

## Etude de bioréacteurs anaérobies expérimentaux pour la production de méthane

Abdelouahab Zaatri<sup>1</sup>, Nouredine Kacem Chaouche<sup>2</sup> et Mounira Karaali<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Electromécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,

<sup>2</sup> Laboratoire de Mycologie

Université Mentouri, Campus Ahmed Hamani, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie

(reçu le 23 Janvier 2011 – accepté le 21 Juin 2011)

**Résumé** - Ce travail présente une première exploration dans la conception, la simulation et l'analyse expérimentale de bioréacteurs anaérobies à alimentation discontinue (batch). L'étude concerne la production du méthane en utilisant la matière organique concentrée, qui consiste en la boue activée enrichie, provenant de la station d'épuration biologique des eaux usées (bassins d'aération). Un modèle mathématique correspondant au processus biotechnologique de méthanisation à deux phases [1, 2] a été implémenté pour simuler le fonctionnement du bioréacteur. Certains paramètres du modèle ont été estimés par une étude bibliographique extensive. Les résultats de simulation permettent d'appréhender la dégradation du substrat, la croissance des bactéries, ainsi que la production du méthane. Sur un plan pratique, un bioréacteur expérimental de capacité 200 litres a été réalisé. Des résultats encourageants ont été obtenus avec des moyens très simples. Le bioréacteur réalisé a produit une quantité appréciable de méthane après environ 27 jours d'incubation.

**Abstract** - This paper presents a first exploration in the design, simulation and experimental analysis of anaerobic bioreactors using discontinuous (batch). The study concerns the production of methane using concentrated organic matter, which consists of activated sludge enriched from the biological purification of waste water (aeration tanks). A mathematical model corresponding to the biotechnological process of biogas in two phases [1, 2] was implemented to simulate the operation of the bioreactor. Some model parameters were estimated by an extensive literature review. The simulation results allow to understand the degradation of the substrate, the growth of bacteria and methane production. On a practical level, an experimental bioreactor of 200 liters capacity was achieved. Encouraging results were obtained with very simple means. The bioreactor achieved has produced a significant amount of methane after about 27 days of incubation.

**Mots clés:** Modélisation de bioréacteur - Méthanisation - Digestion anaérobie - Biotechnologie.

### 1. INTRODUCTION

Actuellement, les applications concernant la digestion anaérobie des polluants continuent de susciter un vif intérêt auprès de la communauté scientifique et industrielle. La méthanisation est un procédé naturel de transformation de la matière organique réalisée par des bactéries en anaérobiose.

Cette transformation aboutit à la formation de biogaz riche en méthane, formant une source d'énergie renouvelable. Lorsque le substrat du digesteur est composé de boues enrichies des stations d'épuration, on parvient à la fois à dépolluer les eaux usées et à produire du biogaz.

Pour analyser le fonctionnement de ces bioréacteurs et prédire leurs performances, la modélisation et la simulation restent des moyens souples et économiques. Les premiers modèles mathématiques de bioréacteurs anaérobies ont été proposés dans les années 1970.

Depuis lors, des modèles plus ou moins complexes, selon le nombre de processus biochimiques considérés, ont été proposés. Le modèle ADM1 pour 'Anaerobic Digestion Model N°1' est un modèle qui a été développé par les chercheurs de l'IWA (International Water Association) [3]. C'est un modèle très complet permettant de simuler au mieux les réacteurs anaérobies. Néanmoins, ce modèle est très complexe, car il décrit 19 processus biochimiques, 3 processus cinétiques de transferts gaz liquide et 7 populations bactériennes différentes. Ce modèle nécessite le réglage de plus de 80 paramètres.

Un modèle plus simple, mais très utilisé, car il concilie précision et complexité, est le modèle AM2, 'Anaerobic Model N°2', qui a été développé en 2001 par l'INRIA. Ce dernier nécessite moins de paramètres [2].

De nombreuses études de simulation et d'estimation des paramètres du modèle AM2 basées sur différentes techniques ont été effectuées. Cependant, compte tenu de la complexité des mécanismes biotechnologiques et des conditions expérimentales spécifiques à chaque bioréacteur, il y a lieu de noter la grande dispersion dans la détermination des paramètres du modèle AM2 [1], [4-7].

