5), qui a enregistré une augmentation de production de l'ordre de 53 ml par rapport au digesteur III (187 ml contre 134 ml) avec un pic de 27ml/j lors du 10^{ème} jour.

3.3.3. Incidence de la température sur la productivité gazeuse

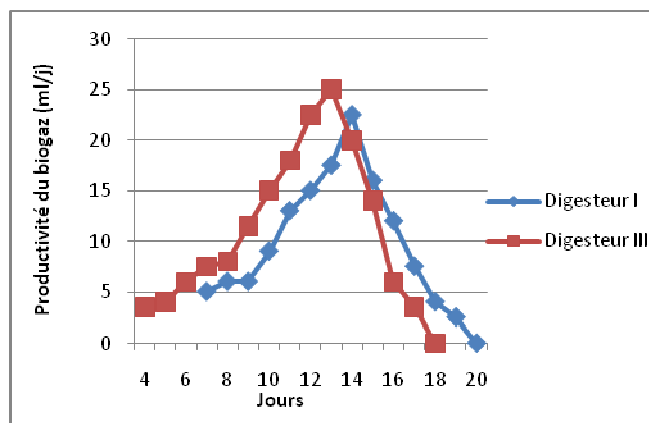


Figure 6. Variation de la productivité gazeuse en fonction de la température (Digesteurs I et III)

Le suivi de l'effet de l'augmentation de la température sur le déroulement du processus de production de biogaz (Figure 6) peut être apprécié en comparant les courbes d'évolution de la productivité de deux digesteurs I ($T^{\circ} = 25^{\circ}C$) et III ($T^{\circ} = 35^{\circ}C$). Plus la température est élevée, plus la productivité gazeuse est importante et le processus de production est rapide.

4. Conclusion

Les résultats préliminaires relevés lors de cette étude, relative à la biométhanisation appliquée à la biomasse bovine, au niveau de quatre digesteurs de laboratoire, alimentés en discontinu, dévoilent que la performance d'un digesteur du point de vue production gazeuse dépend principalement 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 que la production maximale de biogaz est enregistrée dans le cas du digesteur IV, fonctionnant sous les conditions du milieu fermentaire suivantes : des bouses bovines fraîches utilisées comme substrat, tout en ajoutant des bouses noires considérées comme inoculum, celles-ci ont subi une fermentation méthanique à une température égale à $35^{\circ}C$ et sous agitation mécanique. De telles conditions physico-chimiques ont agi considérablement sur la production quantitative gazeuse aussi bien sur le plan pic de production journalière (27 ml/j) que sur le plan quantité totale produite (187 ml).

Ce travail expérimental devrait être poursuivi afin d'établir notamment une comparaison entre les modes de digestion en discontinu et en continu. Ce dernier est actuellement le plus répandu à l'échelle réelle.

Par ailleurs, il convient d'accomplir des analyses qualitatives du biogaz tant sur le plan composition gazeuse que sur le plan pouvoir calorifique.

Remerciements

Nous exprimons nos vifs remerciements au Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (C.F.P.A.E.B.) de Sidi Thabet, Tunisie, pour la mise à notre disposition de son laboratoire «Biogaz» et de ses digesteurs expérimentaux, acquis dans le cadre de la coopération Tuniso-chinoise, afin de réaliser nos essais.

Références

- [1] Abbasi, T. & Abbasi, S.A. (2010). Production of clean energy by anaerobic digestion of phytomass-New prospects for a global warming amelioration technology. *Renew Sustain Energy Rev*, 4 p.
- [2] 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*, 1293, 221-229.
- [3] Almoustapha, O., & Millogo-Rasolodimby, J. (2009). Production de biogaz et de compost à partir de eichhornia crassipes, (mart) solms-laub (pontederiaceae) pour un développement durable en Afrique sahélienne. *Revue Vertigo*, 7, 2.
- [4] Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Appl. Biochem. Biotech*, 109, 95-105.
- [5] 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, 11 p.
- [6] Galy, A., & Pyke, J. (1991). Amelioration of methane yield in cheese whey fermentation by controlling the pH of the methanogenic stage. *Applied Biochemistry and biotechnology*, 27, 1, 217-237.
- [7] 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.
- [8] Graieb, M. (1988). Étude et réalisation d'une installation de méthanisation avec chauffage. Mémoire de Spécialisation, Institut National Agronomique de Tunis, Tunisie.
- [9] Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100, 5478-5484.
- [10] Karagiannidis, A., & Perkoulidis, G. (2009). A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. *Bioresource Technology*, 100, 2355-2360.
- [11] Kupper, T., & Fuchs, J. (2007). Compost et digestat en Suisse. Étude n° 1 : Micropolluants organiques dans le compost et le digestat ; Etude n° 2 : Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes. *Connaissance de l'environnement n° 0743*, Office Fédéral de l'Environnement, Berne, 124 p.
- [12] 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, 8288-8293.
- [13] Pouech, P., Coudure, R., & Marcato, C.E. (2005). Intérêt de la Co-digestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de déchets fermentescibles à l'échelle d'un territoire. *Journées Recherche Porcine*, 37, 39-44.
- [14] Roque, H. (1981). Fondements théoriques du traitement biologique des eaux. Chap. 3-6: Traitement anaérobie, 1476-1532.
- [15] Salminen, E., & Rintala, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review. *Bioresource Technology*, 83, 13-26.
- [16] Satyanarayana, Sh., Murkutea, P., & Ramakant, X. (2008). Biogas production enhancement by Brassica compestries amendment in cattle dung digesters. *Biomass and Bioenergy*, 32, 210-215.
- [17] 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.
- [18] Tou, I., Igoud, S., & Touzi, A. (2001). Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation-Biomasse*, 103-108.
- [19] Ward, A.J., Hobbs, Ph.J., Holliman, P.J., & Jones, D.L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99, 7928-7940.
- [20] Westerman, P., & Bicudo, J. (2005). Management considerations for organic waste use in agriculture. *Bioresource Technology*, 96, 215-221.