



## **Effet de l'agitation sur la digestion anaérobie des déchets ménagers et assimilés en régime mésophile**

### **Effect of agitation on anaerobic digestion of household and similar waste under mesophilic regime**

**A. Hajji\*, M. Rhachi**

*Université Mohammed V - Rabat, Ecole Supérieure de Technologie de Salé, Laboratoire Energétique, Matériaux et Environnement (LEME), Avenue Prince Héritier, BP. 227 Salé Medina, C.P. 11060 – Maroc*

*Received 10 Feb 2016, Revised 24 May 2016, Accepted 10 Jul 2016*

*\*Corresponding author. E-mail: [amine.hj3@gmail.com](mailto:amine.hj3@gmail.com); Phone: +212661453930*

#### **Abstract**

Currently, following the example of solar photovoltaic and wind power, the anaerobic digestion can be a strategic choice for the promotion of green energy in Morocco, thanks to the significant potential of biomass available in the Kingdom and due to its strong commitment to environmental protection and promotion of sustainable development. Although the sector appeared to be very promising, it remains largely unexploited, can be explained by its relatively low yields due to the non-mastery of the process. This study is put forward in that context which focuses on the optimization of this process operating conditions, specifically the study of the influence of the agitation on its effectiveness. Therefore, we performed a series of experiments covering the variation of the mode, intensity and agitation frequency. As for the mode, we choose three types of agitation (continuous, intermittent and without agitation), in terms of intensity, we took values ranging between 20, 40, 60, 100 and 160rpm (revolutions per minute), and as to the frequency, we opted for a range of 2h, 4h, 8h and 12h. For all experiments, the fermentation has been carried out under a temperature of  $40^{\circ}\text{C} \pm 0,6$  which constitutes a mesophilic system, with a retention time fixed at 21 days and a reduction in particle size to 10 mm [1-3]. The results showed a significant reduction of approximately 62% of the production of biogas for digestion without agitation, compared to the two other systems with continuous or intermittent agitation, which is mainly due to the formation of a crust at the surface preventing the proper degassing. Other experiments with different agitation intensities demonstrated that an agitation at low rotation speed, under the intermittent mode, allows a better biogas production. As for the frequencies of agitation, they were validated in such a way as to avoid crust formation in the digester in order to ensure better efficiency of the process.

*Keywords:* Anaerobic digestion, mesophilic system, agitation, biogas, crust.

#### **Résumé**

Actuellement, à l'instar du solaire photovoltaïque et de l'éolien, la digestion anaérobie peut constituer un choix stratégique pour la promotion des énergies vertes au Maroc, de par le potentiel important en biomasse dont dispose le Royaume et suite à son engagement marqué pour la protection de l'environnement et la promotion du développement durable. Même assez prometteuse, cette filière reste peu exploitée, suite à ses rendements relativement faibles dus à la non-maitrise du procédé. C'est dans ce sens que s'inscrit la présente étude qui vise l'optimisation des conditions de fonctionnement de ce procédé, et plus précisément l'étude de l'influence de l'agitation sur son efficacité. On a donc réalisé une série d'expériences qui porte sur la variation du mode, de l'intensité et de la fréquence de l'agitation. En ce qui concerne le mode, notre choix s'est porté sur trois types

d'agitation (continu, intermittent et sans agitation), pour ce qui est de l'intensité, on a pris des valeurs comprises entre 20, 40, 60, 100 et 160 tpm (tours par minute), et quant à la fréquence, on a opté pour un intervalle allant de 2h, 4h, 8h et 12h. Pour l'ensemble des expériences, la fermentation a été réalisée sous une température de  $40^{\circ}\text{C}\pm 0,6$ , soit un régime mésophile, avec un temps de rétention fixé à 21 jours et une réduction de la taille des particules à 10 mm [1-3]. Les résultats ont montré une diminution considérable d'environ 62% de la production de biogaz pour la digestion sans agitation, par rapport aux deux autres systèmes avec agitation continue ou intermittente, ce qui est principalement dû à la formation d'une croûte au niveau de la surface empêchant le bon dégazage. D'autres expériences avec différentes intensités d'agitation ont démontré qu'une agitation à faible vitesse de rotation, sous le mode intermittent, permet une meilleure production de biogaz. Quant aux fréquences d'agitation, celles-ci ont été validées de telle façon à éviter la formation de croûte dans le digesteur pour garantir ainsi un meilleur rendement du procédé.

*Mots clés* : Digestion anaérobie, régime mésophile, Agitation, biogaz, croûte.

