

## MODELISATION D'UN PROCÉDE BIOLOGIQUE DE TRAITEMENT DES DECHETS SOLIDES POUR LA PRODUCTION DE L'ENERGIE ET LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Reçu le 06/11/2006 – Accepté le 10/06/2008

### Résumé

Cette étude porte sur la modélisation de la digestion anaérobie des déchets solides biodégradables, dans un réacteur complètement agité sans retour. A travers cette modélisation, l'évolution en fonction du temps, des différents paramètres tels que la concentration du substrat, celle des acides gras volatils et des acides simples ainsi que la production du méthane, ont été examinées. L'influence de la température sur ces paramètres cités ci-dessus a aussi été considérée ainsi que celle de la concentration du substrat, à l'entrée, sur l'évolution de la concentration des acides gras volatils, des acides simples et du méthane.

Concernant la variation de la concentration des différents paramètres (substrat initial biodégradable et soluble, acides gras volatils, acides simples et méthane), en fonction du temps de séjour à des températures différentes (T=15, 35 et 60°C), les résultats obtenus sont qualitativement conformes avec ceux rapportés dans la littérature. Concernant l'étude de l'influence de la température, les différents cas suivants ont été constatés:

**1<sup>ème</sup> cas :** concernant la production du méthane, l'élévation de la température influe positivement sur certaines étapes de la digestion anaérobie, donc elle peut accélérer le phénomène de digestion dans le cadre générale ;

**2<sup>ème</sup> cas :** concernant le substrat à l'entrée, l'augmentation de la température influe positivement sur la vitesse de dégradation du substrat ;

**3<sup>ème</sup> cas :** concernant la production des acides gras volatils, l'influence de l'élévation de la température sur la cinétique de production des acides gras, ne semble pas régulière ;

**4<sup>ème</sup> cas :** concernant la production des acides simples, l'élévation de la température influe favorablement sur la cinétique de production des acides simples.

Finalement, l'étude de l'influence de la concentration du substrat, sur la production des acides gras volatils, des acides simples et du méthane, a montré que généralement l'augmentation de la concentration du substrat à l'entrée engendre une augmentation considérable sur la cinétique et la concentration de formation des différents éléments cités ci-dessus.

**Mots clés :** Modélisation, Energie renouvelable, déchets solide, digestion anaérobie

### Abstract

The present study considered anaerobic digestion modelling of biodegradable solid waste in a completely mixed reactor. The resulting model was used to simulate the variation of substrate, acids in their different forms either simple or volatiles concentrations with time as well as methane production. Moreover, the effect of temperature on these parameters was examined. Furthermore, the influence of substrate concentration at the influent on the variation of the concentrations of acids and methane.

Concerning the variation of the concentration of different parameters with hydraulic retention time at different temperatures (T=15, 35 and 60°C), the obtained results are qualitatively similar to the ones presented in the literature. As for the influence of temperature, the findings are as follows:

An increase in temperature resulted in acceleration of anaerobic digestion; as well as a positive effect on substrate degradation rate. However, the effect on the production kinetics of acids was irregular. Contrarily, the production of simple acids was favoured.

It was found, as well, that, generally, an increase in influent substrate concentration resulted in a considerable increase of the production kinetics, therefore an increase as well of the concentration the different formation products, mentioned above.

**Keywords :** Modeling, Renewable Energy, Solid Waste, Biogas, Anaerobic Digestion.

K. DERBAL  
M. BENCHEIKH  
LEHOCINE  
A.H. MENIAI  
A. KHALFAOUI

Laboratoire de l'Ingénierie des  
Procédés de l'Environnement  
Département de Chimie  
Industrielle  
Faculté des Sciences de  
l'Ingénieur - Université  
Mentouri Constantine -  
Algérie

### ملخص

إن هذه الدراسة تتوقف على برمجة التحلل اللاهوائي للبقايا الصلبة القابلة للتحلل بيولوجيا، في مفاعل تام الخلط بدون رسكلة. من خلال هذه البرمجة، عولجت مختلف التغيرات بدلالة الزمن، لبعض العوامل مثل تركيز الأرضية، تركيز الأحماض الدهنية المتطايرة، الأحماض البسيطة و كذلك إنتاج غاز الميثان. تأثير درجة الحرارة على هذه العوامل، قد أخذ بعين الاعتبار أيضا، وكذلك تأثير التركيز الابتدائي للأرضية (عند المدخل).

فيما يخص التغير في تركيز مختلف العوامل (الأرضية الابتدائية القابلة للتحلل البيولوجي، الأحماض الدهنية المتطايرة، الأحماض البسيطة و غاز الميثان) بدلالة زمن المكوث في المفاعل، تحت درجات حرارة مختلفة (15, 35, 60°C)، النتائج المتحصل عليها تعتبر من الناحية النوعية مطابقة لتلك الموجودة نظريا في الكتب. فيما يخص تأثير درجة الحرارة، هناك حالات مختلفات والتي يمكن تلخيصها فيما يلي :

**الحالة الأولى :** فيما يخص إنتاج غاز الميثان، ارتفاع درجة الحرارة يؤثر إيجابيا على بعض مراحل التحلل اللاهوائي، إذن، وبصفة عامة، فهي تسرع في هذه الظاهرة.

