

## **Fermentation méthanique des déchets de bovins : étude du temps de rétention hydraulique, de la température et de la concentration en substrat**

Z. Zennaki<sup>1</sup>, A. Zaid<sup>2</sup>, H. Lamini<sup>2</sup>, M. Aubineau<sup>3</sup> et M. Boulif<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Maître de conférence. École nationale d'agriculture, Meknès, Maroc

<sup>2</sup> Professeur, Département de biochimie, Université My. Ismail, Meknès, Maroc

<sup>3</sup> Assistance. Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc

<sup>4</sup> Professeur, Département de machinisme agricole. Institut national agronomique, Paris-Grignon, France

<sup>5</sup> Professeur, Département de phytopathologie. École nationale d'agriculture, Meknès, Maroc

### **Résumé**

Ce travail a été entrepris pour améliorer le rendement en méthane obtenu par la fermentation méthanique des déchets de bovins. L'optimisation du temps de rétention hydraulique et de la concentration en matière organique du substrat a été déterminée à 37 °C et 55 °C. L'étude du processus de fermentation des déchets de bovins et du potentiel de production en méthane montrent que la fermentation méthanique de ces déchets peut être conduite à de courts temps de rétention hydraulique sans détruire la stabilité du processus fermentaire : 8 jours à 37 °C et 5 jours à 55 °C pour une concentration en matière sèche de 42,9 g/l. Les rendements en biogaz sont améliorés; ils sont respectivement de 0,46 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>/j) et 0,68 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>/j) pour une proportion en méthane de 56 % et 51 % aux températures de 37 °C et de 55 °C. Les concentrations en matière sèche qui donnent les meilleurs rendements varient entre 7 et 9 %. Les modèles de Monod (1942) et de Chen et Hashimoto (1978), appliqués à l'étude cinétique du processus décrivent de manière satisfaisante, à la fois la cinétique de disparition du substrat et la production de méthane.

**Mots-clés** : fermentation méthanique, déchets de bovins, temps de rétention hydraulique, température, rendement en méthane

### **Abstract**

#### **Methane fermentation of cattle manure : Effects of hydraulic retention time, temperature and substrate concentration**

This study has been undertaken in order to improve yield of methane production by anaerobic fermentation of cattle manure. Optimisation of hydraulic retention time and organic concentration substrate were evaluated at 37 °C and 55 °C. The study of cattle manure fermentation process as well as that of methane production yield showed that methanogenic fermentation of these organic wastes may be conducted at low hydraulic retention time without stressing the fermentary process : 8 days at 37 °C and 5 days at 55 °C for a dry matter concentration of 42.9 g/l. The biogas yield increased, reaching 0.46 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.d) at 37 °C and 0.68 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.d) at 55 °C with a methane content of 56 % and 51 % respectively. The best biogas yields occurred for dry matter concentrations between 7 and 9 %.

Kinetic models of Monod (1942) and of Chen and Hashimoto (1978) described well substrate depletion and methane production.

**Key words :** methane fermentation, cattle manure, hydraulic retention time, temperature, methane yield

## ملخص

التخمير الميثاني لروث الأبقار : تأثير مدة الاحتفاظ الهيدرولي ونسبة المادة العضوية في الخليط ودرجة الحرارة

ز. زناكي<sup>1</sup>، أ. زايد<sup>2</sup>، م. أوبينو و م<sup>3</sup>. بوليف<sup>1</sup>

1 : المدرسة الوطنية للفلاحة، مكناس، المغرب

2 : جامعة مولاي إسماعيل، مكناس، المغرب

3 : المعهد الوطني للزراعة، باريس، فرنسا

تم إنجاز هذا العمل لتحسين مردودية البيوغاز الناتج عن الهضم اللاهوائي للنفايات العضوية للأبقار من خلال ترشيد مدة الاحتفاظ الهيدرولي واستخدام نسب ملائمة من المادة العضوية في الخليط.

أظهرت الدراسة أن مدتي الاحتفاظ الهيدرولي : 8 أيام تحت 37 درجة مائوية و 5 أيام تحت 55 درجة مائوية، لم تؤثر على استقرارية عملية تخمير روث الأبقار وإنتاج غاز الميثان عندما يكون تركيز المادة الجافة 42,9 غرام في اللتر. في هذه الظروف كانت إنتاجية البيوغاز بقيمة 0,46 م<sup>3</sup>/3م في اليوم و 0,86 م<sup>3</sup>/3م في اليوم بالنسبة للظروف المذكورة على التوالي. كانت نسبة غاز الميثان في البيوغاز تساوي 56 % تحت 37 درجة مائوية و 51 % تحت 55 درجة مائوية عندما تراوحت نسبة المادة الجافة بين 7 و 9 بالمائة. إن معادلات منود (MONOD) من جهة، و شين و هاشيموتو (CHEN et HASHIMOTO) من جهة أخرى قد وصفت بتطابق جيد حركية انخفاض المادة العضوية وإنتاج الميثان.

