

## 1. INTRODUCTION

Actuellement, le coût de l'énergie augmente et les besoins en énergie se multiplient avec la croissance de la population mondiale et les processus industriels, ce qui entraîne des problèmes de pollution de l'environnement dangereux et provoque le réchauffement climatique. De nombreux chercheurs tentent encore de maîtriser les différentes technologies d'énergies renouvelables, parmi lesquelles on trouve la digestion anaérobie qui permet de bénéficier d'une source d'énergie propre (biogaz) et d'un engrais riche. Ces deux avantages classent la digestion anaérobie comme une source appropriée pour les zones rurales éloignées. [1]

Il convient de noter que la plupart des digesteurs sont chauffés par des sources d'énergie conventionnelles, ce qui rend leur utilisation coûteuse.

Dans le travail de Young et al. [2], la paroi extérieure du digesteur a été enroulée avec un matériau de chauffage électrique. Les essais expérimentaux effectués par [3], le traitement hydrothermal a été réalisé dans un digesteur en acier inoxydable qui a été chauffé électriquement. Un bain thermostatique a été utilisé pendant la procédure de chauffage de quatre réacteurs anaérobies utilisés dans les essais réalisés [4]. Afin de rester dans la gamme mésophile, la chaleur nécessaire a été fournie par une résistance électrique de 15 m. [5]

Pour améliorer le rendement et réduire le coût de ses digesteurs, plusieurs chercheurs ont développé des modèles de transfert de chaleur de digesteurs anaérobies chauffés par des moyens passifs tels que l'énergie solaire. Parmi ces chercheurs, Fleming (2002a, b) [6], Axaopoulos et al. (2001) [7], Kumar et al. (1988) [8], et Sodha et al. (1989) [9] ont modélisé le transfert de chaleur de digesteurs anaérobies avec des systèmes de chauffage passifs, mais certains de ces modèles manquent de validation expérimentale.

Ce travail repose sur l'utilisation de l'énergie solaire pour le réchauffement du digesteur via un capteur solaire double vitrage couplé au digesteur. L'étude théorique et expérimentale nous a permis d'avoir des résultats très encourageants avec la réalisation d'un digesteur solaire d'une capacité de 200 litres. L'expérimentation consiste à diriger le digesteur plein sud avec une inclinaison de  $27,88^\circ$  pour une réception maximale des rayons solaires. Le digesteur est rempli par les boues provenant de la station d'épuration par lagunage naturelle; le substrat est homogénéisé par agitation manuelle.

Le suivi de l'évaluation énergétique interne du digesteur est assuré par des thermocouples installés à l'intérieur du digesteur figure 1. Le autre suivi de la digestion anaérobie (méthanisation) est élaboré par différentes analyses physico-chimiques, ainsi que celle de la production du biogaz. L'objectif de cette recherche est de déterminer la performance du digesteur.

## II. Matériels et méthodes

On suppose pour l'étude théorique que :