**الحالة الثانية :** فيما يخص التركيز الابتدائي للأرضية (عند المدخل)، نجد أيضا أن ارتفاع درجة الحرارة يزيد في سرعة تحلل الأرضية.

**الحالة الثالثة :** فيما يخص إنتاج الأحماض الدهنية المتطايرة، تأثير ارتفاع درجة الحرارة على حركية إنتاج الأحماض الدهنية لا يبدو منتظما.

**الحالة الرابعة :** فيما يخص إنتاج الأحماض البسيطة، ارتفاع درجة الحرارة يؤثر جيدا على حركية إنتاج هذه الأحماض.

أخيرا، من خلال دراسة تأثير التركيز الابتدائي للأرضية على إنتاج، الأحماض الدهنية المتطايرة، الأحماض البسيطة و كذا غاز الميثان، تبين بصفة عامة، أن ارتفاع تركيز الأرضية عند المدخل، يولد ارتفاعا محسوسا في حركية و تركيز إنتاج مختلف العناصر المذكورة سابقا.

**الكلمات المفتاحية :** برمجة طاقات متجددة فضلات صلبة هضم لاهوائي.

Généralement, la digestion anaérobie est un procédé de traitement biologique de déchets solides biodégradables qui repose sur les quatre étapes suivantes: l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse [1]. Plusieurs études dans cet axe ont été présentées, où certaines s'intéressent à l'étude de l'influence de la vitesse d'agitation [2], par contre d'autres sont surtout concernées par l'influence de la température et du pH sur le procédé de digestion [3], sur la nature elle-même du déchets (boues de vaches [4], boues de station de traitement des eaux [5], rejets industrielles et déchets ménagères [6], etc.), ou sur le suivi expérimental de l'évolution de certains paramètres tels que la concentration des matières en suspensions (MES), le *da* demande chimique en oxygène (DCO) ainsi que le volume du biogaz produit [7].

D'autres, en plus du suivi des MES, la DCO et du volume du biogaz, elles prennent en considération aussi l'évolution de la concentration des acides gras volatils et simples, durant le déroulement du processus [8]. D'autres s'intéressent à l'influence de la concentration du substrat à l'entrée du réacteur biologique [9].

L'objectif principal de cette étude, est de modéliser le procédé de digestion anaérobie, tout en examinant l'évolution avec le temps de certains paramètres tels que la concentration du substrat et des acides gras, des acides simples et la production du méthane, etc. L'influence de la température sur la production du méthane, des acides gras et simples, ainsi que celle de la concentration du substrat à l'entrée sur leur concentration, sont aussi examinées.

## 1. DESCRIPTION DU PROCÉDE DE DIGESTION ANAÉROBIE

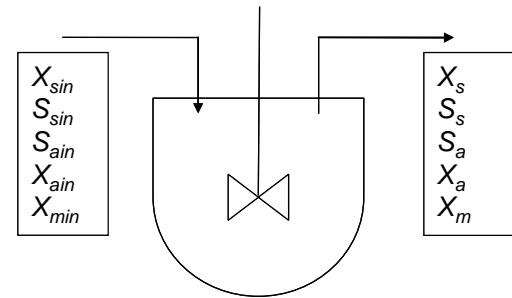
La digestion anaérobie est une méthode biologique de stabilisation des boues riches en matière organique biodégradable. Elle se déroule naturellement en anaérobiose, dans les milieux pauvres en sulfates et nitrates et de faible potentiel redox. Son déroulement est l'œuvre d'un véritable écosystème microbien qui possède ses propres régulations. Les micro-organismes responsables, transforment la matière organique en biogaz riche en méthane (65-70%) et utilisable comme source d'énergie plus l'humus qui peut être valorisable en agriculture par l'ajout des éléments nécessaires.

Cette opération renferme en générale quatre étapes qui sont l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Le schéma de principe de la digestion anaérobie et représenté sur la figure 1 [10]. La digestion anaérobie est utilisée principalement

comme un moyen efficace d'abattement de la charge organique polluante biodégradable.

### 1.1. Principe de procédé de digestion anaérobie

Le principe général consiste à introduire le produit (les déchets solides) dans un digesteur fermé où sont maintenues des conditions de température, d'agitation et de temps de séjour favorables au développement de la biomasse active.



**Figure 1** : Digesteur anaérobie

#### • Le temps de séjour

Celui-ci varie de quelques heures à quelques mois. Il est typiquement de l'ordre de 2 à 4 semaines pour les produits tels que les boues, les lisiers, les déchets solides, contre quelques jours pour les effluents industriels facilement biodégradables.

#### • La température

Les digesteurs mésophiles (plage autour de 37°C) sont les plus utilisés, constituant la solution classique.

