

Contribution à la régulation de la température au sein d'un digesteur de type batch utilisant un système de chauffage de type solaire

Cessac Franck Clair HOUNGUE^{1*}, Kokou Théophile HOUNGAN¹ et Codjo Edmond ADJOVI²

¹ *Laboratoire d'Électrotechnique de Télécommunications et d'Informatique Appliqué (LETIA), Ecole Polytechnique d'Abomey-calavi, 01 BP 2009, Université d'Abomey-calavi, Bénin*

² *Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquée (LEMA), Bénin*

* Correspondance, courriel : cessac.houngue@gmail.com

Résumé

Ce travail s'est penché sur la régulation de la température dans un digesteur de type batch alimenté thermiquement par un système solaire, dans le but de réduire le temps de production de biogaz et ainsi d'augmenter le volume du biogaz produit et la quantité de déchets traitée. Ce digesteur a été modélisé avec le modèle AM2 qui a été implémenté dans le logiciel LabVIEW. Pour utiliser la température comme entrée de ce modèle, nous avons remplacé dans la formule de croissance bactérienne de Monod, le taux de croissance maximal par la formule de croissance bactérienne de Ratkowsky qui est en fonction de la température. On a ensuite ajouté le modèle de la variation de la température dans le digesteur. Les résultats ont montré que le temps de séjour des matières organiques dans le digesteur est bien réduit en comparaison avec celui obtenu dans le cas du modèle sans la régulation. Le processus de la dégradation a donc bien été accéléré.

Mots-clés : *digestion anaérobie, modélisation du digesteur, régulation de la température.*

Abstract

Contribution to the control of temperature in a batch digester fed thermally by a solar system

This work considered the temperature control in a digester of the batch type fed thermally by a solar system, with an aim of reducing the time of production of biogas and thus of increasing the volume of produced biogas. To model this digester we chose the model AM2 to which one added the model of the variation in the temperature in the digester. The results of simulations showed that the residence time of the organic matter in the digester is well reduced in comparison with that obtained in the case of the model without the regulation. The process of degradation was thus indeed accelerated.

Keywords : *anaerobic digestion, modeling of the digester, temperature control.*

1. Introduction

Le biogaz est l'une des formes d'énergie renouvelable exploitée depuis plusieurs décennies et qui est employé comme produit de remplacement pour les combustibles fossiles [1].

Ce biogaz est le résultat d'un processus de dégradation des matières organiques dans un milieu privé d'oxygène. Cette dégradation est influencée par plusieurs facteurs tels que : le pH, la température, la teneur en eau, etc. [2]. La température au sein du digesteur est l'une des principales conditions au bon fonctionnement de la méthanisation. Elle doit être comprise entre des plages de températures très précises. En effet, une température trop élevée entraînera la mort des micro-organismes nécessaires pour la production de biogaz alors qu'une température trop faible ralentira le processus de méthanisation. C'est dans ce contexte que nous avons choisi de réguler la température au sein d'un digesteur de type batch, alimenté thermiquement par un système solaire et fonctionnant dans un système mésophile où la température est comprise entre 20 et 44°C [3]. Pour analyser le fonctionnement de notre digesteur et prédire sa performance, nous avons utilisé le modèle AM2 qui tient compte de deux étapes de la digestion anaérobie. Ensuite, nous avons fait intervenir l'influence de la température en insérant la relation de D. Ratkowsky pour la croissance bactérienne en fonction de la température [4]. Ceci dans le but d'avoir un modèle dont la température constitue une entrée. La simulation est faite avec un logiciel de programmation graphique (LabVIEW), possédant des fonctions qui acceptent d'autres langages. Ceci nous a permis d'écrire le programme de régulation en langage C ; de sorte que ce même code informatique pourra être réintroduit dans le composant électronique qui servira d'élément central pour la réalisation physique du régulateur.

2. Matériel et méthodes

2-1. Le système de chauffage

Pour chauffer ce digesteur, nous lui avons ajouté quelques éléments :

- Un conduit métallique en forme de tore découpé et compartimenté en deux : une partie intérieure vide qui reçoit les rayons solaires concentrés par la parabole réflectrice et une partie contenant de l'eau; Les deux parties sont séparées par une paroi en aluminium peinte en noir ;
- Une ouverture sur la partie latérale du digesteur qui est recouverte d'une vitre et qui couvre la partie intérieure du conduit métallique ;
- Une parabole réflectrice, constituée d'une parabole de récupération et recouverte par un film de miroir. Il concentre les rayons solaires vers l'ouverture vitrée du digesteur; cette ouverture coïncide avec le foyer de la parabole.

