

# Etude de la digestion anaérobie des effluents issus de l'industrie agro-alimentaire

Souhaib Zerrouki, Rachida Rihani, Fatiha Bentahar

Laboratoire Phénomènes de transfert, Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB). Bab-Ezzouar, BP 32 El Alia 16111 Alger, Algérie.

---

## Résumé

Ce travail expérimental effectué à l'échelle laboratoire révèle les principaux résultats relatifs à l'étude du processus de la digestion anaérobie des effluents issus de l'industrie agroalimentaire. Dans notre cas, il s'agit d'un effluent composé essentiellement de jus d'orange et d'abricot. Pour cela, nous avons suivi les paramètres qui influencent directement le processus de fermentation à savoir : la croissance de la flore microbienne, la demande chimique en oxygène, le pH. Le volume total de biogaz récupéré après une fermentation de 552 heures en milieu acide est de 23055NmL. La dégradation de la matière organique a conduit à un taux d'abattement de 60%. Par ailleurs, les quantités de méthane produites et analysées par GC/MS sont satisfaisantes (71%). La cinétique de production de biogaz a été modélisée avec le modèle de Gompertz modifié. Un bon accord entre ce modèle et les données expérimentales a été obtenu.

*Mots clés : Biogaz ; digestion anaérobie ; digesteur ; méthanisation ; modélisation ; industrie agroalimentaire.*

---

## Abstract

This experimental study carried out on the scale laboratory and reveals the main results of the anaerobic digestion of the effluents from food industry. In this study, it consists of a mixture of apricot and orange juice. The parameters that affect directly the fermentation process have been monitored, such as: growth, chemical oxygen demand (COD), pH. The cumulative biogas volume found was about 23055NmL, it was reached after 552 h of digestion in acid medium. In such case, the degradation of the organic matter reached about 60%. Furthermore, the methane content was measured using a (GC/MS), it was found to be of the order of 71%. The kinetics of biogas production was modeled with the modified Gompertz model. A good agreement between this model and the experimental data was obtained.

*Keywords: Biogas, anaerobic digestion, digester, methanisation, modelization, food industry.*

---

## Abréviations :

APHA : Association américaine de la santé (American Public Health Association)

B(t) : Production cumulée de biogaz (NmL)

DBO<sub>5</sub> : Demande Biologique en Oxygène (g/L)

DCO ; Demande Chimique en Oxygène (g/L)

GES : Gaz à effet de serre

MS : Matière Sèche

MV : Matière Volatile

P : Potentiel ultime de biogaz (NmL)

R<sup>2</sup> : Coefficient de corrélation

R<sub>max</sub> : Vitesse maximale de production de biogaz (NmL.h<sup>-1</sup>)

t : temps (h)

λ : Temps de latence (h)

μ : Vitesse spécifique maximale de croissance (h<sup>-1</sup>)

## 1. Introduction

L'incroyable explosion démographique, l'expansion des villes, et l'industrialisation que nous connaissons ces dernières années, ont généré des rejets de toute sorte dans le milieu naturel, et par conséquent, une pollution de plus en plus accrue ainsi que les odeurs induites. Par ailleurs, tous les moyens de transport que ce soit terrestres ou maritimes ou aérospatiaux sont principalement basés sur l'utilisation de carburants fossiles. Ces dernières années, l'Algérie a connu une demande accrue en carburants dans le secteur des transports. Ce secteur reste une source importante d'émissions de gaz à effet de serre (GES), ce qui pourrait

engendrer des bouleversements climatiques. Sans omettre que les réserves de combustibles fossiles ne soient pas infinies, ce qui a suscité les chercheurs à une prise de conscience universelle d'une part, pour une meilleure protection de l'environnement et d'autre part, pour une meilleure conservation des ressources naturelles (biodiversité). En effet, les recherches se sont de plus en plus axées sur le développement de filières de production d'énergies propres, renouvelables et durables, ce qui permet de fournir de l'énergie tout en diminuant l'impact environnemental. De façon générale, de nombreuses activités industrielles génèrent des effluents et des résidus solides qui nécessitent des traitements biologiques. Certaines industries génèrent des résidus avec une forte teneur en matière organique, notamment les industries issues de l'agroalimentaire [1]. Leurs traitements nécessitent le développement de nouvelles techniques, parmi celles-ci, la digestion anaérobie ou la méthanisation, qui reste un bon candidat pour la conversion biologique des déchets en énergie propre.