Les digesteurs thermophiles (55°C) offrent en principe des cinétiques plus rapides. Ils sont employés comme mode d'hygiénisation, à titre d'exemple les digesteurs utilisés au Danemark sur lisiers.

Les digesteurs psychrophiles (25°C) sont employés sur certains effluents industriels chauds et facilement biodégradables.

#### • La circulation du substrat et le mode de brassage

La voie classique est le totalement agité pour les produits de type boues et lisiers. Les effluents sont brassés de façon mécanique ou par injection de gaz. Les digesteurs d'effluents liquides des industries sont le plus souvent des digesteurs à supports de biomasse, soit fixes, soit en suspension (lit fluidisé). Le support peut être la biomasse elle-même, sous forme granuleuse : ce sont les digesteurs à lit de boues (UASB : Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket), qui représentent la majorité des digesteurs installés sur effluents industriels en Europe.

Signalons également les digesteurs de type piston, utilisés pour des produits à forte siccité (déchets ménagers organiques), les digesteurs agités « batch »

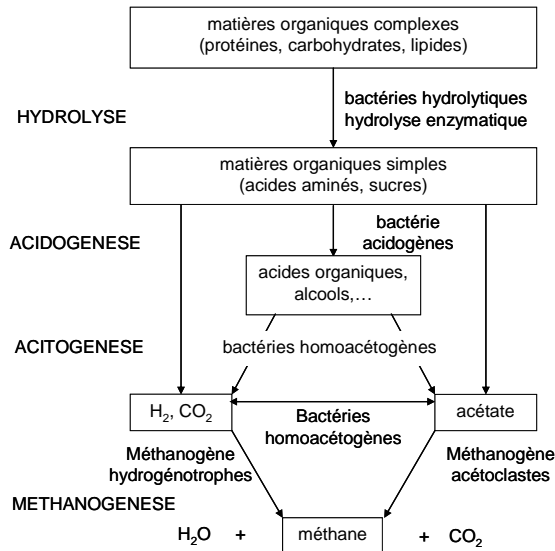
à alimentation séquentielle. Qui sont utilisés pour le traitement d'effluents de petites unités. Industrielles.

Il existe également de nombreuses variantes, liées à la recirculation des populations microbiologiques présentes dans les boues récupérées en sortie de digesteur.

**NB** : Dans cette étude il a été considéré que les déchets solides sont des déchets ménagers qui se composent principalement de restes de cuisine, d'alimentation etc. Et qui sont de natures organiques facilement biodégradables.

## 2. BILANS MASSIQUES DANS LE DIGESTEUR ANAEROBIE

Le procédé de digestion anaérobie pour le traitement des déchets biodégradables, a lieu dans un réacteur complètement agité sans retour, comme schématisé par la figure 2.



**Figure 2** : Schéma de principe de la digestion anaérobie

Sa modélisation tient compte de la cinétique des différentes étapes citées ci-dessus, et est basée sur l'écriture des bilans massiques correspondants [1], dont les expressions mathématiques sont montrées dans les sections suivantes.

### Hydrolyse du substrat biodégradable, $X_s$

$$\frac{dX_s}{dt} = \frac{1}{t_s} (X_{s\text{in}} - X_s) - K_h X_a X_s + (b_a X + b_m X_m) \quad (1)$$

### Hydrolyse du substrat soluble biodégradable, $S_s$

$$\frac{dS_s}{dt} = \frac{1}{t_s} (S_{s\text{in}} - S_s) + K_h X_a X_s - K_a X_a S_s \quad (2)$$

### Acides gras volatils, $S_a$

$$\frac{dS_a}{dt} = \frac{1}{t_s} (S_{a\text{in}} - S_a) - K_m X_m S_a + (1-Y) K_a X_a S_s \quad (3)$$

### Acides simples formés, $X_a$

$$\frac{dX_a}{dt} = \frac{1}{t_s} (X_{a\text{in}} - X_a) - Y_a K_a X_a S_s - b_a X_m \quad (4)$$

### Production du méthane, $X_m$

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{1}{t_s} (X_{m\text{in}} - X_m) - Y_m K_m X_m S_a - b_m X_m \quad (5)$$

- $b_a$  : Coefficient de diminutions des acides formés ( $d^{-1}$ )
- $b_m$  : Coefficient de dégradations des méthanogènes ( $d^{-1}$ )
- $K_a$  : Constante de taux de production des acides ( $l/mg/d$ )
- $K_h$  : Constante de taux d'hydrolyse ( $l/mg/d$ )
- $K_m$  : Constante de formation du méthane ( $l/mg/d$ )
- $S_a$  : Acides gras volatils COD ( $mg/l$ )
- $S_s$  : DCO soluble biodégradable ( $mg/l$ )
- $X_s$  : DCO particulaire biodégradable ( $mg/l$ )
- $X_a$  : Acides formés comme DCO ( $mg/l$ )
- $X_m$  : Méthanogène comme DCO ( $mg/l$ )
- $X_v$  : Solides volatils total en suspension « VSS » ( $mg/l$ )
- $Y_a$  : Rendement des acides formés exprimés en DCO ( $G_{cod}/G_{cod}$ )
- $Y_m$  : Rendement de méthanogène exprimé en DCO ( $G_{cod}/G_{cod}$ )
- $t_s$  : Temps (d)
- in : influent