Le travail présenté dans cet article concerne l'étude, la simulation et la réalisation expérimentale de bioréacteurs anaérobies à alimentation discontinue (batch), destinés pour la production du méthane.

Par ailleurs, un bioréacteur expérimental de capacité 200 litres a été réalisé. Le substrat utilisé est la boue enrichie provenant de la station d'épuration biologique des eaux usées (bassin de décantation secondaire) située dans la région de Constantine. Des résultats encourageants ont été obtenus.

Par ailleurs, le modèle mathématique AM2 correspondant au processus biologique de la méthanisation à deux phases, a été implémenté pour simuler la production du méthane dans le bioréacteur.

Certains paramètres du modèle ont été estimés par une étude bibliographique extensive, alors que d'autres ont été évalués de façon à obtenir des résultats cohérents qualitativement et quantitativement.

## 2. LA METHANISATION

La méthanisation est le produit du métabolisme anaérobie des matières organiques réalisé dans des digesteurs où la masse microbienne est maintenue en suspension en l'absence de l'air et de la lumière.

La population microbienne est complexe, composée en majorité, de bactéries anaérobies. Au cours de son métabolisme, la flore microbienne libère très peu d'énergie aboutissant à très faible biomasse et transforme la majeure partie du carbone organique en gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) [8].

Les voies métaboliques simplifiées, décrivant le processus de cette transformation, ont été exposées dans un modèle, aujourd'hui largement accepté. Ce modèle fait intervenir plusieurs types de micro-organismes activant trois phases distinctes et successives (Fig. 1):

- La phase d'*hydrolyse et de fermentation* (hydrolyse et acidogénèse) durant laquelle la matière organique complexe, telles que les protéines, les polysaccharides et les lipides, est hydrolysée en monomères grâce aux enzymes excrétées dans le milieu.

Après hydrolyse, les monomères sont transformés en acides gras volatils (AGV) comme l'acétate, le propionate, le butyrate, l'isobutyrate, le valérate et l'isovalérate, en alcools, en sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) responsable de l'odeur caractéristique des méthaniseurs, du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), et de l'hydrogène ( $H_2$ ).

- La phase d'*acétogènes* (acétogénèse), les bactéries de cette étape produisent, à partir des produits de la phase de l'acidogénèse de l'acide acétique, de l'hydrogène et de  $CO_2$ , substrat dont ont besoin les bactéries de l'étape suivante.

- La phase de *méthanogènes* (méthanogénèse):

Lors de cette étape, les produits des réactions précédentes, principalement l'acétate, le formate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène, sont convertis en méthane par les bactéries dites méthanogènes:

- La première population comprend les méthanogènes hydrogénophiles qui produisent du méthane à partir de l'hydrogène.
- La deuxième population comprend les méthanogènes appelés acétoclastes qui produisent le méthane à partir de l'acétate.