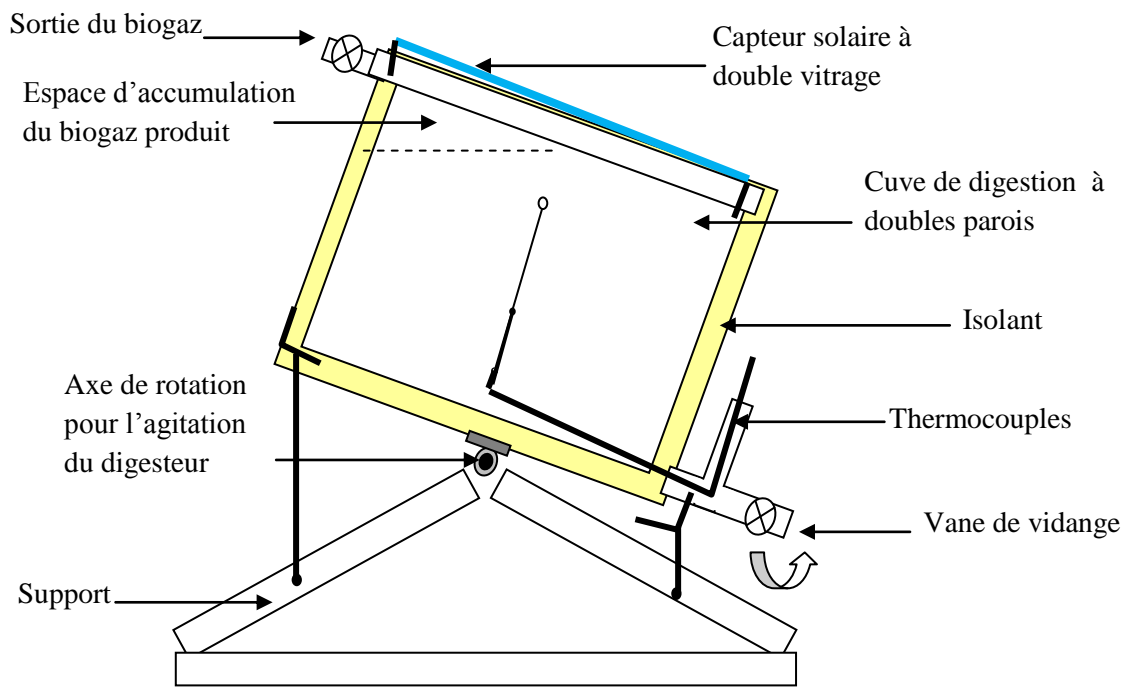
La température de chaque élément du digesteur est uniforme.

La quantité de rayonnement solaire absorbée par le vitrage est négligée.

Le cylindre est comparé à un parallélépipède.

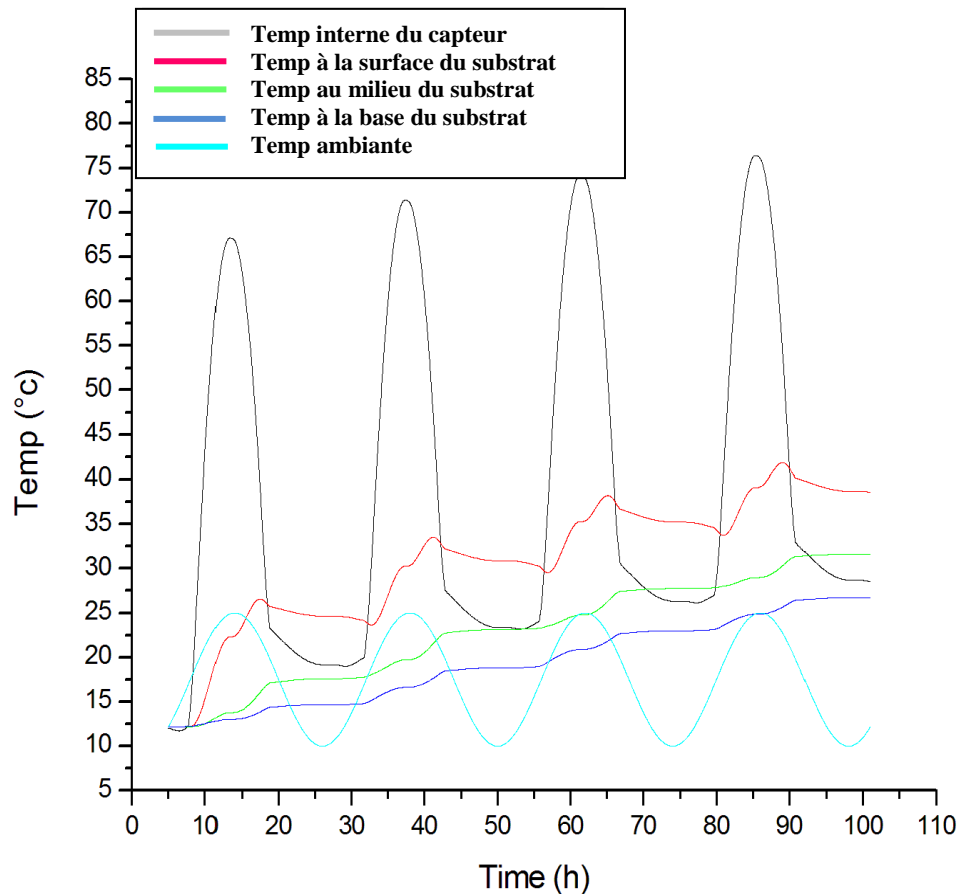
L'échange thermique entre les couches de substrat se fait uniquement par conduction.