**الكلمات المفتاحية :** هضم لاهوائي، روث الأبقار، احتفاظ هيدرولي، إنتاجية الميثان

## Introduction

Les populations rurales - 12,7 millions d'habitants (Direction de la statistique 1995) - utilisent en abondance pour leurs besoins domestiques du bois, des pailles ou autres déchets végétaux à côté des carburants d'origine fossile. L'augmentation du prix du pétrole, la déforestation causée par l'utilisation abusive du bois de feu, ainsi que les problèmes posés par la pollution, ont amené l'Etat à encourager le développement de sources d'énergie alternatives pour satisfaire, en partie ou en totalité, la demande en énergie. L'une de ces alternatives est la production de biogaz par la fermentation méthanique des déchets de bovins, procédé peu coûteux et non polluant. Ce procédé qui a été largement utilisé à travers le monde (Hachimoto *et al.* 1981; Dubourguier *et al.* 1985) donne des performances limitées par l'influence de nombreux paramètres physico-chimiques de la fermentation méthanique et la mise en pratique de cette technologie.

Notre étude est une contribution à l'amélioration des performances de cette technologie par l'optimisation des trois paramètres suivant : le temps de rétention hydraulique, la température et la concentration en substrat.

## Matériel et méthodes

Une série d'expériences en mode "batch" et en régime continu sont réalisées à 37 °C et 55 °C. Le substrat est constitué par de la paille de vache prélevée quotidiennement de l'étable de la ferme d'application de l'Ena de Meknès. En mode "batch", les essais sont menés dans des réacteurs de 500 ml pour des concentrations en matière organique (MO) de 40 g/l, 50 g/l, et 80 g/l à 37 °C et 40 g/l et 80 g/l à 55 °C. En régime continu, les expérimentations se font dans des digesteurs de 70 litres; la teneur en matière sèche est maintenue à la valeur constante de 4,30 % MS en déchets de bovins. Les temps de rétention hydraulique expérimentés sont de 15, 12, 10, 8 et 7 jours en mésophilie et de 10, 8, 7, 5 et 4 jours en thermophilie, correspondant à des taux de charge en matière organique respectifs de 2,41; 3,01; 3,61; 4,25 et 5,16 kg de MO/(m<sup>3</sup>.j) à 37 °C et de 3,61; 4,62; 5,16; 7,23 et 9,04 kg MO/(m<sup>3</sup>.j) à 55 °C. Le suivi et les analyses expérimentales sont effectués selon les méthodes standards (Rodier 1984; Apha 1985).

Pour déterminer les performances de la fermentation méthanique des déchets de bovins, les paramètres étudiés sont : la dégradation de la matière organique, la teneur en Acides gras volatils (Agv) et la production en méthane.

Les modèles cinétiques utilisés sont ceux de Monod (1942) et de Chen et Hashimoto (1978) appliqués aux déchets de bovins.

## Résultats et discussion

### *Fermentation en "Batch"*

En vue d'optimiser la dégradation des déchets de bovins et la production de méthane, une série d'essais de fermentation en "batch" a été menée pour tester l'influence de la concentration initiale en matière organique. So sur les

performances de la fermentation méthanique à 37 et 55 °C. Un essai de modélisation a pu être envisagé à partir des résultats obtenus.

#### *Disparition du substrat*

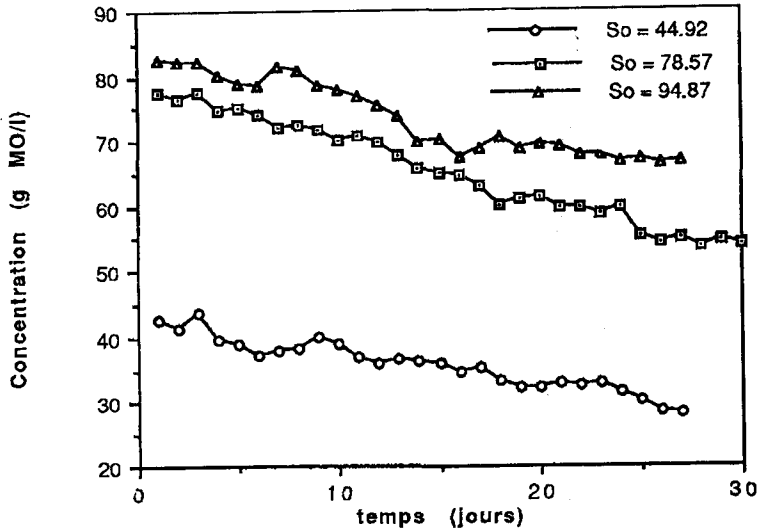
Les figures 1 et 2 nous donnent l'évolution de la disparition du substrat pour  $S_0$  égale à 44,92; 78,58 et 94,87g Mo/l à 37 °C et pour  $S_0$  égale à 44,44 ; 82,68 et 95,76g Mo/l à 55 °C. Ces courbes montrent que la diminution progressive de la matière organique suit une fonction linéaire par rapport au temps qui ne dépend pas a priori de la concentration initiale  $S_0$ . Les taux de réduction TR. (Fig. 3) sont supérieurs en thermophilie; cependant, à partir d'une valeur de  $S_0$  égale à 80 g Mo/l, ces taux ne montrent pas de différence significative entre les deux températures étudiées.