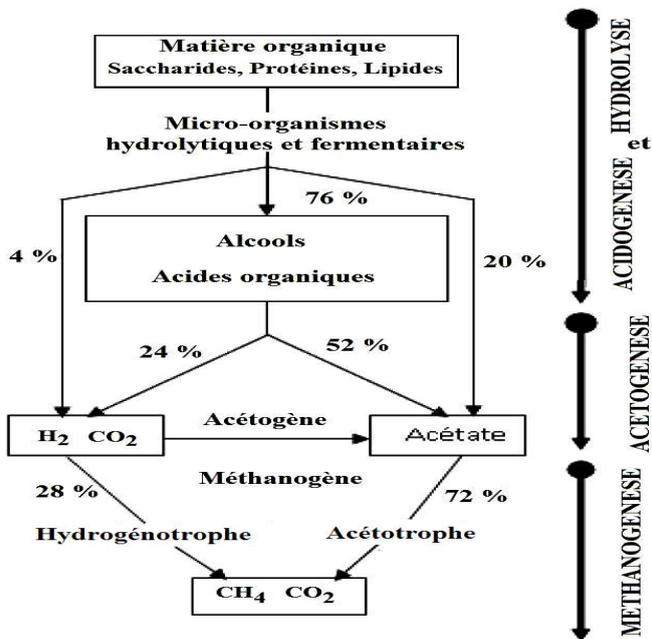


Fig. 1: Réactions dans le bioréacteur anaérobie

### 3. SIMULATION DE BIOREACTEURS ANAEROBIES

#### 3.1 Modèle AM2 du bioréacteur

Le modèle AM2 sera implémenté et utilisé pour notre simulation [1, 2]. Il comprend deux processus et deux populations bactériennes (Fig. 2).

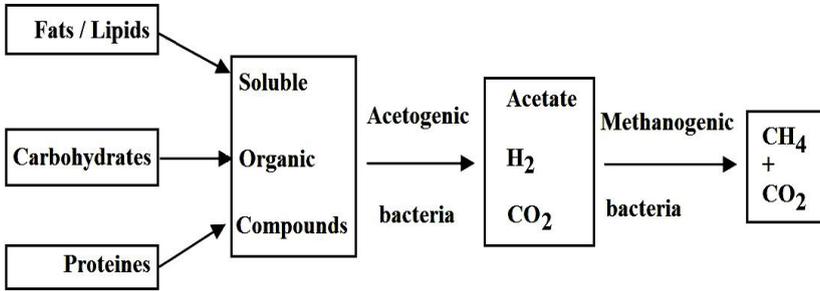


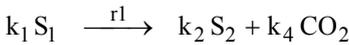
Fig. 2: Schéma du processus biochimique de la digestion anaérobie à 2 phases

La première étape est celle de l’acidogène modélisée par une population de bactéries acidoacétogènes de concentration  $X_1$  qui décompose le substrat carboné en acides gras volatiles (AGV qui devient le substrat), et en dioxyde de carbone.

On considère dans ce modèle simplifié que les AGV sont uniquement présents sous forme non ionisées et se comportent comme de l’acide acétique.

Notons que les deux substrats sont aussi présents dans l’alimentation du réacteur.

La réaction chimique modélisée est donc la suivante:



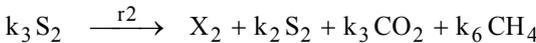
Avec la vitesse de réaction  $r1 = \mu_1 \times X_1$ .

La croissance de cette population suit une cinétique de Monod:

$$\mu_1 = \mu_{1max} \times \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}}$$

où  $\mu_{1max}$ , représente le taux de croissance maximal et  $K_{S1}$ , la constante de demi-saturation.

La seconde étape est celle de la méthanogénèse modélisée par une population de bactéries méthanogènes acétoclastes de concentration  $X_2$  qui transforment les AGV (substrat  $S_2$ , provenant de l’alimentation et/ou issu de l’acidogénèse) en méthane et en dioxyde de carbone selon la réaction chimique suivante:



Avec la vitesse de réaction  $r2 = \mu_2 \times X_2$ .

La croissance de cette population suit une cinétique de Haldane qui permet de modéliser l’inhibition des méthanogènes par l’accumulation des AGV. On a:

$$\mu_2 = \mu_{2max} \times \frac{S_2}{S_2 + K_{S2} + S_2^2 / K_{I2}}$$

où  $\mu_{2max}$ , représente le taux de croissance maximal,  $K_{S2}$ , la constante de saturation et  $K_{I2}$ , la constante d’inhibition.

### 3.2 Equations du modèle dynamique

Le modèle mathématique basé sur les lois de croissances est le modèle AM2, qui fait intervenir les variables dynamiques suivantes:

$X_1$  et  $X_2$ , sont respectivement la concentration de la population bactérienne acidogène et la concentration de la population bactérienne méthanogène;

$S_1$  et  $S_2$ , sont respectivement la concentration du substrat de matières carbonées et la concentration du substrat en acides gras volatils.