Le transfert de chaleur par convection est en mode laminaire.



**Figure.1 : Schéma du digesteur menu d'un capteur solaire à double vitrage**

La figure 1 présente le schéma analytique du digesteur, la courbe de la figure 2 présente l'évolution théorique de la température ambiante, l'allure de la température interne du capteur, ainsi que celle des températures à l'intérieur du digesteur où on remarque qu'il y a un stockage de la chaleur à l'intérieur du digesteur.

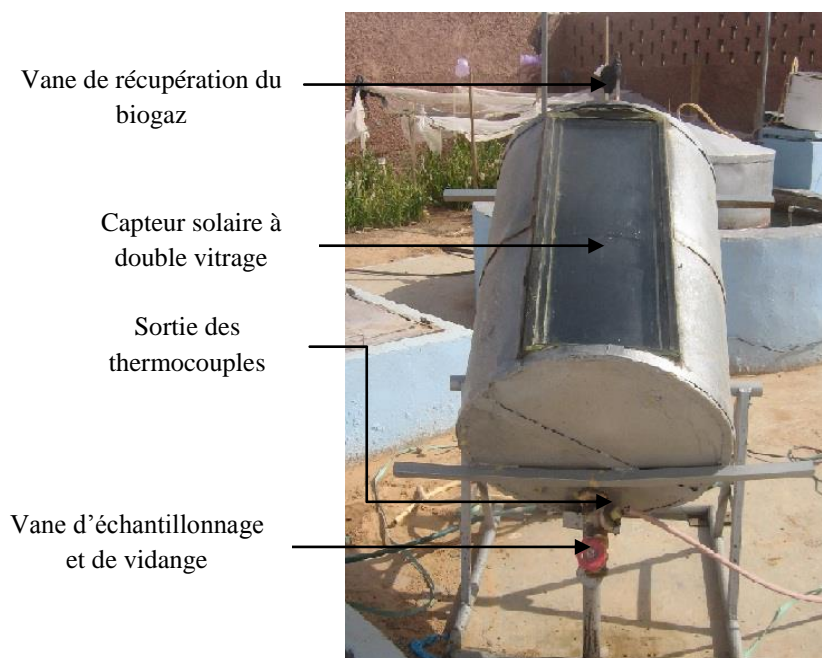


**Figure. 2 : Evolution des températures théoriques du système**

## II.1. Description du prototype:

Le digesteur est composé d'un réservoir cylindrique à double paroi séparées par un isolant en laine de verre de 5 cm d'épaisseur.

La capacité du réservoir est 200 litres. Le digesteur est équipé d'un capteur solaire intégré de 120 cm de longueur et 30 cm de largeur. Il est équipé de deux vannes, la première en haut, pour récupérer le biogaz, la seconde vanne se trouve en bas du digesteur. Elle sert pour l'alimentation et le vidange du digesteur, l'échantillonnage pour les différentes analyses et sortie des thermocouples afin de contrôler les températures à différents niveaux à l'intérieur du digesteur. Le premier thermocouple est placé à la base du substrat, le deuxième au milieu et le troisième à la surface du substrat.figure.3.



**Figure. 3 : Photo du digesteur solaire type batch opérationnel**

## II.2. Dispositif expérimental

Le digesteur est rempli au trois quarts (3/4) de son volume, (soit 150 litres) par la boue (diluée à 80%) de la station d'épuration par lagunage naturel et laissant digérer.

L'évolution de la température à l'intérieur du digesteur est assurée par trois thermocouples type K, fixés au milieu et à trois niveaux différents (base, milieu et surface) voir figure 1. Le suivi de la méthanisation est élaboré par les différentes analyses physico-chimiques.