#### *Rendement en méthane*

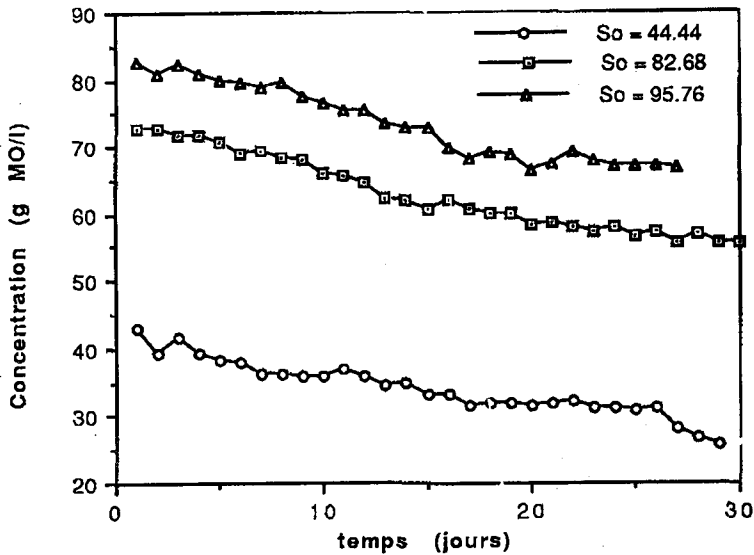
Pour toutes les concentrations étudiées, les courbes d'évolution de la production en méthane passent par un maximum (Tableau I). L'évolution se fait en trois phases, une première phase croissante suivie d'une phase stationnaire courte (période maximale de production) et d'une troisième phase décroissante. La figure 4 représente l'évolution de la production maximale en méthane en fonction de  $S_0$  à 37 et 55 °C. On note ainsi que le rendement en méthane est une fonction croissante de  $S_0$ ; cependant, à partir d'une valeur comprise entre 70 et 90 g Mo/l la production en méthane chute.

#### *Discussion.*

Selon ces résultats, nous remarquons que le rendement en méthane est une fonction croissante de la température et de la concentration en substrat jusqu'à une certaine limite qui se situe aux environs de 80 g Mo/l au delà de laquelle l'influence de la température et de l'augmentation en Mo est inhibitrice. Ceci confirme que l'inhibition vient de la phase d'hydrolyse; en effet, d'une part, les bactéries hydrolytiques ne présentent un optimum qu'au dessus de 60 °C (Albagnac et Verrier 1983; Marique *et al.* 1989) et d'autre part, l'activité bactérienne est ralentie par l'excès du substrat (Marique *et al.* 1989).



**Figure 1.** Evolution de la teneur en matière organique au cours de la fermentation en batch des déchets de bovins à 37 °C



**Figure 2.** Evolution de la teneur en matière organique au cours de la fermentation en batch des déchets à 55 °C.

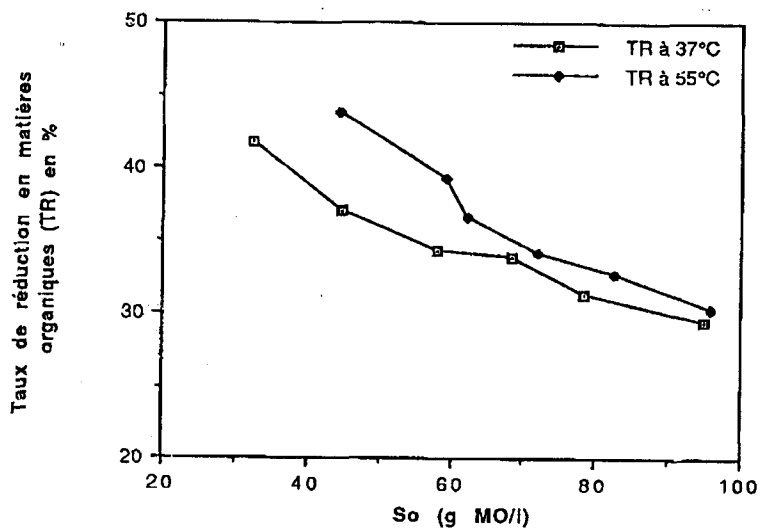


Figure 3. Variation du taux de réduction en matières organiques au cours de la fermentation en batch des déchets de bovins à 37 °C et à 55 °C.