## **1. Introduction**

Dépourvu de ressources pétrolière et gazière, le Maroc a accordé une grande priorité au développement des énergies renouvelables, de par leur gisement important ainsi que leur contribution à la réduction des émissions à effet de serre. Ce choix stratégique devra jouir de toutes les conditions nécessaires pour garantir au Royaume sa sécurité énergétique au futur [4]. Parmi les énergies renouvelables non encore soutenues au Maroc, on cite le biogaz, issue de la digestion anaérobie de la biomasse sous ses différentes formes : liquide et solide, qui représente une source énergétique verte considérable [5].

La digestion anaérobie est un procédé complexe qui nécessite la compréhension et le contrôle de certaines conditions physico-chimiques pour lesquelles le processus de fermentation est optimisé tel que la température, le pH, le temps de séjour et l'agitation qui fait l'objet de notre étude.

L'agitation est parmi les paramètres clé du bon fonctionnement du processus de fermentation, puisqu'une agitation optimisée permet d'assurer une bonne homogénéisation du mélange et de favoriser ainsi le contact entre les microorganismes et le substrat, pour une meilleure dégradation de la matière organique [6,7].

Ainsi, plusieurs études ont été menées, Johan Lindmark & al [2] ont réalisé une étude expérimentale des effets de différentes intensités et fréquences d'agitation sur la digestion anaérobie de la fraction organique des déchets solides municipaux, où ils ont comparé l'efficacité du procédé pour trois régimes d'agitation : 150 tpm, 25 tpm, et agitation continue pour laquelle ils ont testé plusieurs fréquences d'agitation. Pour le mode d'agitation, Khurshed Karim & al [8], ont étudié l'influence du mode sans et avec agitation sur la production de biogaz.

Dans ce contexte, le présent travail se focalise sur l'optimisation de l'agitation, en vue d'améliorer la production du biogaz, et ce, par l'étude de l'influence de la variation du mode, de l'intensité et de la fréquence d'agitation sur le procédé de la digestion anaérobie.

## **2. Matériels et méthodes**

### *2.1. Origine et caractérisation du substrat*

Les déchets ménagers et assimilés (DMA), utilisés dans le présent travail, ont été échantillonnés auprès du Centre de tri de la décharge contrôlée d'Oum Azza (région de Rabat). Après récupération des échantillons de déchets, on a procédé à une caractérisation physique (Table 1), puis on a appliqué un prétraitement physique pour la réduction de la taille des particules jusqu'à 10 mm [9]. Une fois les échantillons sont préparés, ils ont été congelés jusqu'à leur utilisation [10].

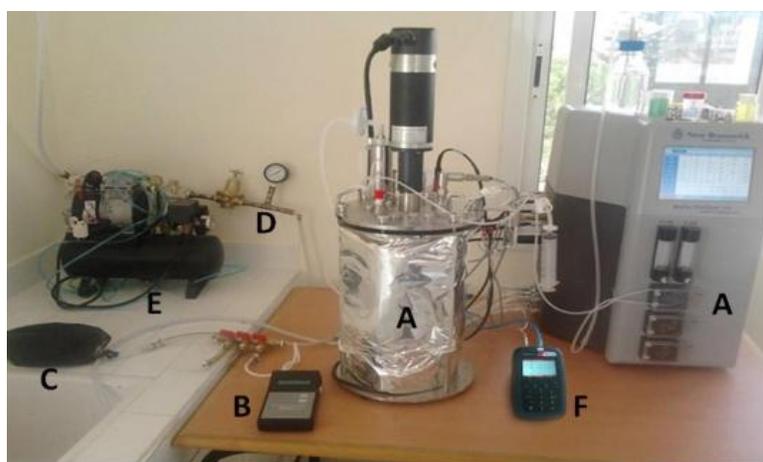
### *2.2. Dispositif expérimental*

Le digesteur utilisé est de type BioFlo / CelliGen 115. C'est un bioréacteur polyvalent d'une capacité de 14 litres (fig. 1) qui offre un système entièrement équipé de dispositif de contrôle intégré du processus de fermentation anaérobie (pH, Oxygène dissous (DO), Agitation, Température, Pompes d'alimentation, Niveau du mélange). Les différents paramètres de fonctionnement du digesteur sont calibrés et contrôlés à partir d'un écran tactile. De plus, le bioréacteur est connecté à un débitmètre pour la quantification du biogaz, à un analyseur de biogaz de marque

GEOTECH - GA 5000 pour l'analyse de sa composition et à un gazomètre pour son stockage. Le digesteur a été couvert par des feuilles en aluminium pour le protéger de la lumière [9].