Les caractéristiques de la boue utilisée sont regroupées dans le tableau 1.

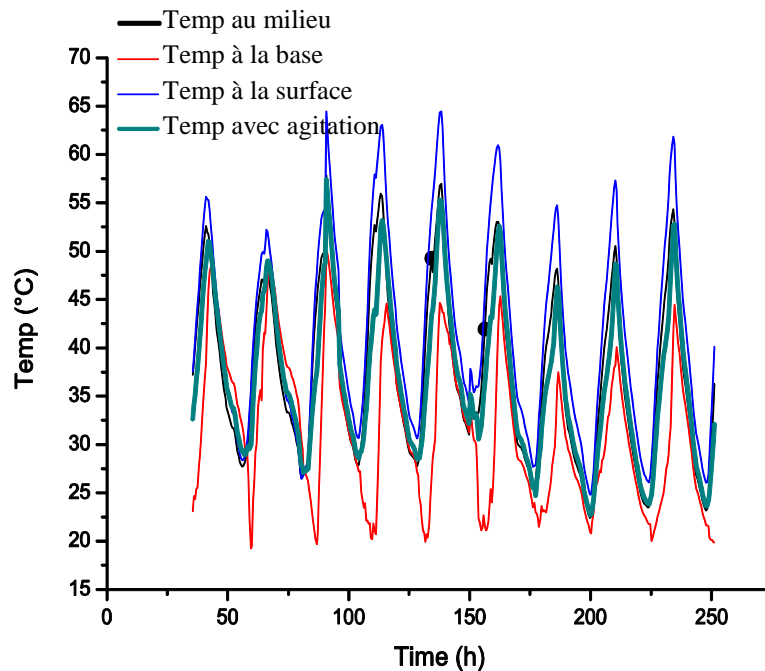
**Tableau n°1 : Caractéristiques de la boue brute**

Paramètres	Concentration
Ph	6.60
Matière organique (MO%)	50
DCO (mg O2/l)	3466
DBO5(mg O2/l)	2100

Le pH, la DCO, la DBO<sub>5</sub>, la MO et le volume du biogaz produit ont été mesurés pour distinguer l'influence de l'énergie apportée par le capteur solaire à double vitrage sur le déroulement de la méthanisation.

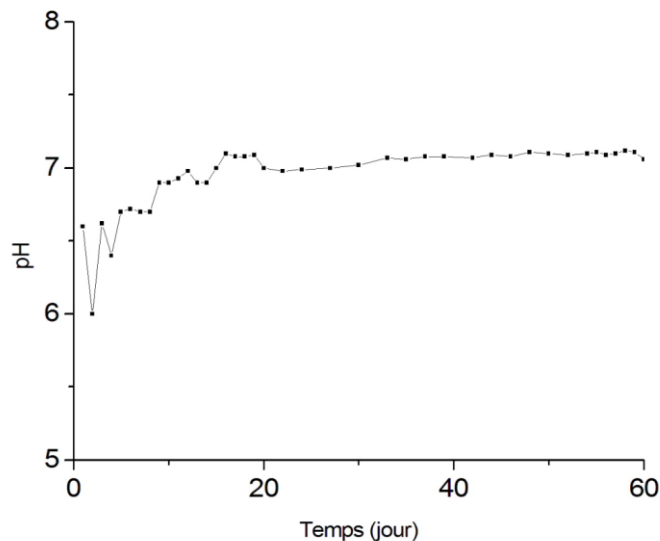
### III. Résultats et discussion :

La figure 4 présente l'évolution des températures à l'intérieur du digesteur. On remarque que les deux courbes de températures à la surface et au milieu sont en général supérieures à 25°C, celle de la base est inférieure quelque fois à 20°C, ce qui peut influencer sur la méthanisation, mais puisque la durée de cette température est courte (environ 4 heures) par rapport à la durée où la température est supérieure à 25°C (environ 20 heures), donc on a va obtenir une méthanisation optimale durant le 7/8 de la journée que l'on considère un très bon rendement. Surtout que notre digesteur fonctionne par énergie solaire qui est une énergie renouvelable sans l'intervention d'aucune énergie conventionnelle.