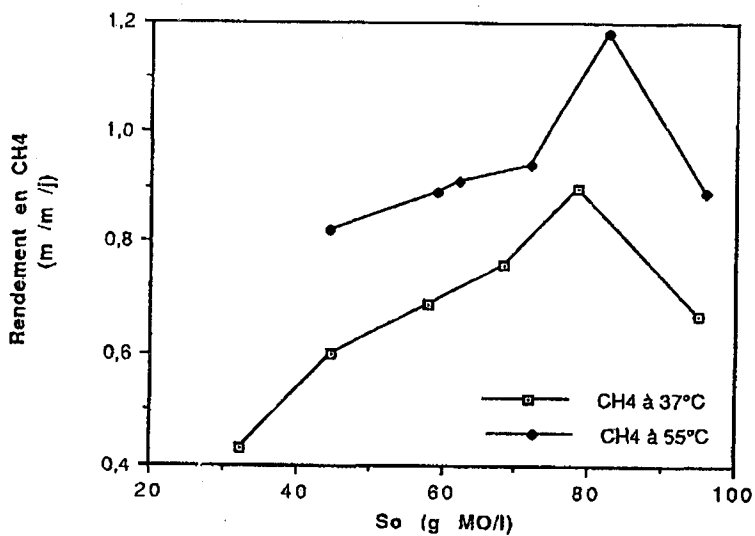


Figure 4. Variation du rendement en CH<sub>4</sub> en fonction de la concentration initiale (So) au cours de la fermentation en batch des déchets de bovins à 37 °C et à 55 °C

### Modèle cinétique

Du fait de la complexité du substrat étudié et des processus biochimiques, l'essai de modélisation ne tiendra compte que d'une seule étape selon la réaction globale suivante : (Andrew 1975)

Matière organique complexe + microorganismes + eau  $\rightarrow$  microorganismes + méthane + gaz carbonique.

L'étude des résultats nous montre que le modèle de Monod (1942) peut être appliqué de façon satisfaisante pour expliquer le taux de disparition du substrat et la production de méthane.

Modèle de production du méthane. Il est déterminé à partir de l'équation :

$$\mu = \mu_{pmax} \cdot S / (K_p + S) \text{ avec}$$

$\mu_{pmax}$  = taux spécifique maximum de production en méthane ( $j^{-1}$ ),

$K_p$  = constante de saturation en produit (g/l),

$S$  = concentration en substrat (g MO/l)

Sur les figures 5 et 6, figure l'évolution des taux spécifiques de production de méthane  $M_p$  calculés à partir de l'équation précédente et celui des  $M_p$  obtenus expérimentalement. L'étude de ces courbes montre que le modèle de Monod décrit bien la cinétique de la production du méthane. On remarque que la vitesse de production de  $CH_4$  croît avec  $S_0$  et avec la température; dans ce dernier cas l'accroissement est de 38 %.

Modèle de disparition du substrat. Le taux spécifique de disparition du substrat est défini par la relation :

$$\mu_s = - 1/S \cdot dS/dt \text{ avec :}$$

$S$  : concentration en substrat en g/l,

$dS/dt$  : vitesse de disparition du substrat

$\mu_s$  est calculé à partir du bilan matière

$$\mu_s = a \mu_x + b \mu_p + m \text{ où } \mu_x = \mu_{xmax} \cdot S / (K_s + S)$$

$$\mu_p = \mu_{pmax} \cdot S / (K_p + S)$$

$\mu_x$  : taux spécifique de croissance de la biomasse,

$\mu_p$  : taux spécifique de production de méthane,

$m$  : coefficient de maintenance

$a$  et  $b$  représentent respectivement les rendements spécifiques en biomasse et en méthane.