**Tableau 1:**Composition des déchets ménagers et assimilés (DMA)

Composition	Pourcentage massique (%)
Substrat-organique	84
Verre	1,5
Plastiques	2,5
PVC	2
Papier carton	6,5
Métaux	1,5
Autres	2



**Figure 1:** Digesteur expérimental (A.Fermenteur type BioFlo® / CelliGen® 115 ; B.Débitmètre ; C. réservoir à gaz ; D.Régulateur d'eau pour le système de refroidissement ; E.Compresseur d'air. F.Analyseur de biogaz)

### 2.3. Méthodes analytiques

La fraction organique des déchets a été homogénéisée et répartie en quantités égales de 5 kg, puis congelée pour une utilisation ultérieure. Avant chaque utilisation, l'échantillon a été décongelé à température ambiante et dilué avec de l'eau de robinet.

Le réacteur a été exploité avec un volume utile de 10 litres, avec un temps de rétention de 21 jours et à  $40 \pm 0,6^\circ\text{C}$  représentant le régime mésophile. Les mêmes conditions expérimentales ont été respectées pour l'ensemble des expériences réalisées mais sous différents régimes d'agitation. La température et le pH à l'intérieur du digesteur ont été surveillés en continu par l'intermédiaire de sondes intégrées connectées à l'unité du bioréacteur. Le biogaz produit a été quantifié à l'aide d'un débitmètre de marque : AgilentADM 2000 E, stocké dans un réservoir à gaz et analysé à l'aide d'un analyseur de biogaz de marque : GEOTECH - GA 5000. Pour l'ensemble des expériences, l'ajustement du pH pour atteindre la zone de l'activité anaérobie a été effectué à l'aide du NaOH. Pendant les huit premiers jours, on a procédé à la correction de la chute du pH par l'ajout de NaOH, pour atteindre une valeur cible de l'ordre de 6,5 [11-13].

## 3. Résultat et discussion

### 3.1. Etude N°1 : Digestion sans agitation

Au cours de cette étude, on a analysé l'effet de l'absence de l'agitation sur le comportement de la digestion anaérobie des déchets ménagers et assimilés, on a mis en évidence, que le transfert de matière au sein du digesteur a été fortement réduit, une des conséquences : la diminution de la production de biogaz.

### 3.1.1. Effet de l'absence de l'agitation sur le pH

Au début de l'expérimentation, des valeurs basses de pH de l'ordre de 5 ont été enregistrées, par conséquent, on a procédé pendant les huit premiers jours à l'ajout de NaOH pour ajuster le pH, jusqu'à une valeur de l'ordre de 6,5 (fig. 2). Cette baisse du pH est due, d'une part, à la nature acide des déchets, et d'autre part, à la formation des acides organiques et des acides gras volatils lors de la dégradation du substrat. Après le 8<sup>ème</sup> jour, on a remarqué que la valeur du pH a évolué, de façon très lente, pour atteindre la neutralité au 19<sup>ème</sup> jour. Ceci peut être expliqué par l'absence de l'agitation qui a induit une limitation du contact entre microorganismes et substrat, ralentissant ainsi l'épuisement des acides formés lors de l'acidogénèse[14,15].