La vitre sert à produire l'effet de serre ; la paroi en aluminium et peinte en noir sert d'absorbeur de rayons solaires. La **Figure 1** montre un synoptique du système.

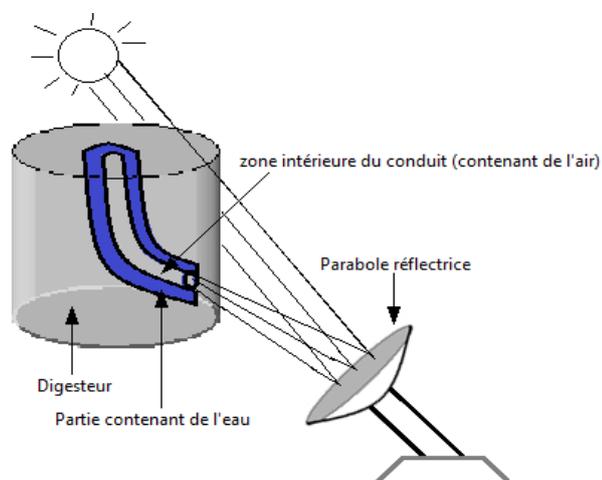


Figure 1 : Système de chauffage du digesteur

2-2. Modélisation du système

Pour modéliser le dispositif de régulation, nous avons procédé de la manière suivante :

- Modéliser un digesteur de type discontinu dont la production évolue en fonction de la température ;
- Modéliser la température du substrat qui évolue en fonction de la température extérieure au digesteur ;
- Elaborer le programme de régulation.

2-3. Modélisation du digesteur

Le digesteur étudié est de type batch, rempli à moitié dont l'autre moitié sert pour contenir le gaz produit. Le substrat utilisé dans cette étude est de l'eau usée. Le modèle mathématique représente l'une des stratégies appropriée pour étudier l'influence de la composition du substrat sur les performances de la digestion anaérobie. L'activité des micro-organismes impliqués dans la digestion anaérobie est dépendante de la nature et de la concentration des substrats dans le digesteur, ainsi que des conditions environnementales (pH, température, etc.). La modélisation de la digestion anaérobie est une tâche fastidieuse du fait de la complexité des réactions biologiques ayant lieu dans un digesteur. Néanmoins des efforts ont été faits dans le domaine et ont abouti à des modèles satisfaisants du processus de la digestion anaérobie. On distingue des modèles dynamiques (avec prise en compte des cinétiques) et les modèles dits « steady-state-models » qui eux sont indépendants du temps [5].

De façon générale, quatre étapes sont considérées dans la description de la dégradation anaérobie de la matière organique suivant le modèle de la **Figure 1**. Il s'agit de l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse [6]. Pour la modélisation de notre digesteur, nous avons choisi le modèle mathématique (AM2) basé sur deux réactions principales [2, 7 - 9]. On a ensuite introduit une relation traduisant l'effet de la température sur le comportement du processus. En effet il existe plusieurs modèles de croissance bactérienne en fonction de la température Ce sujet est amplement abordé dans [9]. Ce modèle mathématique de la digestion anaérobie (AM2), suit un enchaînement de deux étapes successives où les produits formés servent de substrat pour l'étape suivante. La matière organique entrante, représentée par S_1 , est transformée lors de la première étape en de l'acide acétique, qui devient le deuxième nutriment représenté par S_2 . Par ailleurs, les bactéries sont aussi classées en deux types: X_1 correspond aux bactéries agissant sur le substrat pendant la première étape, et X_2 représente celles qui agissent sur le substrat lors de la deuxième étape. La **Figure 2** présente les 4 étapes principales de la digestion anaérobie.