## 3. METHODE DE RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATION OBTENU

La résolution simultanée des équations différentielles, ci-dessus, est accomplie utilisant la méthode numérique de Runge Kutta de quatrième ordre [11]. Le code de calcul élaboré a permis l'estimation de la variation des différents paramètres caractérisant chaque étape du procédé de digestion anaérobie, dans le réacteur.

Cette méthode a été développée pour les systèmes d'équation différentielles elle est utilisée d'une manière à produire la même précision que les polynômes de Taylor. La simplicité de cette méthode la rendue très populaire

Cette méthode doit être appliquée sur le système d'équations différentielle qui représente les différentes étapes de la digestion anaérobie tels que : l'hydrolyse,

l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse et qui sont regroupé dans le tableau 1.

**Tableau 1** : Cinétique et Stœchiométrie du procédé de digestion anaérobie [1]

Composent I	1	2	3	4	5	6	7	Vitesse du procédé
Procédé j	Si	Ss	Xi	Xs	Sa	Xa	Xm	$\rho_j$
Hydrolyse		1		-1				$K_h * X_a * X_s$
Croissance d'acides formés		-1			1-y <sub>a</sub>	y <sub>a</sub>		$K_a * X_a * S_s$
Croissance du méthane formé					-1		y <sub>m</sub>	$K_m * X_m * S_a$
Diminution d'acides formés				1		-1		$b_a * X_a$
Diminution du méthane				1			-1	$b_m * X_m$

- Le tableau 1 : montre sous forme matricielle les interactions entre les différents paramètres, la stœchiométrie et la cinétique pour chaque étape du procédé de digestion anaérobie, tel que : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse.

La cinétique de l'apparition ou de la disparition de chaque espèce est donnée par l'expression suivante:

$$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j \quad (6)$$

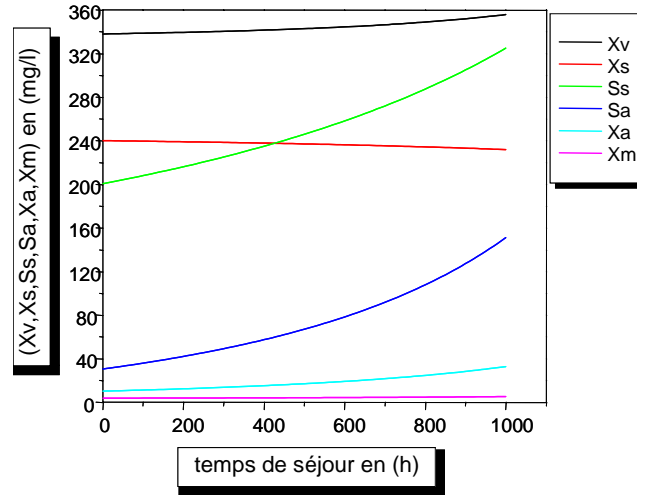
### 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette étude nous a permis en premier lieu d'avoir la variation des différents paramètres durant le déroulement du processus de digestion anaérobie, plus l'influence de quelques paramètres sur ce dernier, comme le montre les résultats de la modélisation suivants:

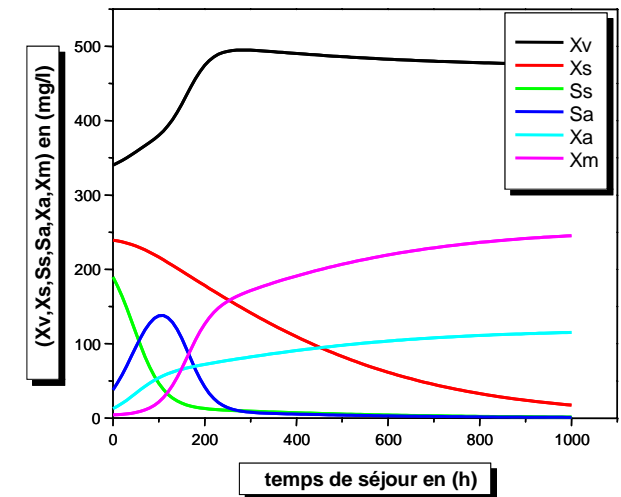
#### 5.1 Variations des différents paramètres en fonction du temps et de la température

Les variations en fonction du temps de séjour des concentrations du substrat initial biodégradable et soluble, des acides gras volatiles, des acides simples et du méthane, à des températures différentes de 15, 35 et 60°C, sont montrées dans les figures 3, 4 & 5. Il peut être noté que qualitativement, les résultats obtenus sont en agrément avec ceux rapportés dans la littérature [8].