Pour un système batch, le modèle mathématique s'exprime sous la forme d'un système d'équations différentielles couplées du premier ordre de la forme:

$$\frac{dX_1}{dt} = \mu_1 \times X_1 \quad ; \quad \frac{dX_2}{dt} = \mu_2 \times X_2$$

$$\frac{dS_1}{dt} = -k_1 \times \mu_1 \times X_1 \quad ; \quad \frac{dS_2}{dt} = k_2 \times \mu_1 \times X_1 - k_3 \times \mu_2 \times X_2$$

Le débit de méthane, qui est le produit attendu, dépend directement de la croissance de la population bactérienne méthanogène  $X_2$ , selon la relation:

$$Q_{ch4} = k_4 \times \mu_2 \times X_2$$

Il s'agit d'un système d'équations différentielles du premier ordre qui sont couplés. On distingue 9 paramètres qui interviennent dans ce modèle, soit ( $\mu_{1max}$ ,  $K_{S1}$ ,  $\mu_{2max}$ ,  $K_{S2}$ ,  $K_{I2}$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ).

Pour résoudre ce système d'équations différentielles, il faut aussi fournir les conditions initiales, qui sont alors les estimations des quantités initiales des concentrations des substrats et des bactéries au démarrage du bioréacteur, soit:  $S_1(0)$ ,  $S_2(0)$ ,  $X_1(0)$  et  $X_2(0)$ .

### 3.3 Résultats de Simulation

Le modèle considéré a été implémenté permettant la simulation du fonctionnement du bioréacteur anaérobie. Une analyse extensive de la littérature bibliographique a montré que très peu de travaux ont fourni une estimation de quelques uns des paramètres de ce modèle. Pour les paramètres qui ont été fournis par différents auteurs, il existe une forte dispersion y compris lorsqu'il s'agit de la méthanisation en utilisant les eaux usées comme substrat [1], [4-7].

En réalité, en dehors des paramètres des taux de croissance maximum pour les bactéries acidogènes et méthanogènes, la littérature ne fournit presque pas de données concernant les autres paramètres.

Dans notre simulation, les paramètres de la croissance ont été évalués par les valeurs suivantes:

$$\mu_{1max} = 0.4/\text{jour}; \quad K_{S1} = 35 \text{ mg/l}; \quad \mu_{2max} = 0.4 /\text{jour}; \quad K_{S2} = 4 \text{ mg/l}; \quad K_{I2} = 170 \text{ mg/l}$$

Par ailleurs, suite au manque de données concernant les paramètres ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ), ces paramètres ont été estimés par les essais et erreurs en essayant d'obtenir des résultats de simulation cohérent qualitativement et quantitativement [9-11].

Par ailleurs, il y a lieu de noter qu'il n'existe pas de relations analytiques reliant les substrats  $S_1$  et  $S_2$  aux concentrations de bactéries  $X_1$  et  $X_2$ . A l'instant initial, ces données sont estimées empiriquement.

Un résultat de simulation permettant de visualiser graphiquement l'évolution temporelle des substrats et des bactéries est présenté à la figure 3.

Les valeurs des paramètres utilisés sont :

$k_1 = 50$ ;  $k_2 = 50$ ;  $k_3 = 15$ ;  $S_1(0) = 10$  g/l;  $S_2(0) = 2$  g/l;  $X_1(0) = 0.4$  g/l et  $X_2(0) = 0.01$ g/l.

N.B.: L'échelle du substrat  $S_1$  est réduite de moitié pour permettre une meilleure visualisation des résultats.