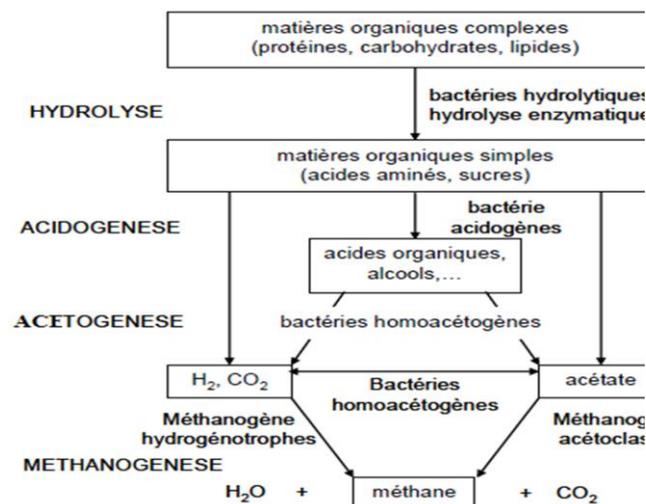
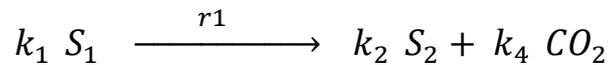


Figure 2 : Étapes de la digestion anaérobie [1]

2-3-1. Première étape

La première est celle de l'étape acidogénèse, où un substrat S_1 est dégradé en acides gras volatiles et en dioxyde de carbone en un substrat S_2 par des bactéries X_1 selon la réaction chimique suivante [5]:



Avec r_1 : la vitesse de réaction qui est :

$$r_1 = \mu_1 X_1 \quad (1)$$

➤ Le taux de croissance spécifique

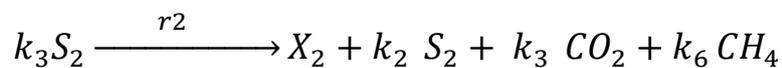
Concernant le taux de croissance spécifique des bactéries acidogènes, il est modélisé par la formule Monod :

$$\mu_1 = \mu_{1max} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} \quad (2)$$

Avec K_{S1} : La constante de demi-saturation ; μ_{1max} : Le taux de croissance maximal.

2-3-2. Deuxième étape

La deuxième réaction est celle de l'étape méthanogénèse, où les microorganismes X_2 croissent à une vitesse spécifique μ_2 en consommant le substrat S_2 à une vitesse proportionnelle au taux de croissance et en donnant comme produit le méthane (CH_4) et en dioxyde de carbone (CO_2). Cette transformation est assurée par de bactéries méthanogènes de concentration X_2 . La réaction chimique de l'acidogénèse modélisée est la suivante [5]:



Avec r_2 : la vitesse de réaction qui est :

$$r_2 = \mu_2 X_2 \quad (3)$$

➤ Le taux de croissance spécifique

Le taux de croissance utilisé est celui de Haldane [10] :

$$\mu_2 = \mu_{2max} \frac{S_2}{S_2 + K_{S2} + S_2^2/K_{I2}} \quad (4)$$

Avec K_{S2} , La constante de demi-saturation ; K_{I2} la constante d'inhibition ; μ_{2max} : Le taux de croissance maximal.

Afin d'avoir accès à la température dans ce modèle, nous avons utilisé la formule de Ratkowsky qui donne le taux de croissance bactérienne en fonction de la température : $\sqrt{\mu} = b(T - T_{min})$; Où b est un coefficient de régression, T , la température du milieu et T_{min} est la température minimum en dessous de laquelle, on n'observe plus aucune croissance [4, 11].

Nous avons remplacé dans les formules de Monod et de Haldane, les taux de croissance maximal μ_{1max} et μ_{2max} par la précédente formule de Ratkowsky. Ce remplacement se justifie de la façon suivante : D'après [12], on a :

$$\mu_{max} = \mu_{opt} \prod_{i=1}^n \gamma(f_i) \tag{5}$$

où les f_i sont les facteurs environnementaux influant sur le processus tel que la température, la teneur en eau, le pH etc...