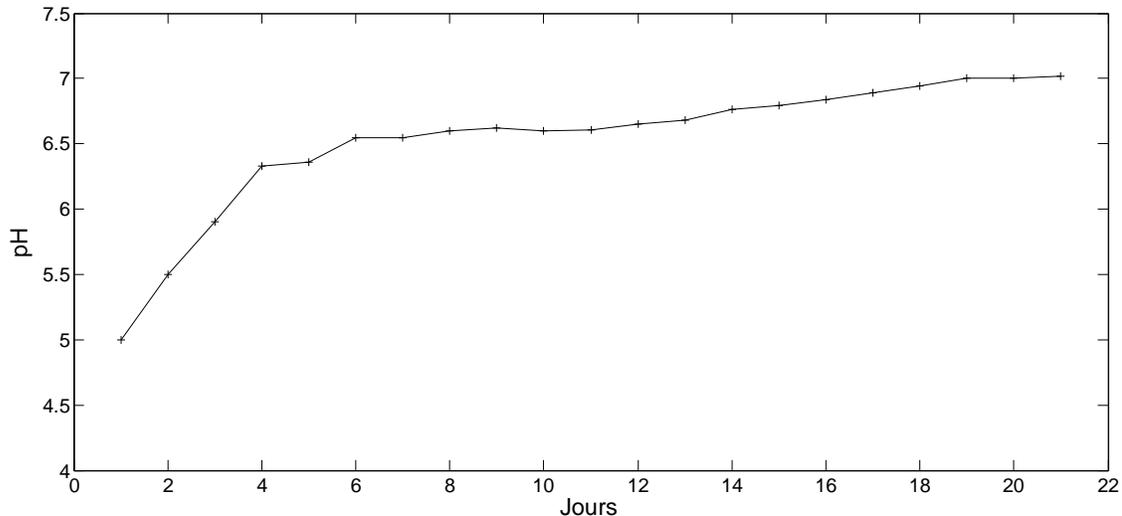


Figure 2: Evolution du pH en fonction du temps

### 3.1.2. Effet de l'absence de l'agitation sur la production de biogaz

Pendant les six premiers jours, le processus de fermentation a été stable, avec une production moyenne de biogaz de 0,4 m<sup>3</sup>/j, après le 6<sup>ème</sup> jour et jusqu'à la fin de l'expérimentation (fig. 3), le bioréacteur a montré une instabilité dans son fonctionnement, se traduisant par une chute de la production de biogaz d'environ 62% par rapport au début de l'expérience, avec un rendement enregistré en méthane de l'ordre de 58%.

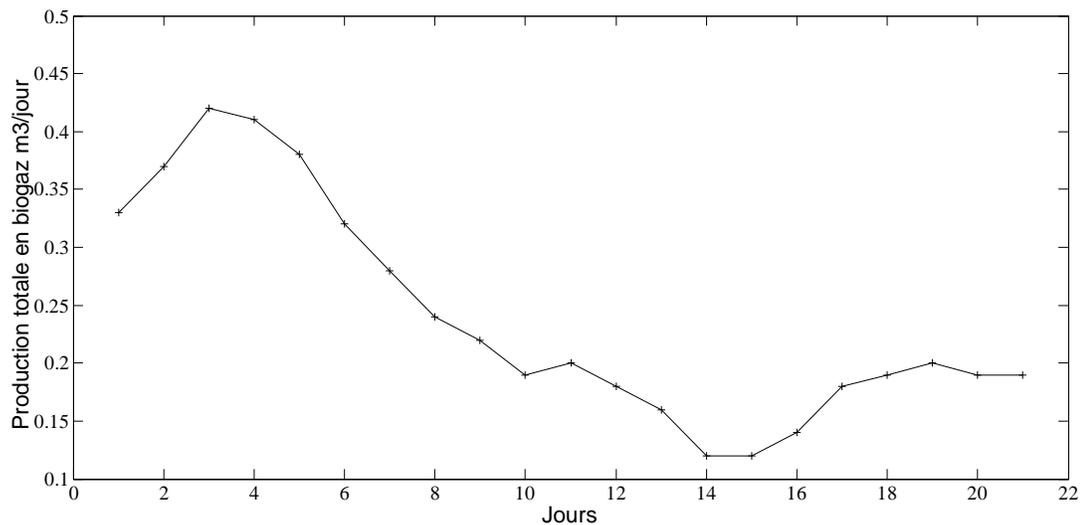


Figure 3: Evolution de la production de biogaz en fonction du temps pour la digestion anaérobie sans agitation

Ce dysfonctionnement est le résultat, d'une part, du mauvais contact du substrat avec les microorganismes, qui a limité la conversion totale du substrat en biogaz[1,8,16], et d'autre part, de la formation d'une croûte à la surface du liquide de fermentation d'une épaisseur d'environ 1.3 mm, qui a réduit considérablement la récupération du biogaz produit. La croûte formée est constituée d'une mousse produite à la surface du liquide de fermentation, sur laquelle se déposent des particules flottantes de déchets qui se durcissent avec le temps[17,18].

### 3.2. Etude N°2 : Digestion anaérobie avec agitation continue

Dans la présente partie, on a évalué l'effet de différentes intensités d'agitation, soit de 20, 40, 60, 100 et 160 tr/min sur les paramètres de fonctionnement du procédé de la digestion anaérobie des déchets ménagers et assimilés.