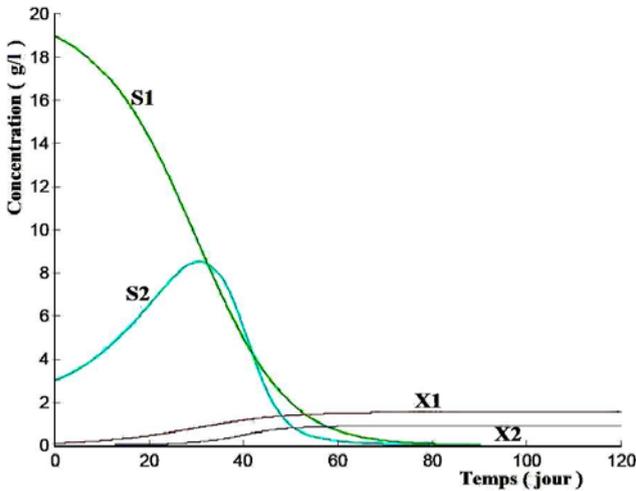


Fig. 3: Evolution temporelle des substrats et bactéries

On constate pour les valeurs des paramètres utilisés qu'il y a une décroissance pratiquement exponentielle du substrat  $S_1$ , qui sera épuisé en 15 jours et ce du fait de sa décomposition par les bactéries acétogènes  $X_1$ .

Parallèlement, le substrat  $S_2$  (AGV), commence à être généré pendant ces 15 jours, puis débutera sa consommation par les bactéries méthanogènes. Ce substrat sera pratiquement totalement décomposé en biogaz au bout d'environ un mois.

Après extinction des substrats sur une période d'environ un mois, les concentrations de bactéries acétogènes et méthanogènes se stabilisent à des valeurs constantes et le modèle mathématique ne prévoit pas leur évolution ultérieure.

- Pour la production du méthane, la littérature fournit des données pratiquement comparables pour le paramètre  $k_4$  qui est estimé dans notre cas par la valeur  $k_4 = 75$  l<sup>2</sup>/mg [1, 4].

Compte tenu de cette valeur, le profil du débit  $Q(t)$  du méthane (litres/jour), son cumul  $C(t)$  en litres et la concentration des bactéries méthanogènes sont représentés en figure 4 où l'échelle de  $C(t)$  a été réduite d'un facteur 10.

On constate que la courbe  $Q$  connaît un accroissement rapide, dès le début du lancement du bioréacteur, atteint un maximum en quelques 20 jours, puis commence à décroître pour s'interrompre sur une durée de 35 jours.

Ce type de comportement est celui attendu par un système batch.

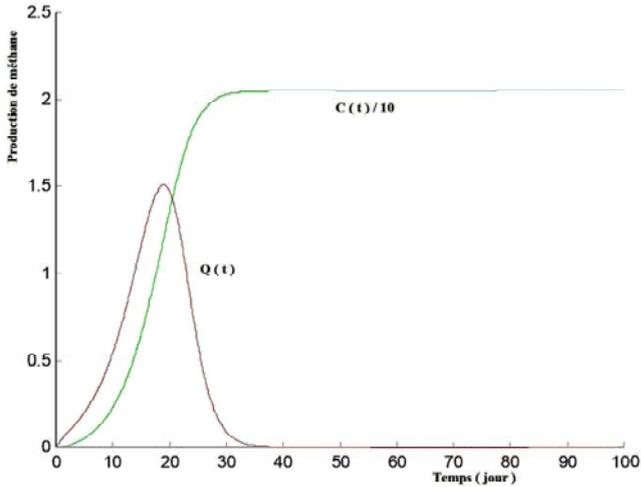


Fig. 4: Production du méthane en fonction du temps

On notera la grande sensibilité des profils obtenus par rapport aux paramètres du modèle et aux valeurs initiales. De même, le manque de limitation des paramètres du modèle peut produire des incohérences sur les profils obtenus.

Pour un choix approprié des paramètres du modèle, on a noté une bonne correspondance qualitative des profils obtenus par notre simulation en comparaison avec des résultats expérimentaux et de simulation présentés par plusieurs références parmi lesquelles [12-18].

## 4. BIOREACTEUR EXPERIMENTAL REALISE

### 4.1 Dispositif expérimental

Les digesteurs anaérobies réalisés dans notre laboratoire sont constitués de cuves métalliques étanches dans lesquelles différents microorganismes cohabitent pour biodégrader les déchets organiques et produire du biogaz.

Le type de culture est le mode batch. La nature du substrat est de la boue enrichie provenant de la station d'épuration biologique des eaux usées. La technologie du bioréacteur réalisé repose sur un dispositif constitué d'une cuve de capacité de 200 litres, contenant 130 litres (Fig. 5).