$$\gamma(f_i) = \frac{\mu(f_i)}{\mu_{opt}} \tag{6}$$

Dans le cas de cette étude, ne prenant en compte que l'influence du facteur extérieur température, nous obtenons :

$$\mu_{max} = \mu_{opt} \gamma(T) \tag{7}$$

donc :

$$\mu_{max} = \mu_{opt} \cdot \frac{\mu(T)}{\mu_{opt}} = \mu(T) \tag{8}$$

2-4. Production de méthane

La production de méthane est sans doute le paramètre de suivi le plus important dans le contrôle de la digestion anaérobie par ce qu'il intègre les autres paramètres du processus. Cette production de biogaz est fonction du taux de charge organique, de la stabilité générale de l'activité des micro-organismes à l'intérieur du digesteur et de la température dans le digesteur [13]. Le débit de méthane dépend directement de la croissance de la population bactérienne méthanogène X_2 .

$$Q_{ch_4} = K_4 \mu_2 X_2 \tag{9}$$

2-4-1. Equations du modèle

Nous obtenons ainsi un modèle composé de cinq (5) équations différentielles qui sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1}{dt} = \mu_{1max} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} X_1 \quad (10) \\ \frac{dX_2}{dt} = \mu_{2max} \frac{S_2}{S_2 + K_{S2} + S_2^2/K_{I2}} X_2 \quad (11) \\ \frac{dS_1}{dt} = -K_1 \mu_{1max} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} X_1 \quad (12) \\ \frac{dS_2}{dt} = K_2 \mu_1 X_1 - K_3 \mu_2 X_2 \quad (13) \\ Q_{ch4} = K_4 \mu_{2max} \frac{S_2}{S_2 + K_{S2} + \frac{S_2^2}{K_{I2}}} X_2 \quad (14) \\ \mu_{1max} = (b_1(T_{sub} - T_{min}))^2 \quad (15) \\ \mu_{2max} = (b_2(T_{sub} - T_{min}))^2 \quad (16) \end{array} \right.$$

Ainsi, nous avons obtenu un modèle dont la température représente une entrée. Onze paramètres interviennent dans ce modèle, qui sont : b_1 ; b_2 ; T_{sub} ; T_{min} ; K_{S1} ; K_{S2} ; K_{I2} ; K_1 ; K_2 ; K_3 et K_4 . Pour résoudre le système d'équations différentielles du premier ordre qui sont couplés, il faut fournir les conditions initiales, qui sont alors les estimations des quantités initiales des concentrations des substrats et des bactéries au démarrage du bioréacteur. Une analyse extensive de la littérature bibliographique nous a fourni une estimation de quelques paramètres de ce modèle. Les autres ont été obtenus par ajustement du modèle de façon à obtenir des résultats cohérents. Dans notre simulation, les paramètres initiaux ont été évalués par les valeurs suivantes [2]: $S_1(0) = 10$ g/L; $S_2(0) = 2$ g/L; $X_1(0) = 0,4$ g/L et $X_2(0) = 0.01$ g/L. Les paramètres de la croissance ont été évalués par les valeurs suivantes: $K_{S1} = 35$ mg/L; $K_{S2} = 4$ mg/L; $K_{I2} = 170$ mg/L. Les paramètres (K_1 ; K_2 ; K_3) ont été estimés par les valeurs suivantes : $K_1 = 50$; $K_2 = 50$; $K_3 = 15$. Pour la production du méthane, la littérature fournit pour le paramètre K_4 qui est estimé par la valeur $K_4 = 75$ L²/mg [2]. Concernant les paramètres de régression, b_1 et b_2 , ils sont calculés à partir de l'expression de $\gamma(T)$ donnée dans [11].

2-5. Modélisation de l'évolution de la température au sein du digesteur

2-5-1 Théories

Pour modéliser la température du substrat on a considéré tout comme dans [2] par hypothèse que :

- les températures de la vitre, du substrat et de la plaque sont uniformes ;
- on néglige la chaleur emmagasinée sauf pour le substrat;
- on assimile le substrat à l'eau.
- On considère la paroi extérieure métallique du conduit qui est dans le digesteur comme faisant partie du substrat.

2-5-2 Bilan thermique

A partir de ces hypothèses, un bilan énergétique a été établi au niveau de chaque élément pris à part [2]:

2-5-2-1. Au niveau de la vitre

$$hr_{p-v} A_0(T_p - T_v) + hc_{p-v} A_0(T_p - T_v) = hr_{v-ciel} A_0(T_v - T_c) + hc_{v-a} A_0(T_v - T_p) \quad (17)$$

Où $t_c = 0.052 (t_a)^{1.5}$, Avec A_0 Surface de la plaque absorbante; T_p Température de la plaque absorbante; T_v Température de la vitre; T_c Température du ciel; hr_{p-v} Coefficient d'échange radiatif entre la plaque et la vitre; hc_{p-v} Coefficient d'échange convectif entre la plaque et la vitre; hr_{v-ciel} Coefficient d'échange radiatif entre la vitre et le ciel; hc_{v-a} : Coefficient d'échange convectif entre la vitre et l'ambiance.