#### 3.2.1. Effet de l'agitation continue sur le pH

Au démarrage de cette série d'expériences, tous les échantillons avaient un pH très bas, de l'ordre de 5, qui a été ajusté et corrigé pendant les huit premiers jours de l'expérimentation. Après le 8<sup>ème</sup> jour, on a enregistré un comportement assez similaire du pH pour les intensités de 20, 40, et 60 tr/min, avec une évolution stable et améliorée pour l'agitation de 40 tr/min, où on a atteint la neutralité dès le 15<sup>ème</sup> jour. Cependant, pour le cas du 100 tr/min, on a enregistré une évolution très lente et limitée du pH, avec un maximum de 6,83 (valeur atteinte au 19<sup>ème</sup> jour). Quant à l'agitation de 160 tr/min, elle a été marquée par une chute du pH commençant dès le 11<sup>ème</sup> jour, pour atteindre des valeurs très basses le 21<sup>ème</sup> jour, avec une valeur de 5,7, donnant lieu à une inhibition de la digestion anaérobie [2,14].

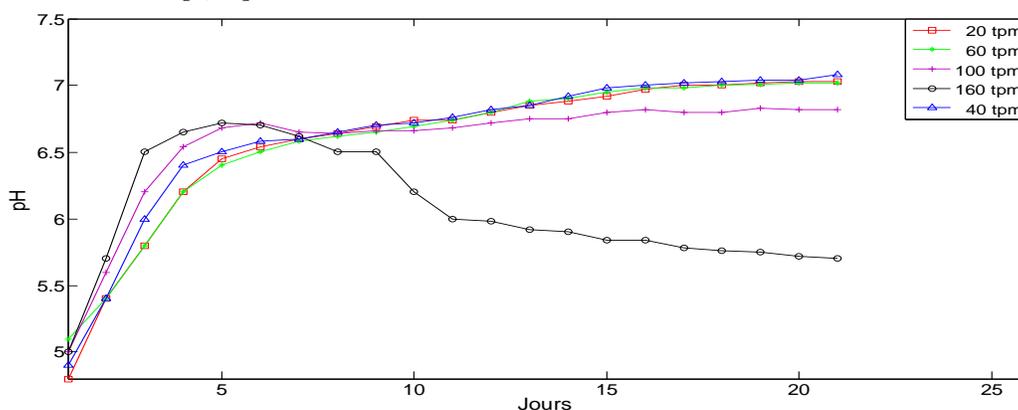
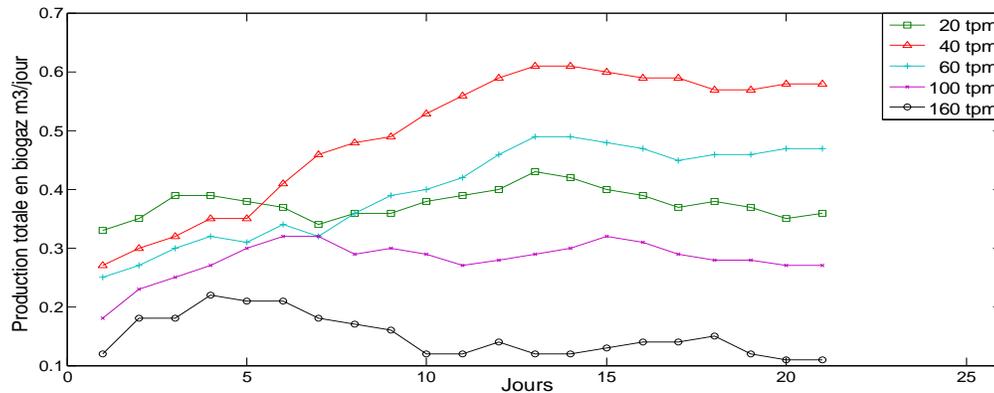


Figure 4: Evolution du pH en fonction du temps pour la digestion anaérobie avec agitation continue