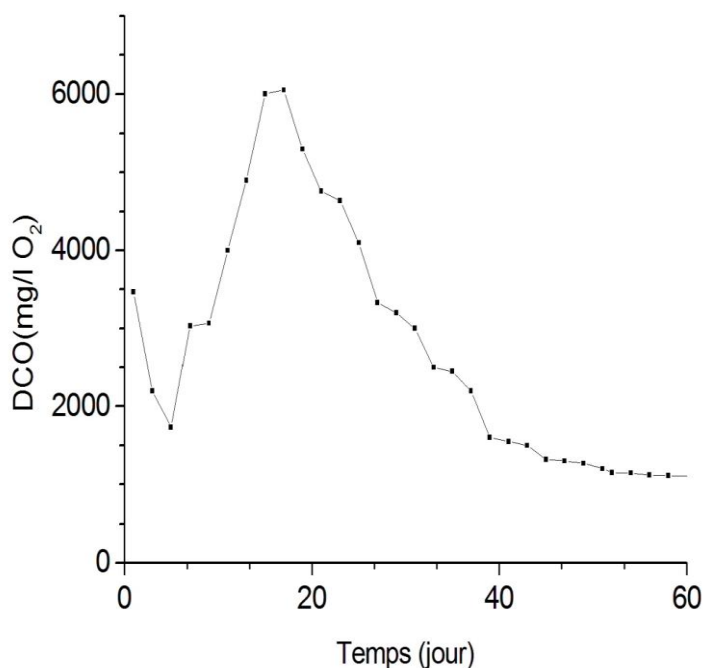
**Figure. 4: Courbe des températures à l'intérieur du digesteur  
Mois de février**

Le suivi du pH est très important durant la digestion anaérobie car les milieux acides ou basiques altèrent l'équilibre chimique des réactions enzymatiques. La figure 5 présente la variation du pH au cours de la digestion anaérobie de la boue étudiée, où on remarque une forte baisse du pH pendant les cinq premiers jours, cette variation est due à la solubilisation de la matière organique contenue dans la boue par les bactéries hydrolytiques qui engendrent une acidification du milieu. A partir du 6<sup>ème</sup> jour, jusqu'au 13<sup>ème</sup> jour, on assiste à une augmentation du pH, c'est l'étape acidogénèse. Au-delà du 13<sup>ème</sup> jour, la phase méthanogénèse débute pour former du méthane et du dioxyde de carbone.



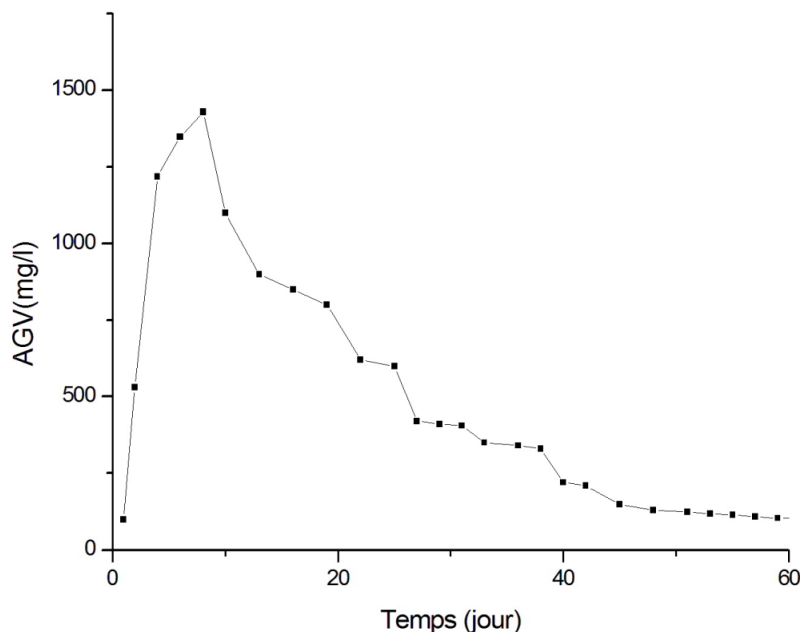
**Figure. 5: évolution du pH durant la digestion anaérobie**