Les courbes des figures 7 et 8 qui représentent l'évolution de  $\mu_s$  calculés et  $\mu_s$  expérimentaux s'ajustent bien au modèle de Monod. Elles nous permettent d'établir un modèle de disparition du substrat en mésophilie et en thermophilie.

$$\text{à } 37^\circ C \quad \mu_s = 0,42 \mu_x + 0,95 \mu_p + 0,38 \quad \text{avec } R^2=0,95$$

$$\text{à } 55^\circ C \quad \mu_s = 0,579 \mu_x + 1,735 \mu_p \quad \text{avec } R^2=0,97$$

Ces modèles peuvent nous donner les prévisions des concentrations en substrat par rapport aux croissances bactériennes et à la production de méthane pour des concentrations inférieures à 9 %.

Une simulation en continu nous permettra d'établir un modèle adapté à la fermentation méthanique de notre substrat.

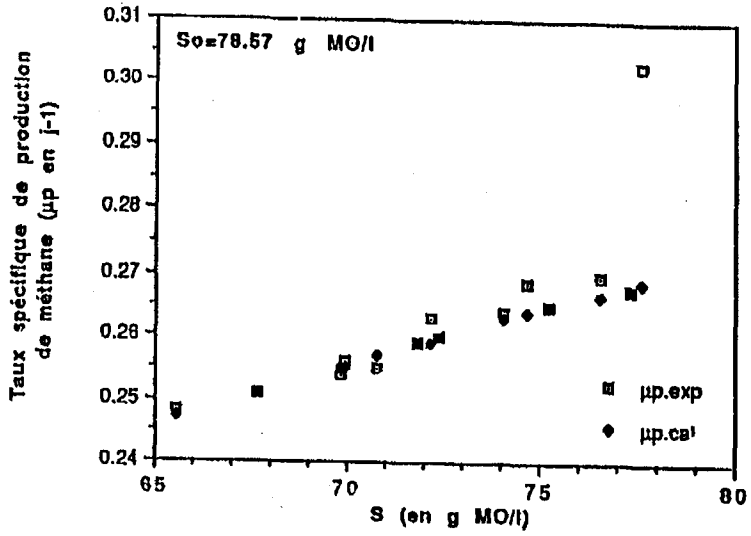


Figure 5. Evolution du  $\mu_p$  calculé au cours de la fermentation en batch des déchets de bovins à 37 °C.

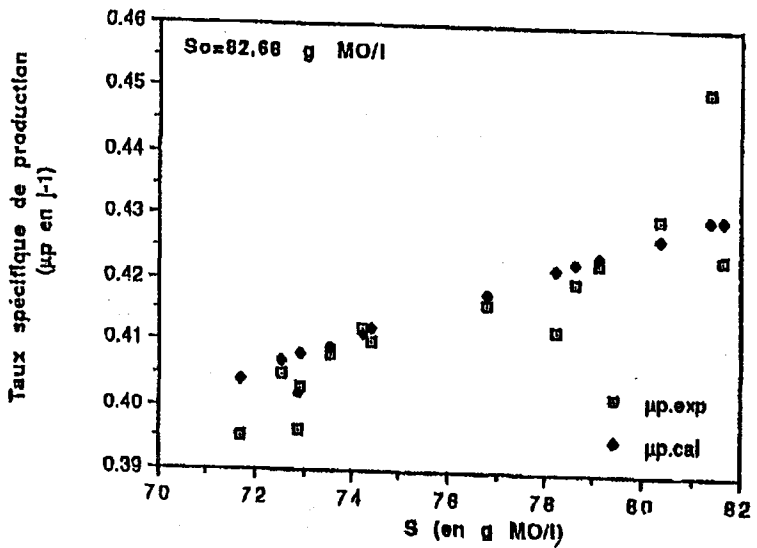


Figure 6 : Evolution de  $\mu_p$  expérimental et  $\mu_p$  calculé au cours de la fermentation en batch des déchets de bovins à 37 °C.



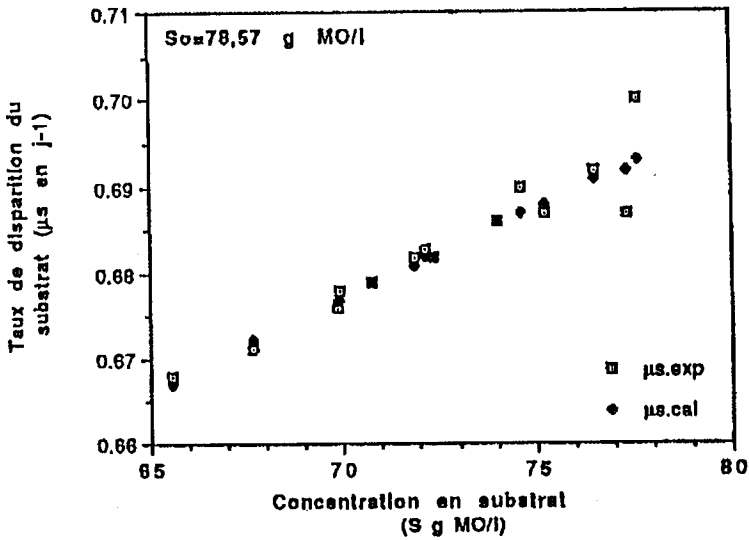


Figure 7. Evolution du  $\mu_p$  expérimental et  $\mu_p$  calculé dans la fermentation en batch des déchets de bovins à 37 °C.