#### 3.2.2. Effet de l'agitation continue sur la production de biogaz

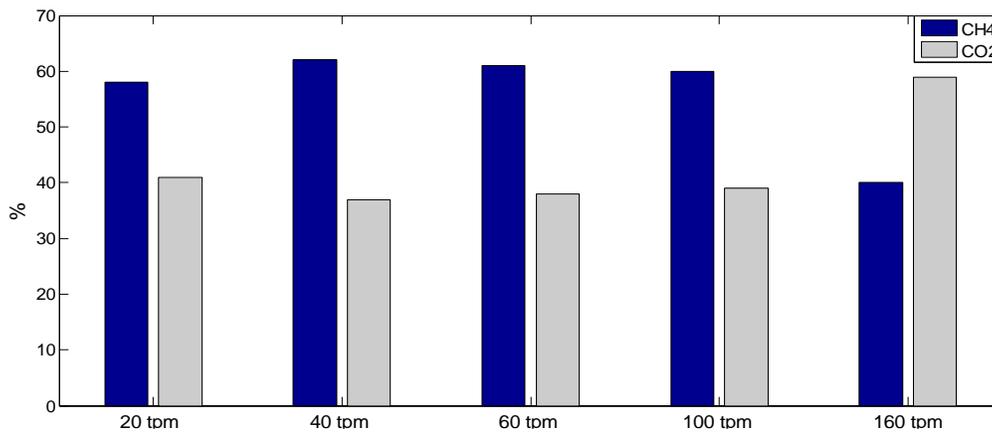
D'après les résultats des expériences réalisées, on a constaté qu'il y a deux principales périodes à analyser. La première allant du 1<sup>er</sup> jour de démarrage du digesteur jusqu'au 5<sup>ème</sup> jour, elle correspond aux étapes d'hydrolyse, d'acidogénèse et d'acétogénèse. Lors de cette période, on a remarqué, que plus l'intensité d'agitation est faible, plus le débit de biogaz augmente, ceci a été confirmé par l'agitation de 20 tr/min, qui a affiché une production maximale de 0,4 m<sup>3</sup>/j (fig. 4). Dès lors, on peut déduire que cette phase demande un minimum d'immobilisation du substrat. Une forte agitation est donc un facteur limitant de cette étape du processus. La deuxième période dure à partir du 5<sup>ème</sup> jour jusqu'à la fin de l'expérimentation, elle concerne l'étape méthanogénèse, au cours de laquelle, une production maximale et stable a été constatée pour la digestion sous agitation de 40 tr/min, qui a atteint une valeur de l'ordre de 0,61 m<sup>3</sup>/j dès le 13<sup>ème</sup> jour (fig. 5). Pour les intensités d'agitation de 20 et 60 tr/min, elles ont présenté un comportement assez similaire par rapport à l'évolution de la production du biogaz. Pour l'agitation à 100 tr/min, on a enregistré une faible diminution de la production du biogaz, qui est restée stable pour le reste de la fermentation. Quant à l'agitation à 160 tr/min, on a observé une production très faible du biogaz, avec une diminution progressive jusqu'à la fin de l'expérimentation, où elle a avoisiné les 0,10 m<sup>3</sup>/j,

Ceci est dû, en partie, à la formation d'une mousse couvrant la surface du digesteur, qui a été à l'origine de la formation d'une couche mince avec les particules flottantes de déchets [19,20].



**Figure 5:** Evolution de la production de biogaz en fonction du temps pour la digestion anaérobie avec agitation continue

L'analyse de l'évolution de la production du biogaz ainsi que celle du pH, approuve l'effet significatif de l'agitation sur l'efficacité du procédé, à savoir qu'une agitation peu intense peut optimiser le processus de la digestion anaérobie[2]. Cela a été bien appuyé par les résultats de la composition du biogaz, où on a eu un meilleur rendement du méthane attribué à l'agitation de 40 tr/min, avec 62% du méthane, suivie de celle de 60tr/min avec 61% du méthane. On trouve par la suite des rendements assez faibles de l'ordre de 57% pour l'agitation de 20 et 100 tr/min. Pour le cas de l'agitation à 160 tr/min, on a relevé un rendement très faible en méthane de 40%, ce qui a confirmé les résultats précédents sur le dysfonctionnement du processus. On peut alors affirmer que cette intensité d'agitation entraîne l'inhibition de la digestion anaérobie [17,21].



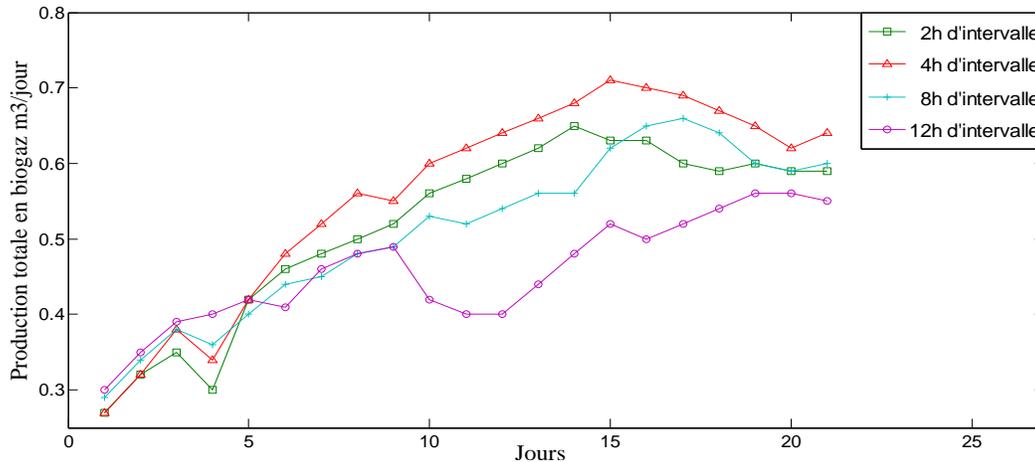
**Figure 6:** Taux de méthane et de dioxyde de carbone en fonction de l'intensité d'agitation pour la digestion anaérobie avec agitation continue