La demande chimique en oxygène est présentée par la figure 6. L'augmentation de la concentration de la DCO durant les premiers jours est due en particulier à la production des acides gras volatiles (AGV) durant la phase acidogénèse et qui peuvent constituer jusqu'à 95 % du carbone organique total [10]. A partir du 27<sup>ème</sup> jour, on enregistre une diminution de la DCO due à la production de biogaz durant la phase méthanogénèse. La diminution de la DCO continue jusqu'à la fin de la méthanisation conduisant à la diminution du volume de biogaz produit, durant 60 jours de méthanisation, la valeur de la DCO dégradée est égale à 4900 mgO<sub>2</sub>/l, ce qui correspond à un taux de dégradation de 81%.



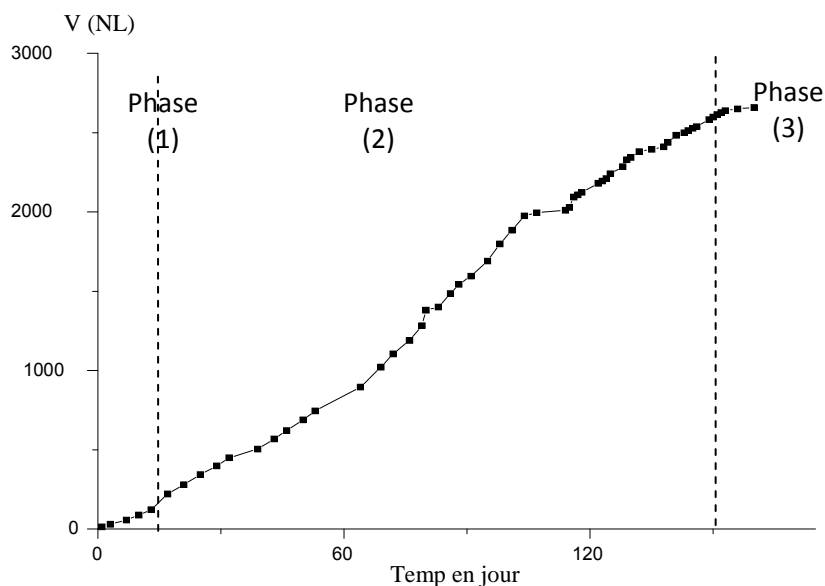
**Figure. 6 : L'évolution de la DCO durant la digestion anaérobie**

Les AGV sont des produits intermédiaires dont les concentrations reflètent la stabilité du processus de la digestion anaérobie. Les fortes concentrations en AGV peuvent entraîner une baisse de la production de méthane [11] ; [12].



**Figure. 7 : Evolution des AGV durant la digestion anaérobie.**

La figure 7 présente l'évolution des AGV en fonction du temps. On remarque une augmentation rapide de la concentration des AGV durant les huit (8) premiers jours pour atteindre une valeur maximale de 1400 mg/l (phase acidogénèse), à partir du 8ème jour la concentration en AGV diminue, cette diminution indique le début de la phase méthanogénèse où les AGV sont transformés en biogaz. A la fin de l'expérience, on enregistre une valeur minimale de 110 mg/l.



**Figure. 8 : Variation du volume cumulé de biogaz en fonction du temps**

Le volume total de biogaz produit est de 6661 NL, ce qui correspond à un rendement de 370 NL de biogaz/Kg de M.O, sachant que le rendement en biogaz des déchets organiques dans les conditions optimales varie entre 350 et 650 L/Kg de M.O [13]. Cet écart de rendement peut être dû d'une part à l'instabilité de la température à l'intérieur du digesteur et d'autre part à la dégradation

incomplète de la matière organique, sans oublier les défauts de fabrication du digesteur. Le pourcentage en méthane mesuré par la méthode d'ERGUDER [14] correspond à 55%.