2-5-2-2. Au niveau de la plaque

$$\tau_v \cdot \alpha_p \cdot G \cdot A_0 = hr_{p-v} \cdot A_0 \cdot (T_p - T_v) + hc_{p-v} \cdot A_0 \cdot (T_p - T_v) + h_p \cdot A_0 \cdot (T_p - T_{sub}) \quad (18)$$

$$\frac{1}{h_p} = \frac{e}{K_{ac}} + \frac{1}{hr_{p-sub} + hc_{p-sub}} \quad (19)$$

Avec τ_v coefficient de transmissivité de la vitre; α_p coefficient d'absorption de la plaque; G éclaircissement solaire; T_{sub} température du substrat; e épaisseur de la plaque; K_{ac} coefficient de la conductivité thermique de la plaque; hr_{p-sub} coefficient d'échange radiatif entre la plaque et le substrat; hc_{p-sub} Coefficient d'échange convectif entre la plaque et le substrat; h_p : Coefficient de perte global.

2-5-2-3. Au niveau du substrat

$$M_{sub} \cdot C_p \cdot \frac{dT_{sub}}{dt} = h_p \cdot A_0 \cdot (T_p - T_{sub}) - h_{perte} \cdot A_0 \cdot (T_{sub} - T_a) \quad (20)$$

$$h_{perte} = \frac{K_{is}}{e_{is}} + \frac{K_{is} \cdot S_1}{e_{is} \cdot A_0} \quad (21)$$

Avec M_{sub} : Masse du substrat; C_p capacité calorifique de l'eau; h_{perte} coefficient de perte global du substrat; K_{is} coefficient de conductivité thermique de l'isolant; e_{is} épaisseur de l'isolant; S_1 surface latérale du conduit en aluminium qui est en contact avec le substrat. Ce modèle permet de connaître l'évolution de la température à l'intérieur du digesteur.

2-6. Le système de régulation

Pour réguler la température de notre digesteur nous avons utilisé un régulateur dont le fonctionnement est celui du Tout Ou Rien. La température de consigne est écrite dans le programme, la température ambiante est représenté par une courbe qui est obtenue par l'interpolation de différents points de mesure de température réelle relevée sur une station météorologique de l'aéroport de Cadjèhoun (Cotonou, Bénin) et la température au sein de digesteur évolue et présente des variations au cours de temps. Pour réguler ces variations on a choisi une fonction dans LabVIEW « Formula Node » qui permet d'écrire directement des formules mathématiques et des codes informatiques en langage C. Ce même code informatique pourra ainsi être réintroduit dans le composant électronique qui servira d'élément central pour la réalisation physique du régulateur.

3-2. Simulation du modèle global proposé (régulateur compris)

3-2-1. Variations des biomasses et des bactéries

La régulation de la température a accéléré la digestion anaérobie. C'est pourquoi, comme l'indique la **Figure 4** les bactéries acidogènes ($X1$) décomposent le substrat acidogène ($S1$) autour vingt (20) jours. De même les bactéries méthanogènes ($X2$) consomment rapidement le substrat méthanogène ($S2$) qui est généré par l'étape précédent. Tout le processus se déroule alors en 26 jours environs.