En 2006, Kaparaju et Rintala [2], ont montré que la digestion anaérobie des rejets d'orange a permis de produire jusqu'à  $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ MV}$ . Selon ces auteurs, 1 tonne de déchets d'orange produit jusqu'à  $60 \text{ m}^3$  de méthane. La charge organique qui a conduit aux meilleurs rendements a varié dans la gamme de 2,8 à  $4,2 \text{ kg MV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{j}^{-1}$ . Au-delà d'une charge de  $5,6 \text{ kg MV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{j}^{-1}$ , ils ont constaté que les méthanogènes sont inhibés, ceci est due à l'accumulation des acides gras volatils. Koupaie *et al.* 2014 [3] ont étudié la co-digestion de jus industriels, les expériences ont été menées en mode mésophile et dans 20 bouteilles chacune de volume 160 mL. Les rendements atteints variaient entre 308,34 et  $890,90 \text{ mL/g.MV}$ . Ces auteurs ont trouvé que la cinétique de dégradation anaérobie de la matière volatile était du pseudo-premier ordre.

Parawira *et al.* 2005 [4] ont étudié la co-digestion des déchets de pommes de terre et des feuilles de betteraves. L'étude a été menée dans des erlenmeyers de volume de 0,5 L, et en mode mésophile ( $37^\circ\text{C}$ ). Selon ces auteurs, la combinaison des deux types de déchets a permis d'améliorer la production de méthane jusqu'à 62% par comparaison à la production obtenue en utilisant uniquement le substrat de pommes de terre.

Il est à souligner que la méthanisation fait intervenir des bactéries qui vivent en anaérobiose et qui transforment les fractions fermentescibles en biogaz. Ce dernier possède des caractéristiques énergétiques très intéressantes, c'est pour cela, il peut être injecté dans le réseau de gaz naturel mais

dans ce cas, il nécessite une épuration au préalable. Principalement le biogaz est composé de méthane et de dioxyde de carbone. Dans un contexte de développement durable et de réduction des gaz à effet de serre, les énergies renouvelables telles que la méthanisation des déchets apparaît comme solution prometteuse en Algérie.

L'objectif de ce travail consiste à valoriser d'une façon énergétique des effluents issus de l'industrie agroalimentaire de la région du centre d'Alger via la méthanisation. Pour cela, les expérimentations ont été menées en batch dans un digesteur cylindrique à pH libre et une température en mode mésophile ( $38^\circ\text{C}$ ).

## 2. Modèle de Gompertz

La courbe de production de biogaz a été modélisée en utilisant l'équation de Gompertz modifiée [5]. Cette équation (1) a été utilisée afin d'analyser la production cumulée de biogaz.

$$B(t) = P \cdot \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{R_m \cdot e}{P} (\lambda - t) + I \right] \right\} \quad (1)$$

où:

$B(t)$  représente la production cumulée de biogaz (NmL) en fonction du temps  $t$  (h) ;

$\lambda$ , le temps de latence (h) ;

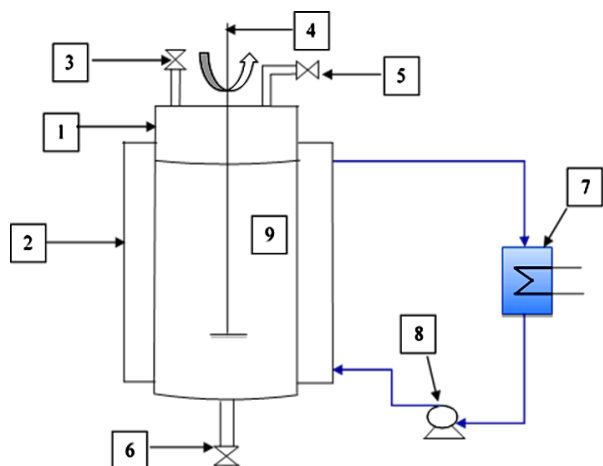
$P$ , le potentiel ultime de biogaz (NmL) ;

$R_{max}$ , la vitesse maximale de production de biogaz en ( $\text{NmL} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