### 3.3. Etude n°3 : Digestion anaérobie avec agitation intermittente

Lors de cette étude, on a évalué l'effet de différents intervalles d'agitation allant de 2h, 4h, 8h jusqu'à 12h, sur les performances de la digestion anaérobie. Pour l'intensité d'agitation, on a choisie celle qui a présenté une production maximale de biogaz, ainsi qu'un rendement meilleur en méthane à savoir l'agitation à 40 tr/min.

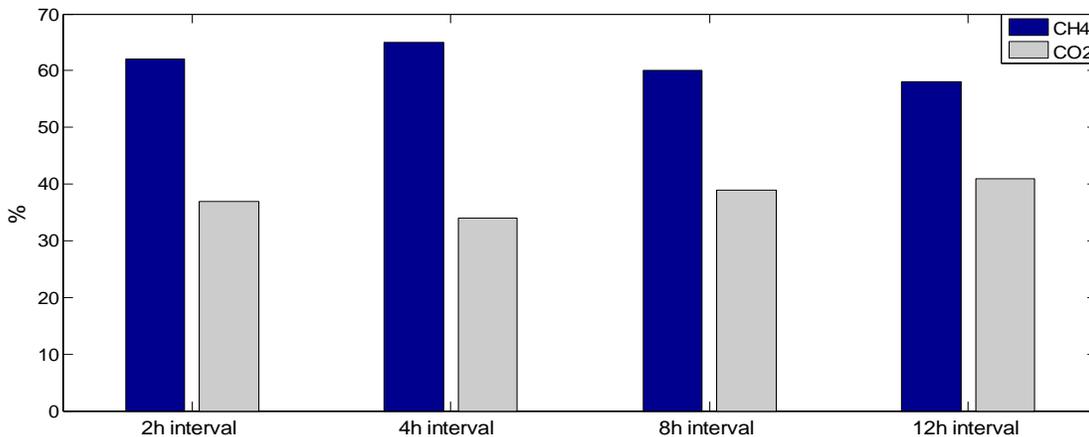
Pendant les six premiers jours, toutes les expériences avaient une production assez similaire. Après cette période, on a observé une variation par rapport à la production du biogaz, marquée d'une part, par une augmentation stable

de la production du biogaz pour l'intervalle d'agitation de 4h, atteignant son pic le 15<sup>ème</sup> jour avec un débit maximal de 0,71m<sup>3</sup>/j et un taux de méthane de 65%, et d'autre part, par un dysfonctionnement du processus de la digestion anaérobie pour l'intervalle d'agitation de 12h, qui a connu une chute importante de la production du biogaz, arrivant à des valeurs de l'ordre de 0,4m<sup>3</sup>/j avec un taux de méthane de 58% (fig. 6) [3,22].



**Figure 7:** Evolution de la production de biogaz en fonction du temps pour la digestion anaérobie avec agitation intermittente

Ainsi, on a déduit que l'agitation intermittente a un effet sur le rendement du procédé, puisqu'on a remarqué que plus on augmente l'intervalle d'agitation, plus on met du temps pour atteindre la production maximale en biogaz [23,24].



**Figure 8:** Taux de méthane et de dioxyde de carbone en fonction de l'intervalle d'agitation

### Conclusion

Les résultats des expériences réalisées à l'échelle du laboratoire ont montré, que l'agitation a une influence significative sur les performances de la digestion anaérobie des déchets ménagers et assimilés. Lors de cette série d'expériences, on a procédé à la variation du mode, de l'intensité et de la fréquence de l'agitation afin d'évaluer leurs effets sur le comportement de la digestion anaérobie.