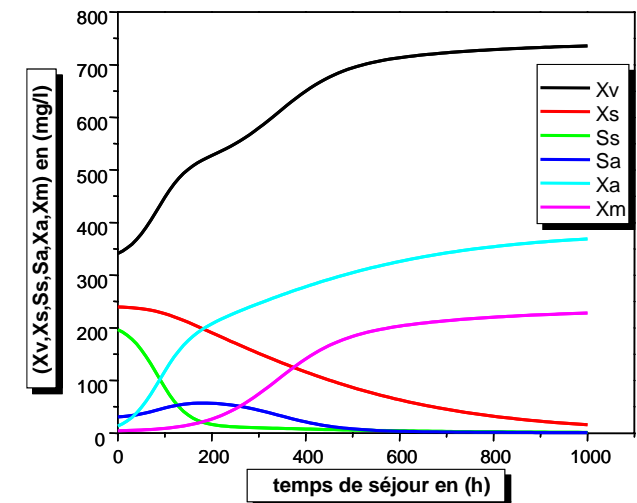
Durant la première étape d'hydrolyse du substrat, une diminution de la concentration du substrat en fonction du temps, a lieu, en accord avec la théorie.



**Figure 3** : Variation des différents paramètres durant la digestion anaérobie à T = 15°C

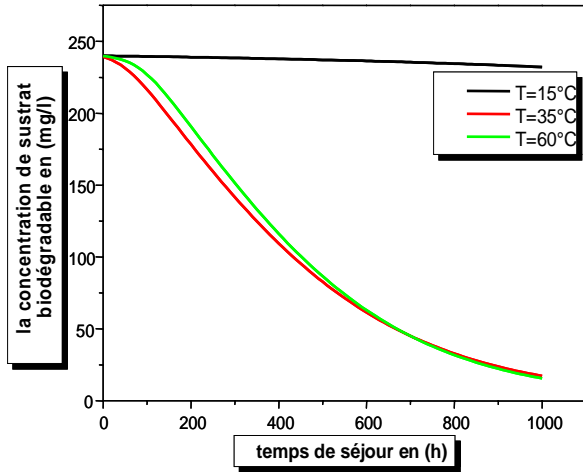


**Figure 4** : Variation des différents paramètres durant la digestion anaérobie à T = 35°C



**Figure 5** : Variation des différents paramètres durant la digestion anaérobie à T = 60°C

L'étape de l'acidogène caractérisée par la production des acides gras volatiles, a montré une augmentation de la concentration suivie d'une diminution. Ceci peut être expliqué par la conversion d'une certaine proportion d'acides gras en acides simples.



**Figure 6 :** Influence de la température sur la concentration du substrat biodégradable

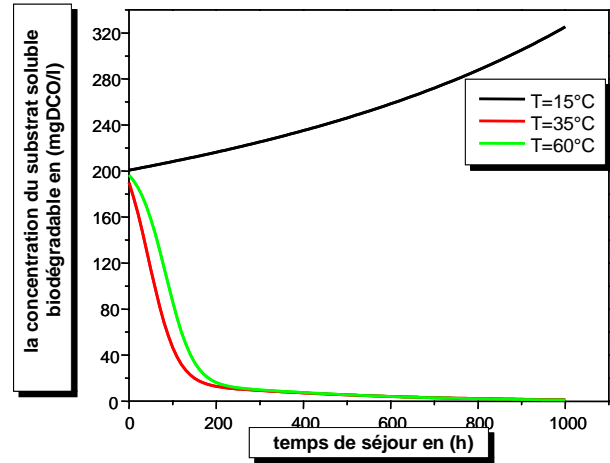
La troisième étape qui est la cétogénèse où a lieu la transformation des acides gras en acides simples, a montré une augmentation de la concentration de ces derniers. Ceci peut être expliqué par la faible cinétique lors de l'étape d'acidogène. Finalement, la dernière étape concernant la méthanogène, a donné lieu à une augmentation de la production du méthane jusqu'à atteinte de l'état stationnaire dans le réacteur.

## 5.2 Influence de la température sur la concentration du substrat biodégradable

La figure 6, montre l'influence de la température sur la concentration du substrat biodégradable en fonction du temps, où il y a une diminution du substrat, avec une cinétique rapide à des températures de 35 et 60 °C, puis faible, à des températures faibles de 15°C. Cela montre clairement l'importance de la température dans le phénomène de digestion anaérobie. D'après la littérature [12], les systèmes de digestion à des températures autour de 35°C, sont les plus fréquents.

## 5.3 Influence de la température sur la concentration du substrat soluble

La figure 7 montre l'influence de la température sur la concentration du substrat biodégradable en fonction du temps, où il y a une diminution du substrat, avec une cinétique rapide à des températures de 35 et 60 °C.



**Figure 7 :** Influence de la température sur la concentration du substrat soluble biodégradable

Cependant une augmentation pour des températures faibles, voisines de 15°C, est observée.