## 3. Matériels et méthodes

Le digesteur conçu dans le cadre de ce travail est un bioréacteur de forme cylindrique en acier inoxydable à double enveloppe d'une capacité de 5 litres, sa hauteur est de 0,355 m avec un diamètre interne de 0,15 m, il est muni d'une bride en acier inoxydable (figure 1). Le réacteur est entouré d'une chemise thermostatée à circulation d'eau. Le biogaz produit est stocké et quantifié dans une colonne graduée à l'aide d'un système de déplacement d'eau. Des prélèvements quotidiens ont été effectués via une vanne placée au bas du bioréacteur. Le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre de type INOLAB. La demande chimique en oxygène (DCO) a été mesurée selon la méthode décrite par Wolf & Nordmann [6]. La composition du biogaz est déterminée par chromatographie en phase gazeuse de type Perkin Elmer 600 couplé à une spectrométrie de masse de type Perkin Elmer 600C (GC/MS). La séparation des gaz

s'est faite à l'aide d'une colonne de type Rtx®-VMS d'une longueur de 60m et d'un diamètre de 250 $\mu$ m, le gaz vecteur utilisé est l'hélium avec un débit de 1mL/min, la température du four est de 40°C avec une rampe de 3°C/min jusqu'à 180°C. La température de l'injecteur et de détecteur est de 180°C. Le volume d'injection est de 4mL. Le comptage des cellules par unité de volume se fait au moyen de la cellule de Mallassez et au microscope optique de marque NAHITA.



1. Digesteur 2. Enveloppe 3. Vanne de régulation 4. Mobile d'agitateur 5. Sortie de biogaz 6. Vanne de prise d'échantillon 7. Bain thermostaté 8. Pompe 9. Substrat

Figure 1. Description du dispositif expérimental [1]

#### 4. Caractéristiques du substrat

En méthanisation biologique, l'utilisation d'un effluent d'origine organique est favorable pour les micro-organismes durant l'opération de fermentation. Les expérimentations ont été menées en utilisant un substrat issu de l'industrie agroalimentaire, c'est un effluent composé de jus d'orange et de jus d'abricot. Les différentes analyses ont été basées sur les tests suivants :

La demande chimique en oxygène a été réalisée par la méthode au bichromate de potassium selon la norme AFNOR T90-101. La demande biologique en oxygène a été réalisée en déterminant la quantité d'oxygène dissous et est consommée par les microorganismes à l'obscurité, à 20°C pendant 5 jours. La méthode utilisée pour la mesure des sucres totaux est une méthode standard proposée par Dubois *et al.* (1956) [7] décrite par Herbert *et al.* (1971) [8]. C'est une méthode spectrophotométrique dans le visible. L'absorbance est lue à une longueur d'onde de 490 nm. La concentration en  $\text{NH}_4^+$  est déterminée par une méthode

standard (APHA. 1998) [9]. C'est une méthode spectrophotométrique dans le visible. L'absorbance est lue à une longueur d'onde de 420 nm. Afin de déterminer la teneur en matière sèche, un volume d'échantillon liquide est versé dans une capsule préalablement tarée, puis placée dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. La différence entre les deux pesées permet d'obtenir la matière sèche. Les caractéristiques de l'effluent sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 :

Caractéristiques du substrat

Caractéristiques	Valeurs
pH	2,90 $\pm$ 0,01
DCO (g/L)	550 $\pm$ 10
DBO <sub>5</sub> (g/L)	179,0 $\pm$ 4,3
Sucres totaux (g/L)	121,9 $\pm$ 0,1
Matière sèche (g/L)	114,00 $\pm$ 1,26
Azote ammoniacal (g/L)	1,02 $\pm$ 0,20

#### 5. Résultats et discussion

##### 5.1. Production volumique de biogaz

Le volume de biogaz est un paramètre important pour le contrôle et la surveillance du processus de la digestion anaérobie. En effet, une production conséquente de biogaz reflète à la fois la stabilité et le bon fonctionnement du digesteur. La figure 2 illustre la production cumulée de biogaz pour une durée de 552 heures. Le volume de biogaz récupéré est de 23055NmL et qui se stabilise après environ 400 heures de fermentation. Le volume produit est intéressant comparativement à la charge organique introduite dans le digesteur qui est de 550g/L. Nous remarquons que la cinétique de production de biogaz se subdivise en trois principales phases :

- Phase de latence  
Cette phase correspond à l'adaptation des microorganismes libres contenus dans le substrat à leur milieu. La durée de cette phase est très courte (<100 heures). Parmi les avantages de la digestion anaérobie des effluents liquides est leur rapide dégradation [10].
- Phase exponentielle  
Durant cette phase, la multiplication des microorganismes est optimale, ce qui conduit à une

production optimale de biogaz après 300 heures de fermentation, la production de biogaz a atteint 22760NmL.