La cuve dispose d'une entrée pour la boue activée; une sortie pour la récupération du biogaz équipé d'une vanne, ainsi que des entrées prévues pour l'instrumentation nécessaire aux mesures des grandeurs comme la température, le pH et l'outil d'agitation. La préparation est incubée à 30 °C et le gaz méthane est détecté de façon remarquable après 27 jours.



Fig. 5: Bioréacteur anaérobie expérimental

#### 4.2 Le système d'acquisition réalisé

Pour qu'ultérieurement, on puisse observer, analyser, contrôler et optimiser le bioréacteur; l'acquisition des mesures concernant les grandeurs qui influencent son fonctionnement est indispensable.

Pour cette raison, un système d'acquisition des mesures de grandeurs influençant le processus a été conçu et réalisé. Pour ce faire, on a utilisé le circuit intégré ADC0808 qui est un circuit CMOS monolithique disposant d'un convertisseur analogique numérique de 8 bits.

De même, on a utilisé un multiplexeur à 8 canaux pour sélectionner l'un des 8 signaux analogiques des capteurs. Le multiplexage permettra d'acquérir des signaux de plusieurs grandeurs simultanément.

La figure 6 présente le schéma pratique du système d'acquisition réalisé. Après numérisation, les signaux sont dirigés vers le PC pour traitement et visualisation graphique.

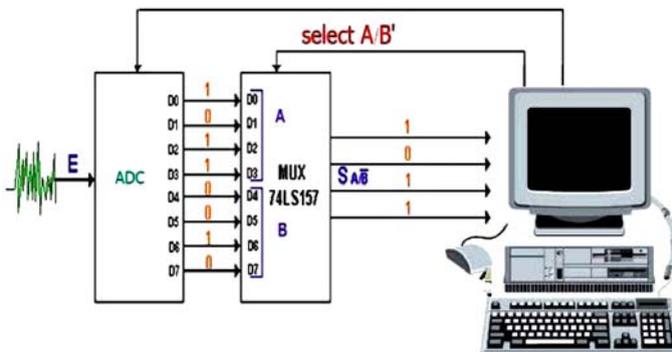


Fig. 6: Système d'acquisition réalisé

## 5. CONCLUSION

Ce travail a présenté l'étude, la simulation et la réalisation d'un prototype de bioréacteur expérimental de méthane de type batch, alimenté par de la boue enrichie provenant d'un bassin d'aération d'une station de traitement des eaux usées.

Un modèle du processus de bio-méthanisation à deux phases a été implémenté en vue de simuler le fonctionnement du bioréacteur. Certains paramètres du module ont été estimés sur la base d'une étude bibliographique extensive. Les résultats de la simulation permettent d'appréhender le fonctionnement qualitatif et quantitatif du bioréacteur expérimental réalisé. Les résultats expérimentaux obtenus sont jugés satisfaisants et encourageants puisqu'on a pu produire effectivement du méthane malgré la simplicité des dispositifs employés.

Par ailleurs, en vue d'approfondir l'analyse et la maîtrise des bio-réacteurs, un système d'acquisition en temps réel des mesures a été réalisé pour pouvoir mesurer certaines grandeurs influençant le fonctionnement et le rendement des bio-réacteurs considérés (température, pH, débit de biogaz, ..). Ces mesures permettront également d'estimer et d'ajuster ultérieurement les paramètres du modèle par rapport aux résultats expérimentaux.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les personnes en charge de l'usine de traitement des eaux usées de Constantine à Hamma Bouziane pour leur coopération.