Cela peut être expliqué par une accumulation du substrat soluble produit et la faible cinétique de l'étape suivante. Donc ceci est similaire au cas du substrat biodégradable, bien que la cinétique soit rapide.

## 5.4 Influence de la température sur la production des acides gras volatils

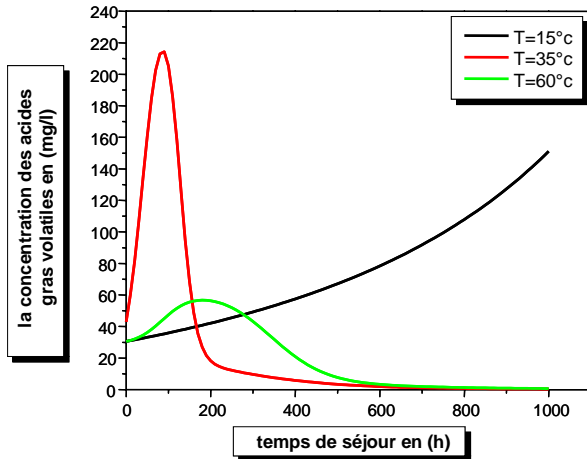
La figure 8, montre l'influence de la température sur la concentration de production des acides gras volatiles, où il y a une augmentation de la concentration des acides gras volatiles suivie d'une diminution des ces derniers pour des températures de 35 et 60°C) et, ce, avec des cinétiques différentes.

Cette diminution peut être expliquée par la forte consommation des produits (utilisés comme substrats) lors de l'étape suivante. Pour de températures faibles, une accumulation de la production des acides gras, est notée. Cela peut être expliqué par la faible cinétique de consommation lors de l'étape d'acétogénèse.

## 5.5 Influence de la température sur la production des acides simples

La figure 9 montre l'influence de la température sur la concentration de production des acides simples formés.

Une augmentation continue de la concentration des acides simples formés, est notée, jusqu'à atteinte de l'état stationnaire, du fait que le réacteur utilisé est complètement agité sans retour d'où une alimentation continue en substrat.

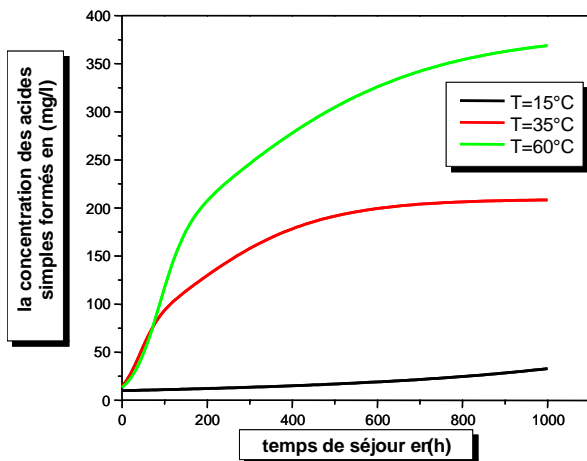


**Figure 8 :** Influence de la température sur la concentration des acides gras

Cette diminution peut être expliquée par la forte consommation des produits (utilisés comme substrats) lors de l'étape suivante. Pour de températures faibles, une accumulation de la production des acides gras, est notée. Cela peut être expliqué par la faible cinétique de consommation lors de l'étape d'acétogénèse.

### 5.6 Influence de la température sur la production des acides simples

La figure 9 montre l'influence de la température sur la concentration de production des acides simples formés. Une augmentation continue de la concentration des acides simples formés, est notée, jusqu'à atteinte de l'état stationnaire, du fait que le réacteur utilisé est complètement agité sans retour d'où une alimentation continue en substrat.

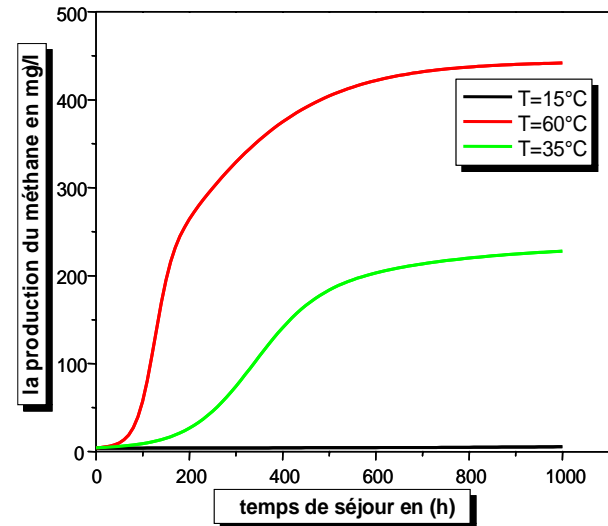


**Figure 9 :** Influence de la température sur la concentration des acides simples formés

Des cinétiques différentes sont remarquées, avec une production optimale ayant lieu pour des températures de 35 et 60°C.