Au terme de ce travail, on a pu déduire en premier, que la phase de démarrage du processus de digestion anaérobie, soit les cinq premiers jours, demande un minimum d'immobilisation du substrat, pour atteindre une production optimal en biogaz. Cela a été vérifié pour le cas de la digestion en absence d'agitation, ainsi que pour

l'agitation à 20tr/min, pour ces deux cas, la production du biogaz a été maximale pour cette phase, soit environ 0,40m<sup>3</sup>/j. On a pu aussi montrer que l'absence de l'agitation peut réduire jusqu'à 62% de la production finale du biogaz, dû d'une part, aux mauvais contacts du substrat avec les microorganismes, ce qui limite la cinétique de conversion du substrat en biogaz, et d'autre part, à la formation d'une croûte à la surface du liquide de fermentation, qui empêche la récupération du biogaz. Pour ce qui est de l'intensité de l'agitation, on a pu voir qu'une forte intensité induit l'inhibition du processus de la digestion anaérobie et entraîne la formation d'une mousse à la surface du digesteur, qui limite le dégazage du bioréacteur. Ceci a été constaté pour la digestion à 160 tr/min, qui a présenté une faible production en biogaz de l'ordre de 0,12m<sup>3</sup>/j, majoritaire en CO<sub>2</sub> avec un taux de 59%. L'agitation en mode intermittent, a amélioré la production ainsi que le taux du méthane, puisque pour l'intensité d'agitation de 40tr/min (qui présente la vitesse optimale d'agitation), avec un intervalle de 4h, on a connu une augmentation de la production du biogaz de 17%, avec une amélioration du taux de méthane de 5%, par rapport à une agitation continue.

## Références

1. Stafford DA, *J. Biomass* 2 (1982) 43-55.
2. Lindmark J, Eriksson P, Thorin E, *J. Waste. Manage*, 34-8 (2014) 1391-1397.
3. Lindmark J, Thorin E, Bel Fdhila R, Dahlquist E, *J. Renew.Sust.Energ.Rev* 40 (2014) 1030-1047.
4. Loi n° 13-09 relative aux énergies renouvelables, promulguée par Dahir n° 1-10-16 du 26 Safar 1431 (11 février 2010) publiée au *Bulletin officiel* n° 5822 du 1er rabii II 1431 (18 mars 2010).
5. Leidreiter A, Boselli F, "100% énergies renouvelables: renforcé le développement au Maroc", *World Future Council*, (2015).
6. Moletta R, *J. Water. Sci.* 2 (1989) 265-293.
7. Chaslerie T, "Techniques de Bioconversion: la Biométhanisation", *Rapport IUT*, (2002).
8. Karim K, Klasson KT, Hoffmann R, Drescher SR, DePaoli DW, Al-Dahhan MH, *J. BioresourTechnol* 96 (2005) 1607-12
9. Hajji A, Rhachi M, *J.Energy Procedia*36 (2013)515-520.
10. Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, Borzacconi L, Campos J. L, Guwy A. J, Kalyuzhnyi S, Jenicek P and van Lier J. B, *J.Water.Sci.Technol -WST* 59 (2009) 927-934.
11. Fernández RJ, Pérez M, Romero L.I, *J.Chem. Eng*193-194 (2012) 10-15.
12. Kalloum S, Khelafi M, Djaafri M, Tahri A et Touzi A, *J.Renew. Energ*10-4 (2007) 539 - 543.
13. Kaparaju P, Buendia I, Ellegaard L, Angelidakia I, *J. Bioresour. Technol* 99-11(2008) 4919-4928.
14. M'Sadak Y, Ben M'Barek A, *J.Alg. Arid .Environ* 3-1(2013) 24-34.
15. Zhai N, Zhang T, Yin D, Yang G, Wang X, Ren G, Feng Y, *J. Waste.Manage.* 38 (2015) 126-131.
16. Keanoi N, Hussaro K, Teekasap S, *Am. J. Environ Sci*10 (2014) 74-85.
17. Ganidi N, Tyrrel S, Cartmell E, *J. Bioresour. Technol*100- 23(2009) 5546-5554.
18. Bollon J, "Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche : essais expérimentaux et modélisation" *Thèse. Villeurbanne : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France* (2012).
19. Ong HK, Greenfield PF, Pullammanappallil PC, *J. Environ Technol* 23 (2002) 1081-90.
20. Lindmark J, Eriksson P, Thorin E, *J.Waste Manag.* 34 (2014) 1391-7.
21. Subramanian B, Pagilla KR, *J.Bioresour. Technol* 159 (2014).182-192.
22. Rico C., Rico J.L., Muñoz N., Gómez B., Tejero I., *Eng Life Sci.* 11 (2011).476-81.
23. Sulaiman A., Hassan M.A., Shirai Y., Abd-Aziz S., Tabatabaei M., Busu Z., Yacob S., *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 3 (2009) 1577-1583.
24. Kowalczyk A, Harnisch E, Schwede S, Gerber M, Span R, *J.Appl Energy* 112 (2013) 465-72.

(2016) ; <http://www.jmaterenvironsci.com/>