• Phase de plateau

Durant cette phase, la biomasse synthétisée se stabilise ce qui correspond à la phase stationnaire de la production de biogaz, la stabilité est atteinte après 400 heures de fermentation.

Notons que le pH du milieu est très acide, il fluctue entre 2.81 et 3.15. Jain et Mattiasson [11] ont constaté que la production de méthane était fortement ralentie mais pas stoppée à des pH aussi bas que 4. Dans ce cas, les bactéries méthanogènes présentes dans le milieu possèdent une bonne tolérance au pH. Un bon accord est observé entre le modèle de Gompertz modifié et les données expérimentales, les paramètres de ce modèle sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres cinétiques du modèle de Gompertz

Volume (NmL)	P (NmL)	R <sub>max</sub> (NmL.h <sup>-1</sup> )	λ (h)	R <sup>2</sup>
23055 ± 4,35	23055 ± 4,35	111,10	89,51	0,9958

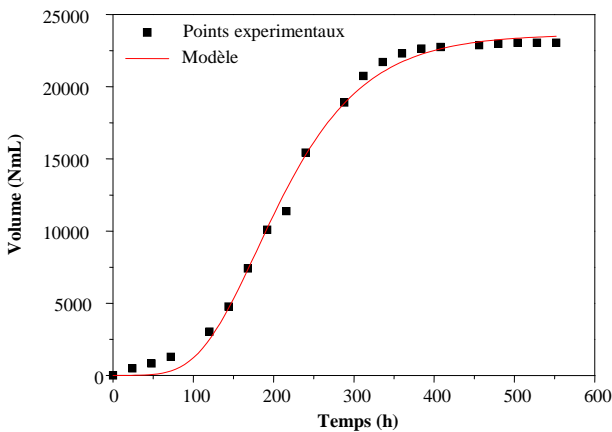


Figure 2. Production cumulée de biogaz

5.2. Analyse de la composition de biogaz

L'analyse effectuée par chromatographie couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS) à la fin de l'étape méthanogénèse a permis d'obtenir le chromatogramme donné sur la figure 3. Nous avons identifié les composés gazeux contenus dans le biogaz selon leur temps de rétention. Les constituants du biogaz sont les suivants : le méthane (71,37%), le dioxyde de carbone (11,72%) et le sulfure d'hydrogène (16,83%). Ces résultats montrent clairement la prédominance du méthane, ce qui confère à

notre biogaz le caractère combustible avec des pourcentages du même ordre de grandeur que ceux donnés dans la littérature [12]. Llana Coalla *et al.* [13] ont trouvé que le biogaz produit à partir de la pulpe de pomme présentait une proportion assez importante en méthane et qui variait entre 77% et 80%.

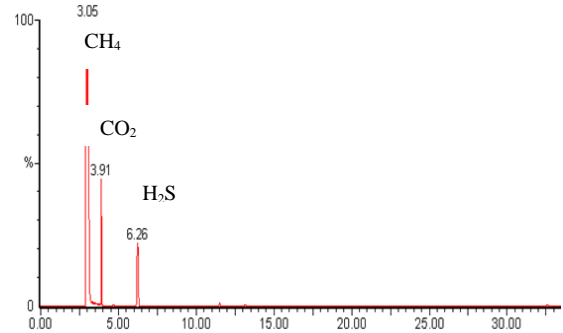


Figure 3. Chromatogramme de biogaz de l'effluent orange-abricot

5.3. Evolution de pH

Le pH est la conséquence d'un certain nombre de paramètres et de processus d'ordre biologique, chimique ou physique [14]. Sa variation dépend principalement des différentes réactions biochimiques impliquées dans la digestion anaérobie, telles que l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. La figure 4 représente l'évolution temporelle du pH. Nous remarquons une légère diminution dans le pH du milieu due à la formation des acides gras volatils qui ont conduit à l'acidification du milieu [15], il reste dans une gamme de valeurs comprises entre 2,81 et 3,15. Ces valeurs dépendent de la nature du substrat et du type de traitement utilisé. Toutefois, la méthanisation peut se produire dans des milieux acides ou alcalins [16].