### 5.7 Influence de la température sur la production du méthane

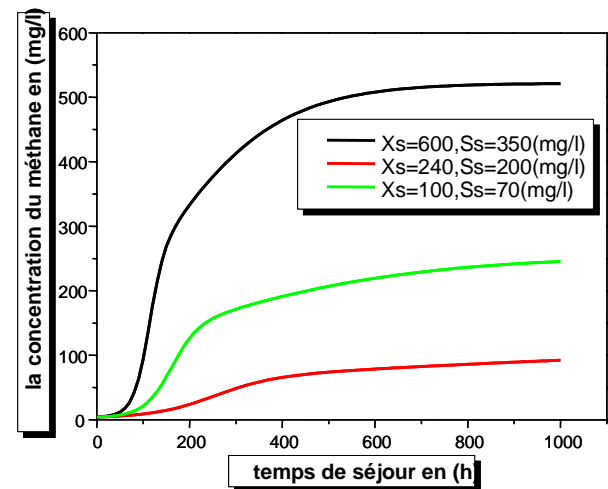
La figure 10, montre l'influence de la température sur la production du méthane, où on a trouvé que l'élévation de cette dernière (la température), influe positivement sur certaines étapes de la digestion anaérobie, donc elle peut accélérer le phénomène de digestion dans le cadre générale.



**Figure 10 :** Influence de la température sur la production du méthane

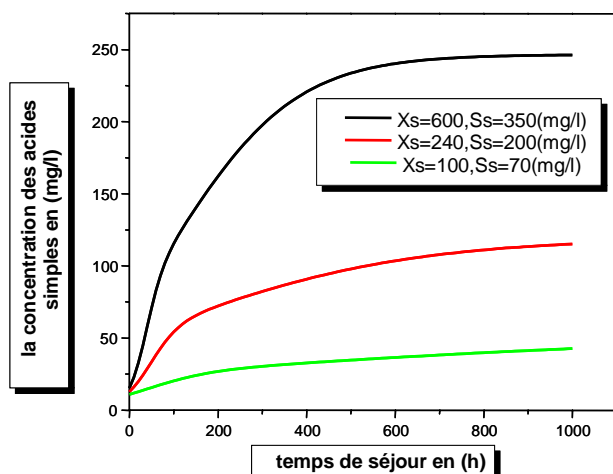
### 5.8 Influence de la concentration du substrat à l'entrée sur la variation des différents paramètres

Concernant l'étude de l'influence de la concentration du substrat, sur la production des acides gras volatiles, la production des acides simples et la production du méthane (voir figures 11, 12 et 13 successivement).

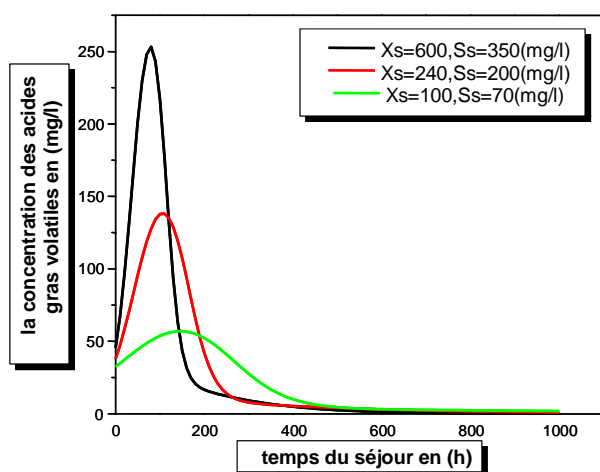


**Figure 11 :** Influence de la concentration du substrat à l'entrée sur la production du méthane

On a trouvé que généralement l'augmentation de la concentration du substrat à l'entrée influe positivement sur la cinétique et la concentration de formation des différents éléments cités ci-dessus.



**Figure 12 :** Influence de la concentration du substrat à l'entrée sur la concentration des acides simples



**Figure 13 :** Influence de la concentration du substrat à l'entrée sur la concentration des acides gras

## CONCLUSION

Notre étude a porté sur la modélisation d'un phénomène de traitement des déchets ménagers biodégradables, qui est la digestion anaérobie dans un réacteur complètement agité sans retour.

A travers cette modélisation, on a essayé de voir en premier lieu l'évolution des différents paramètres en fonction du temps tel que la concentration du substrat, des acides gras volatils, des acides simples et la production du méthane, en deuxième point l'influence de la température sur les différents paramètres cités ci-dessus et finalement l'influence de la concentration du substrat à l'entrée sur l'évolution de la concentration

des acides gras volatils, des acides simples et du méthane.

Concernant la variation de la concentration des différents paramètres (substrat initial biodégradable et soluble, acides gras volatiles, acides simples et méthane), en fonction du temps de séjour à des températures différentes ( $T=15, 35$  et  $60^{\circ}\text{C}$ ), on a trouvé que les résultats de la modélisation sont conformes avec la théorie [13].