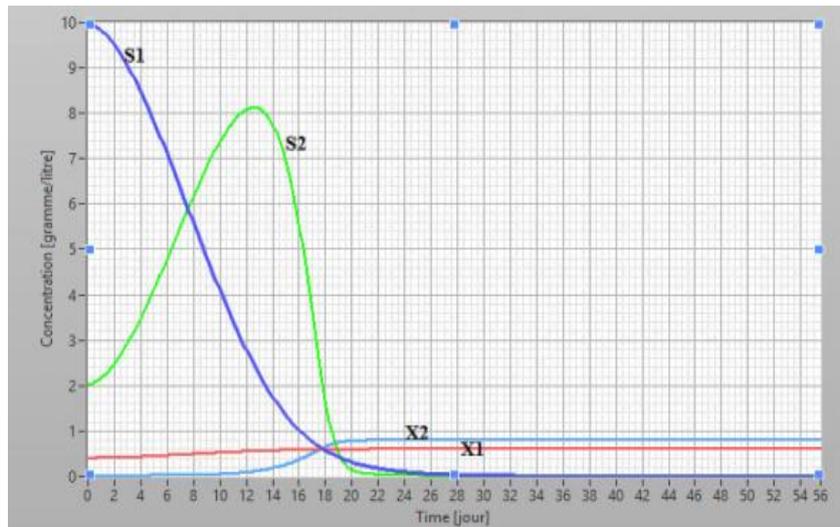


Figure 3 : Variations des bactéries et des biomasses

3-2-2. Variation du débit de méthane

La phase méthanogène donne lieu à la production du méthane. Selon la **Figure 5**, nous assistons à une production croissante du méthane qui débute dès le cinquième jour du procédé en atteignant sa valeur maximale le 11^{ème} jour. Ce n'est qu'à partir du 26^{ème} jour que commence la phase stationnaire de la production.

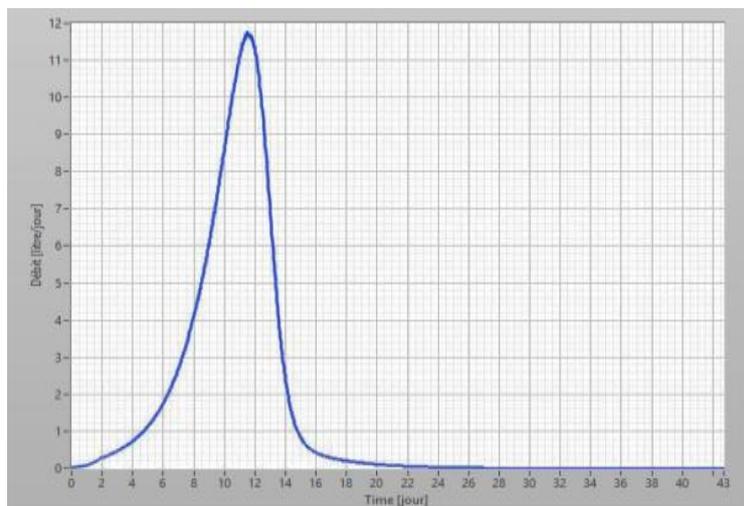


Figure 4 : Variation du débit de méthane

3-3. Comparaison des débits de méthane

La **Figure 6** montre les débits de production de méthane pour les deux modèles avec régulation et sans régulation. Dans une culture discontinue, la production du débit de méthane présente au bout d'un certain moment une allure stable. Les allures données par les deux profils de cette figure présentent cette propriété au bout des deux moments différents ; celui résultant du modèle avec régulation atteint la stabilité au bout d'un temps de rétention égal à vingt-sept (27) jours environ et le second l'atteint à soixante-cinq (62) jours environ.