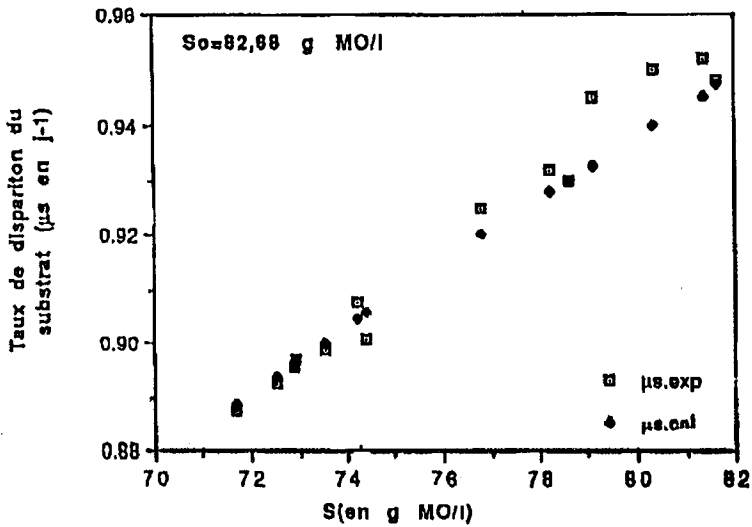


Figure 8. Evolution du  $\mu_s$  expérimental et  $\mu_s$  calculé dans la fermentation en batch des déchets de bovins à 55 °C.

### *Fermentation en continu*

Les conditions expérimentales notées répondant aux résultats de l'étude en "batch", nous avons étudié dans un premier temps la biodégradabilité du substrat à partir du taux d'élimination des matières organiques et de l'évolution des Acides gras volatils (Agv), facteurs clés de la fermentation méthanique, puis la production de méthane.

### *Biodégradation de la matière organique*

Les taux de réduction de la matière organique et de la Demande chimique en oxygène (Dco) sont représentés sur les figures 9 et 10 pour les temps de rétention hydraulique étudiés, aussi bien en mésophilie qu'en thermophilie. Les données suivent les équations suivantes :

à 37 °C	TR Dco	= - 5,62 + 3,86 TRH	avec	R <sup>2</sup> = 0,98
	TR MO	= - 2,86 + 3,36 TRH		R <sup>2</sup> = 0,97
à 55 °C	TR Dco	= 9,08 + 4,10 TRH		R <sup>2</sup> = 0,96
	TR MO	= 12,41 + 3,52 TRH		R <sup>2</sup> = 0,99

On en déduit que la cinétique de disparition de la matière organique et de la Dco est du 1<sup>e</sup> ordre avec un rendement maximum en Dco de 51 % pour un TRH égal à 15 jours à 37 °C. Pour la matière organique, ce rendement est de 52 %. Ces valeurs varient dans le même sens que le TRH. Par rapport aux prévisions théoriques qui sont de 90 à 95 % (Norman 1983), ce rendement est bas. Il est également faible comparé aux résultats obtenus par Bories (1980) pour des effluents de distillerie ou par Roy (1985) pour des effluents lipidiques. Il est du même ordre que ceux qui ont été obtenus sur des substrats identiques au nôtre (Ouhbal 1989; Fall *et al.* 1993). Il peut s'expliquer, d'une part, par une phase d'hydrolyse limitante due à l'existence de matières ligno-cellulosiques, et d'autre part, par un lessivage de la flore bactérienne pour les TRH faibles.

### *Méthane et sa relation avec la teneur en AGV*

La productivité en méthane est une fonction croissante du taux de chargement (fig. 11 et 12) pour des valeurs de TRH supérieures à 8 jours à 37 °C et à 5 jours à 55 °C. Elle suit la même évolution que celle des acides gras volatils. On note que le pH qui varie entre 6,70 et 7,70 et que la teneur en Agv qui reste inférieure à 1,46 mg.ac.acét./l, valeur reconnue comme étant inhibitrice de la méthanogénèse, sont situés dans les phases optimales de fonctionnement rapportées par la littérature (Asinari di San Marzano *et al.* 1981; Zoetemeyer *et al.* 1982; Albagnac et Verrier 1983; Henze et Harremoes 1983; Henson *et al.* 1986). Les plus forts rendements en méthane ne correspondent pas aux meilleurs taux de réduction de la Dco cités plus haut mais aux plus faibles valeurs en Agv (385mg.ac.acet./l) et à un pH neutre (7,66); ils sont de 0,46 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.j) pour un TRH de 8 jours à 37 °C et de 0,68m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.j) pour un TRH de 5 jours à 55 °C.