Où dans la première étape qui est l'hydrolyse du substrat, on a trouvé une diminution de la concentration du substrat en fonction du temps, ce qui est logique en le comparant avec la théorie, de même pour l'étape de l'acidogène qui est caractérisée par la production des acides gras volatile où on a trouvé qu'il y a une augmentation de la concentration suivie d'une diminution qui peut être expliquée par la conversion de certain pourcentage des acides gras en acides simples.

Concernant la troisième étape qui est la cétogénèse où se réalise la transformation des acides gras en acides simples, on a trouvé qu'il y a une augmentation de la concentration de ces derniers, cette augmentation peut être expliquée par l'accumulation des acides gras produits.

La dernière étape c'est la méthanogène au cours de laquelle on a observé la formation du méthane, et l'augmentation de cette production jusqu'à l'arrivée à l'état stationnaire dans le réacteur.

Concernant l'étude de l'influence de la température, on a essayé de voir plusieurs cas :

**1<sup>er</sup> cas :** sur le substrat à l'entrée, où on a trouvé que l'augmentation de la température influe positivement sur la vitesse de dégradation du substrat, c'est à dire qu'il y a une augmentation de la vitesse de dégradation du substrat.

**2<sup>ème</sup> cas :** sur la production des acides gras volatiles, où on a constaté que l'augmentation de la température n'influe par régulièrement sur la cinétique de production des acides gras, et cela peut être expliqué par les cinétiques des différentes étapes de digestion qui sont liées entre eux.

**3<sup>ème</sup> cas :** sur la production des acides simples, où on a trouvé que l'élévation de la température influe positivement sur la cinétique de production des acides simples, et cela peut être observé par l'augmentation de la concentration de ces derniers.

**4<sup>ème</sup> cas :** sur la production du méthane, où on a trouvé que l'élévation de la température influe positivement sur certaines étapes de la digestion anaérobie, donc

elle peut accélérer le phénomène de digestion dans le cadre générale.

Concernant l'étude de l'influence de la concentration du substrat, sur la production des acides gras volatiles, la production des acides simples et la production du méthane, on a trouvé que généralement l'augmentation de la concentration du substrat à l'entrée produise une augmentation considérable sur la cinétique et la concentration de formation des différents élément cités ci-dessus.

#### REFERENCES

- [1] Droste, R. L., J. WILEY, N. Y. (1997). "Theory and practice of water and wastewater treatment", ISBN : 978-0-471-12444-3, publisher Wiley.
- [2] Vasily A. Vavilin, Sergy V. Rytov, Ljudmila Ya. Lokshina, Spyros G. Pavlostathis, Morton A. Barlaz, "Distributed Model of Solid Waste Anaerobic Digestion", Willy Periodicals, Ing.,
- [3] K. V. Rajeshwari, M. Balakrishnan, A. Kansal, Kusum Lata, V. V. N. Kishore, "State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment", Renewable & Sustainable Energy Reviews, 4 (2000) 135-156.
- [4] S. Igoud, I. Tou, S. Kehal, N. Mensouri et A. Touzi, "Première approche de la caractérisation du biogaz produit à partir des déjection bovines", Energie Renouvelable, 5 (2002) 123-128.
- [5] David Bolzonilla, Francesco Fatone, Paolo Pavan, and Franco Cecchi, "Anaerobic Fermentation of Organic Municipal Solid Waste for the Production of Soluble Organic Compounds", Ind. Eng. Chem. Res., 44 (2005) 3412-3418.
- [6] T. H. Erguder, U. Tezel, E. Guven, G. N. Demirer, "Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors", Waste Management, 21 (2001) 643-650.
- [7] A. Del. Borghi, A. Converti, E. Palazzi, M. Del Borghi, "Hydrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste", Bioprocess Engineering 20 (1999) 553-560
- [8] L. Bjornsson, M. Murto, B. Mattiasson, "Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process", Appl. Microbiol. Biotechnol., 54 (2000) 844-849
- [9] G. Vidal, M. Field, R. Mendez-pampin and J. M. Lema, "Anaerobic biodegradability and toxicity of wastewaters from chlorine and total chlorine-free bleaching of eucalyptus kraft pulps", wat. Res., Vol. 3, N° 10 (1997), pp. 2487-2494.
- [10] R. Moletta, (2002). "Procédés biologiques anaérobies, dans *gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires*", technique et documentation, édition Lavoisier, Paris.
- [11] M. J. Crochet, A. R. Davies, K. Walters, "Numerical simulation of non-newtonian flow", Rheology series, 1, third edition, 1991.
- [12] S. Mace, D. Bolzonella, F. Cecchi and J. Mata-Alvarez, "Comparison of the biodegradability of the grey fraction of municipal solids waste of Barcelona in mesophilic and thermophilic conditions", Water Science and Technology Vol. 48 No.4 (2003) pp 21-28.
- [13] Anna C. Palmisano, Morton A. Barlaz, "Microbiology of solid waste", CRC press, 1996.