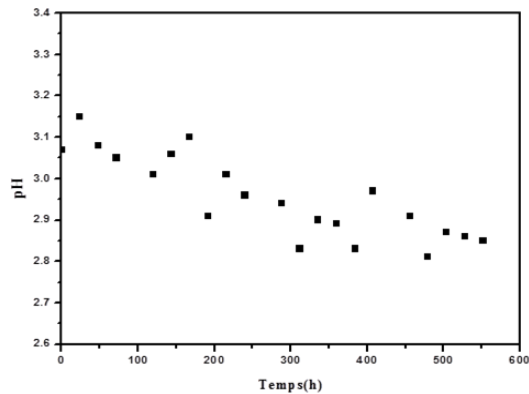


Figure 4. Evolution temporelle de pH

#### 5.4. Croissance des microorganismes

La figure 5 illustre l'évolution temporelle de la concentration cellulaire. Nous remarquons que la courbe de croissance cellulaire est caractérisée, comme celle de nombreux microorganismes, par les phases classiques : une phase de latence, une phase d'accélération, une phase exponentielle, une phase stationnaire et une phase de déclin [17]. Nous remarquons que la phase de latence des microorganismes est atteinte après 72 heures de fermentation. La durée de la phase exponentielle est de 200 heures, avec une vitesse spécifique maximale de croissance ( $\mu$ ) de l'ordre de  $0,0030h^{-1}$ , cette vitesse dépend des espèces bactériennes impliquées dans le digesteur et des conditions opératoires appliquées. Notons que ces différentes phases sont identiques à celles de la production de biogaz. Notons aussi que l'acidité du milieu n'a pas conduit à l'inhibition de la croissance des micro-organismes, ceci est en accord avec les observations de Björnsson [18]. Selon cet auteur, les bactéries fermentatives peuvent se multiplier en milieu acide. La concentration cellulaire maximale atteinte au sein du digesteur est de l'ordre de  $7,10 \cdot 10^7$  cellules/mL.

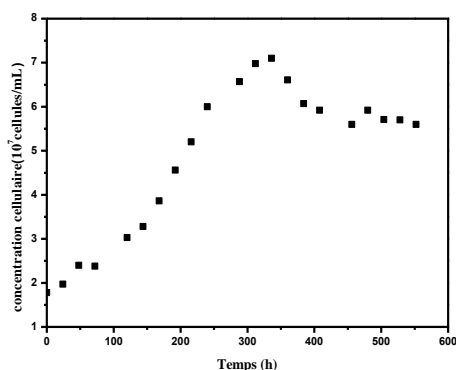


Figure 5. Evolution temporelle de la concentration cellulaire

#### 5.5. Demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène est une mesure indirecte de la concentration en matière organique, utilisée surtout pour les effluents liquides. La figure 6 montre l'évolution temporelle de la demande chimique en oxygène du substrat orange-abricot dont la charge organique initiale est de 550g/L. Malgré l'acidité du milieu, nous obtenons une diminution de la charge organique jusqu'à une valeur de 220g/L. Dans ce cas, le taux d'abattement est de 60%. Ce résultat reste inférieur à celui obtenu par (Zhang et al. 2005) [19] qui ont obtenu un taux d'élimination de la charge organique de l'ordre de 82% dans le cas de la digestion anaérobie des déchets de cuisine avec un pH neutre. La dégradation de la matière organique est reliée

directement à la croissance et à l'activité des micro-organismes responsables de la digestion anaérobie.

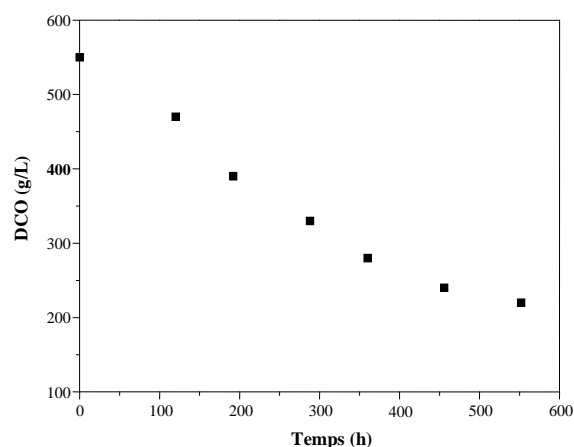


Figure 6 : Evolution temporelle de la demande chimique en oxygène

## 6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce travail, les principaux résultats relatifs à l'étude du processus de la digestion anaérobie des effluents de l'industrie agroalimentaire. Nous avons tiré certaines conclusions. L'acidité du milieu n'a pas conduit à l'arrêt du processus de méthanisation.