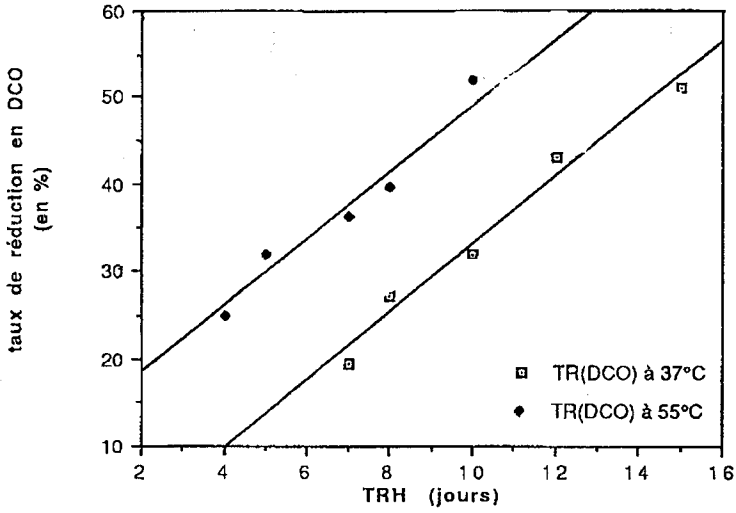


Figure 9. Variation du taux de réduction en demande chimique en oxygène (Dco) en fonction du TRH à 37 °C et 55 °C.

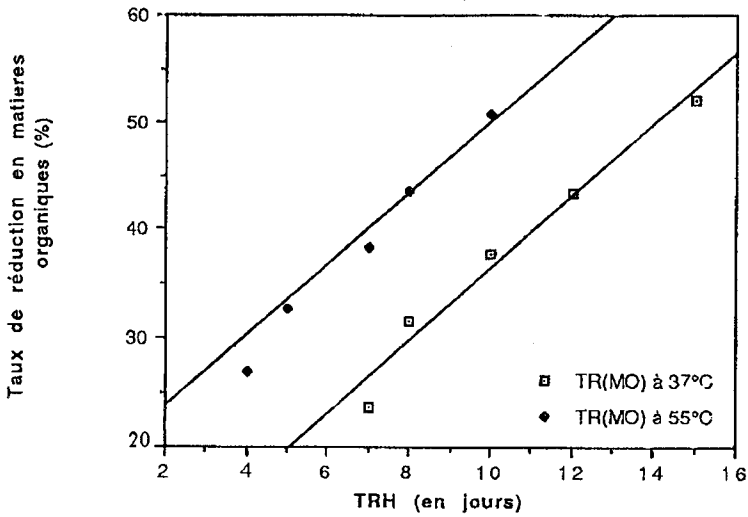


Figure 10. Variation du taux de réduction en demande chimique en matière organique (MO) en fonction de TRH à 37 °C et 55 °C.

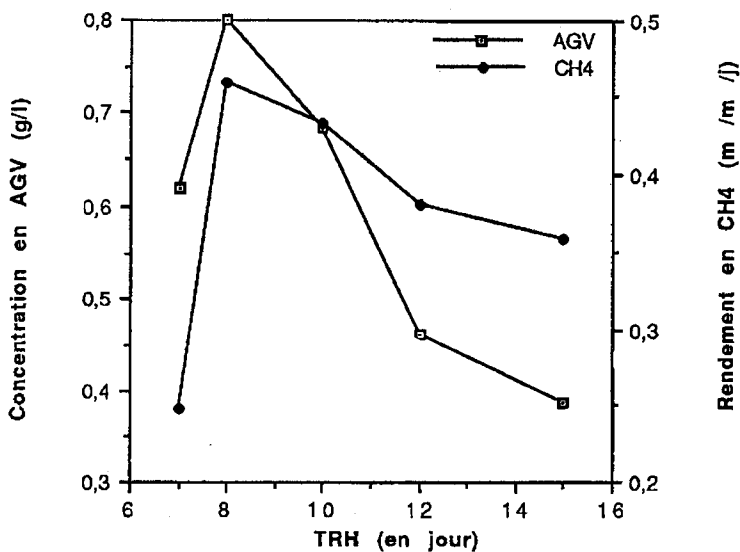


Figure 11. Evolution de la teneur en acides gras volatils (Agv) et du rendement en méthane (CH<sub>4</sub>) en fonction du TRH à 37 °C