#### IV. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus de ce travail, nous pourrions dire que l'utilisation de l'énergie solaire au moyen d'un capteur solaire à double vitrage incorporé dans le digesteur a donné un bon rendement de la méthanisation. Nous avons obtenu un intervalle de température mésophile favorable à une bonne méthanisation pendant la plus grande partie de la journée.

Le rendement du digesteur solaire pourrait être amélioré, si l'on pouvait introduire un moyen d'agitation pour l'homogénéisation du substrat et par conséquent sa température interne.

La modélisation, la similitude et l'expérimentation nous ont permis de réaliser un digesteur solaire patch à un prix très bas ne dépassant pas les 500 £.

En outre, Il contribue à la résolution de plusieurs problèmes d'énergie, problèmes économiques et environnementaux par l'utilisation de l'énergie solaire qui est une énergie renouvelable au lieu de l'énergie électrique ou tout autre type d'énergie conventionnelle. La protection de l'environnement par la présence d'une boue traitée qui peut être jetée dans la nature sans danger ou l'utiliser comme engrais dans l'agriculture.

#### Reference bibliographique :

- [1] Preston, T.R., Rodríguez, L., Low-cost biodigesters at the epicenter of ecological farming systems. Proceedings Biodigester Workshop, March 2002.
- [2] Song, Y. C., Kwon, S. J. and Woo, J. H. (2004). Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge. *Wat. Res.*, 38, 1653-1662.
- [3] Chunxing Li, Guangyi Zhang, Zhikai Zhang, Dachao Ma, Liangjie Wang, Guangwen Xu Hydrothermal pretreatment for biogas production from anaerobic digestion of antibiotic mycelial residue. *Chemical Engineering Journal* Volume 279, 1 November 2015, Pages 530–537.
- [4] V Riau, MÁ De la Rubia, M Pérez. Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain class A biosolids: A semi-continuous study. *Bioresource technology* 101 (8), 2706-2712.
- [5] Vincenzo Riggio, Elena Comino, Maurizio Rosso - Energy production from anaerobic co-digestion processing of cow slurry, olive pomace and apple pulp. Volume 83, November 2015, Pages 1043–1049.
- [6] Fleming, J.G., 2002a. Novel simulation of anaerobic digestion using computational fluid dynamics. PhD Dissertation. North Carolina State University, Raleigh, NC.
- [7] Axaopoulos, P., Panagakos, P., Tsavdaris, A., Georgakakis, D., 2001. Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester. *Sol. Energy* 70, 155–164.
- [8] Kumar, A., Dayal, M., Goyal, I.C., Sodha, M.S., 1988. Solar assisted biogas plants II: energy balance of floating drum type biogas plants. *Int. J. Energy Res.* 12, 253 –
- [9] Sodha, M.S., Goyal, I.C., Kishor, J., Jayashankar, B.C., Dayal, M., 1989. Solar assisted biogas plants IV A: experimental validation of a numerical model for slurry temperature in a glazed fixed-dome biogas plant. *Int. J. Energy Res.* 13, 621–625.
- [10] HARMSSEN J., Identification of organic compounds in leachate from a waste tip. 1983. *Wat. Res.*, 17, 699-705.
- [11] Gourdon R., Vermande P.. Effects of propionic acid concentration on anaerobic digestion of pig manure. *Biomass London* ,1987. 13 (1): 1-12.
- [12] Ahring B, Westerman P. Product inhibition of butyrate metabolism by acetate and hydrogen in a thermophilic coculture, (1988). *Applied and Environmental Microbiology* 54 (10): 2393-1397.
- [13] Antoine friend assouh, Jose squares and al. "Institute of the energy and the environment of French-speaking world (IEPF) 2005. BIOMASS ENERGY GUIDE" 2nd Edition.
- [14] Erguder TH, Guven E, Demirel GN. Anaerobic treatment of olive mill wastes in batch reactors. *Process Biochemistry* 2000; 36(3): 243-8.