Par ailleurs, le volume total récupéré après une fermentation de 552 heures en milieu acide est de 23055NmL, qui reste intéressant comparativement à la charge introduite dans le réacteur. La dégradation de la matière organique a conduit à un taux d'abattement de 60%.

L'azote à faible concentration dans le substrat nécessite l'enrichissement du milieu de fermentation par cette source afin d'atteindre des conditions de fermentation optimales.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Thématique de Recherche en Science et Technologie (ATRST) pour son soutien financier ainsi que la société "Nouvelle Conserverie Algérienne" (NCA) pour l'approvisionnement en produits jus.

## References

- [1] S. Zerrouki, R. Rihani, F. Bentahar, K. Belkacemi. Anaerobic digestion of wastewater from the fruit juice industry: experiments and modeling. *Water Science & Technology*. 72.1, 123-134, 2015.

- 
- [2] P.L.N. Kaparaju, J.A Rintala. Thermophilic Anaerobic Digestion of Industrial Orange Waste. *Environmental Technology* 27 (6), 623-633. 2006.
- [3] E. H. Koupaie, M. B. Leiva, C. Eskicioglu, C. Dutil. Mesophilic batch anaerobic co-digestion of fruit-juice industrial waste and municipal waste sludge: Process and cost-benefit analysis. *Bioresource Technology* 152, 66-73. 2014.
- [4] W. Parawira, M. Murto, J. Read, B. Mattiasson. Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste. *Process Biochemistry* 40 (9), 2945-2952. 2005.
- [5] Lay J.J., Lee Y.J., Noike T. 1999 Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. *Water Research* 33 (11), 2579-2586.
- [6] V. Wolf, W. Nordmann, A field method for COD analysis in wastewater. *Korespondenz Abwasser* 24, 277-279. 1977.
- [7] M. Dubois, K.A Gilles, J.K. Hamilton, P.A. Rebers, F. Smith. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry* 28 (3), 350-356.1956.
- [8] D. Herbert, P.J Phipps, R.E Strange. Chemical analysis of microbial cells. *Methods in microbiology*, 5(Part B), 209-344.1971
- [9] APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th ed. American Public Health Association, Washington, D.C. 1998.
- [10] S. Sung, R. Dague, Laboratory studies on the anaerobic sequencing batch reactor. *Water Environment Research*. 67, 294-301, 1995.
- [11] S. Jain, B. Mattiasson, Acclimatization of methanogenic consortia for low pH biomethanation process. *Biotechnology Letters*. 20, 771-775,1998.
- [12] P. Elaiyaraju, N. Partha, Biogas production from co-digestion of orange peel waste and jatropha de-oiled cake in an anaerobic batch reactor. *African Journal of Biotechnology*. 11, 3339-3345, 2012.
- [13] H. L. Coalla, J.M Blanco Fernández, M.A. Moris Morán, M.R. López Bobo, Biogas generation apple pulp. *Bioresource Technology*. 100, 3843-3847, 2009.
- [14] M. Rouez, « *Dégradation anaérobie de déchets solides : Caractérisation, facteurs d'influence et modélisations* ».Thèse de doctorat. INSA Lyon. 2008.
- [15] B.Budiyono, I. Syaichurrozi, S. Sumardiono. Biogas production from bioethanol waste: the effect of pH and urea addition to biogas production rate. *Waste Technology*. 1, 1-5, 2013.
- [16] D. R. Boone, S. Worakit, I. M. Mathrani, R. A. Mah. Alkaliphilic methanogens from high-pH lake sediments. *Systematic and applied microbiology*. 7, 230-234, 1986.
- [17] S.T.Abedon. *Bacteriophage ecology*. Cambridge University Press. 2008.
- [18] L. Björnsson. Intensification of the biogas process by improved process monitoring and biomass retention. *Ph.D. dissertation*, Department of Biotechnology, Lund University, Sweden. 2000.
- [19] B. Zhang, L. Zhang, S. Zhang, H. Shi, W. Cai. The influence of pH on hydrolysis and acidogenesis of kitchen wastes in two-phase anaerobic digestion. *Environmental Technology* 26 (3), 329-340. 2005.
-