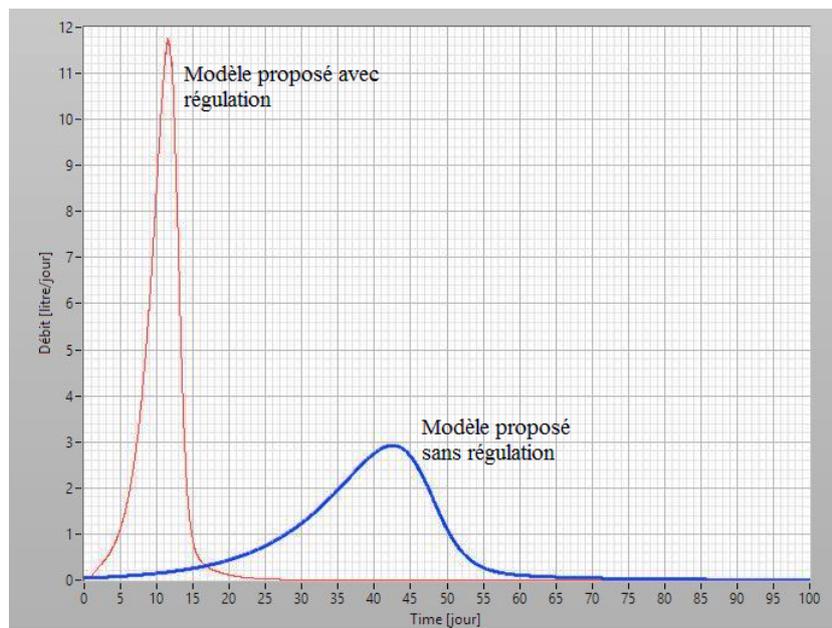


Figure 5 : Comparaison des débits de méthane

Malgré cela, nous pouvons aussi remarquer que pour le modèle proposé sans la régulation, le débit maximal de production est d'environ 2,95 litre/jour ; ce débit est atteint au bout de quarante-trois jours. Alors que pour le modèle proposé avec la régulation, il est égal à 11,75 litres/jour qui est atteint au bout de onze jours. De ce fait, nous pouvons dire que le substrat à basse température donne moins de rendement par rapport à un substrat qui a une température élevée. Ainsi, un digesteur dont la température est régulée possède un temps de rétention plus réduit que celui d'un digesteur simple.

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement d'un digesteur à dôme fonctionnant en mode discontinue et qui est chauffé avec un système solaire. A travers cette étude, nous avons présenté un modèle mathématique permettant une étude du procédé de la digestion anaérobie et son accélération au travers du contrôle de la température. A partir de ce modèle, nous avons simulé le comportement du système global. Nous avons remarqué que, la régulation de la température a accéléré la digestion anaérobie et a réduit le temps de rétention du digesteur. Ce qui permet donc d'accroître le volume de déchets traité par le digesteur. Ce travail se poursuit par une simulation de type hardware in the Loop (HIL) et s'achèvera par expérimentation sur le système réel.

Références

- [1] - J. HESS, *Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation* (Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis), (2007).
- [2] - K. HADRI, M. KHELAFI, A. BOULAL, et N. NEDJAH, Conception et réalisation d'un digesteur solaire de type batch, *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen*, (2007), 97 – 100.
- [3] - V. H. G. PALACIO, *Modélisation et commande floues de type Takagi-Sugeno appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III), (2007).
- [4] - D. A. RATKOWSKY, J. OLLEY, T. A. MCMEEKIN & A. BALL, Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *Journal of Bacteriology*, 149(1), (1982), 1-5.
- [5] - M. ROUEZ, *Dégradation anaérobie de déchets solides: caractérisation, facteurs d'influence et modélisations*. (Doctoral dissertation, Lyon, Institut National des Sciences Appliquées), (2008).
- [6] - K. DERBAL, M. M. B. LEHOCINE, A. MENIAI & A. KHALFAOUI, *Modélisation d'un procédé biologique de traitement des déchets solides pour la production de l'énergie et la protection de l'environnement*, Sciences & Technologie B, (27), (2008), 37-44.
- [7] - N. DIMITROVA & M. KRASTANOV, Nonlinear adaptive stabilizing control of an anaerobic digestion model with unknown kinetics. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 22(15), (2012), 1743-1752.
- [8] - B. BENYAHIA, T. SARI, B. CHERKI & J. HARMAND, Sur le modèle AM2 de digestion anaérobie. In *CARI 2010*. (2010, October).
- [9] - L. DELHALLE, G. DAUBE, Y. ADOLPHE, S. CREVECOEUR & A. CLINQUART, Les modèles de croissance en microbiologie prévisionnelle pour la maîtrise de la sécurité des aliments (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 16(3), (2012), 369-381.
- [10] - O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, A. GENOVESI & J. P. STEYER, Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnology and bioengineering*, 75(4), (2001), 424-438.
- [11] - R.C. MCKELLAR & X. LU, *Modelling microbial responses in food*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, (2004).
- [12] - M. H. ZWIETERING, J. C. DE WIT & S. NOTERMANS, Application of predictive microbiology to estimate the number of *Bacillus cereus* in pasteurised milk at the point of consumption. *International Journal of Food Microbiology*, 30(1), (1996), 55-70.
- [13] - J. LACOUR, *Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organique par digestion anaérobie en Haïti*, Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2012).