## REFERENCES

- [1] N. Noykova, T. Müller, M. Gyllenberg and J. Timmer, '*Quantitative Analysis of Anaerobic Waste Water Treatment Processes: Identifiability and Parameter Estimation*', Biotechnology and Bioengineering, Vol. 78, N°1, pp. 89 – 103, 2002.
- [2] J. Reynard, '*Modélisation, Optimisation Dynamique et Commande d'un Méthaniseur par Digestion Anaérobie*', Rapport de Projet de Fin d'Etudes, Esisar, 2006/2007.
- [3] V.A. Vavilin, L.Y. Lokshina and S.V. Rytov, '*The <Methane> Simulation Model as the First Generic User-Friend Model of Anaerobic Digestion*', Vestnik Moskovskogo Universiteta, Khimiya, Vol. 41, N°6, pp. 22 – 26, 2000.
- [4] I. Simeono, V. Momchev and D. Grancharov, '*Dynamic Modelling of Mesophilic Anaerobic Digestion of Animal Waste*', Water Research, Vol. 30, N°5, pp. 1087 - 1094, 1996.
- [5] M. Gerber and R. Span, '*An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas*', International Gas Union Research Conferences, IGRC, Paris, France, 2008.
- [6] D.T. Hill and C.L. Barth, '*A Dynamic Model for Simulation of Animal Waste Digestion*', Journal Water Pollution Control Federation, Vol. 10, pp. 2129 - 2143, 1977.
- [7] G. Kiely, G. Tayfur, C. Dolan and K. Tanji, '*Physical and Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion of Organic Wastes*', Water Research, Vol. 31, N°3, pp. 534 - 540, 1997.
- [8] M.P. Bryant, '*Microbial Methane Production-Theoretical Aspect*', Journal of Animal Science, Vol. 48, N°1, pp. 193 – 201, 1979.
- [9] J.B. Sorba, '*Régulation et Suivi du Démarrage d'un Bioréacteur de Digestion Anaérobie*', Stage de Fn d'Etudes, Option SAI, ENI Val de Loire, France, 2008.

- [10] D. Morau, S. Dumas, L. Adelard and J.C. Gatina, '*Optimization of the Anaerobic Digestion of Solid Waste by Addition of Leachate*', [www.iswa.org/fileadmin/galleries/.../Presentations/Morau.pdf](http://www.iswa.org/fileadmin/galleries/.../Presentations/Morau.pdf).
- [11] R. Escudié, T. Conte, J.P. Steyer and J.P. Delgenès, '*Hydrodynamic and Biokinetic Models of an Anaerobic Fixed-Bed Reactor*', *Process Biochemistry*, Vol. 40, N°7, pp. 2311 – 2323, 2005.
- [12] T.G. Muller, N. Noykova, M. Gyllenberg and J. Timmer, '*Parameter Identification in Dynamical Models of Anaerobic Waste Water Treatment*', *Mathematical Biosciences*, Vol. 177-178, pp. 147 - 160, 2002.
- [13] I. Simeonov, V. Lubenova and I. Queinec, '*Parameter and State Estimation of an Anaerobic Digestion of Organic Wastes Model with Addition of Stimulating Substances*', *Bio-automation*, Vol. 12, pp. 88 - 105, 2009.
- [14] V.A. Vavilin, S.V. Rytov, L.Y. Lokshina, S.G. Pavlostathis and M.A. Barlaz, '*Distributed Model of Solid Waste Aerobic Digestion*', *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 81, N°1, pp. 66 – 73, 2003.
- [15] R. Jones, W. Parker, Z. Khan, S. Murthy and M. Rupke, '*Characterization of Sludges for Predicting Anerobic Digester Performance*', *Journal of Water Science and Technology*, Vol. 57, N°5, pp. 721 – 726, 2008.
- [16] B. Dearman and R.H. Bentham, '*Anaerobic Digestion of Food Waste: Comparing Leachate Exchange Rates in Sequential Batch Systems Digesting Food Waste and Biosolids*', *Waste Management*, Vol. 27, N°12, pp. 1792 - 1799, 2007.
- [17] P. Zhang, G. Zeng, G. Zhang, Y. Li, B. Zhang and M. Fan, '*Anaerobic co-Digestion of Biosolids and Organic Fraction of Municipal Solid Waste by Sequencing Batch Process*', *Fuel Processing Technology*, Vol. 89, N°4, pp. 485 - 489, 2008.
- [18] X. Chen, R.T. Romano and R. Zhang, '*Anaerobic Digestion of Food Wastes for Biogas Production*', *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 3, N°4, pp. 51 - 62, 2010.