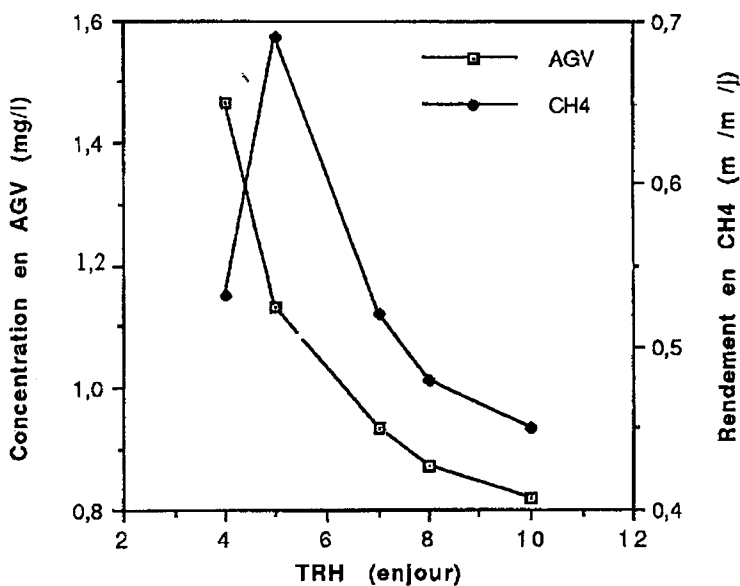


Figure 12. Evolution de la teneur en acides gras volatils (Agv) et du rendement en méthane (CH<sub>4</sub>) en fonction du TRH à 55 °C

## Discussion

L'étude de la biodégradabilité du substrat et de la production en méthane en relation avec le TRH montre que le processus fermentaire n'est pas affecté pour des TRH supérieurs à 8 jours en mésophilie et à 5 jours en thermophilie; ceci s'est caractérisé, comme nous l'avons vu plus haut, par un pH situé dans la zone de la neutralité et des teneurs en Agv faibles. Nous confirmons ainsi les résultats obtenus par la bibliographie : en effet nous avons obtenu pour le substrat étudié une bonne stabilité de la fermentation méthanique à de courts TRH bien que la faisabilité du processus recommande des TRH élevés et une forte concentration en substrat (Hachimoto et Huska 1982; Ouhbal 1989; Cobb et Hill 1990; Mlaouhi 1994). Des différences sont notées cependant dans les valeurs obtenues pour la biodégradabilité et le rendement en méthane : résultats du même ordre que ceux de Ouhbal et Mlaouhi mais inférieurs à ceux obtenus par Robbins *et al.* et par Hachimoto et Huska cités précédemment. Ces différences sont dues à la nature du substrat et particulièrement l'origine des déchets de bovins utilisés et le mode d'alimentation des animaux.

### *Modélisation de la cinétique de la fermentation des déchets de bovins*

L'application du modèle de Contois proposé par Chen et Hashimoto (1980) aux déchets de bovins nous permet d'e décrire la relation entre le rendement en méthane et la vitesse de production maximale en fonction du temps de rétention hydraulique.

$$B = B_0 (1 - K / [TRH / (TRH_m - 1 + K)])$$

$$\mu_{max} = B_0 S_0 / TRH [1 - K / (TRH_m - 1 + K)]$$

où

B = volume en litre de CH<sub>4</sub>

B<sub>0</sub> = volume en litre de CH<sub>4</sub> produit par gramme de DCO ajoutée pour un TRH infini

K = constante cinétique

TRH<sub>m</sub> = temps de rétention limite

μ<sub>max</sub> : vitesse de production maximum

La construction des courbes  $B = f(1/TRH)$  et de  $TRH = f[B/(B_0 - B)]$  nous permet de déterminer B<sub>0</sub>, μ<sub>max</sub> et K et de prévoir ainsi quelle sera la productivité en méthane pour un taux de chargement donné.

Les courbes des figures 13 et 14 qui représentent respectivement les fonctions B et TRH définies plus haut, montrent que les résultats obtenus s'ajustent bien au modèle de Contois. A partir du tableau II qui donne les valeurs obtenues pour B<sub>0</sub>, μ<sub>max</sub> et K par Chen et Hashimoto (1980) à 35 °C et nos valeurs, nous pouvons affirmer que si B<sub>0</sub> a une valeur voisine de celle obtenue par ces auteurs, la vitesse de production μ<sub>max</sub> est cependant plus faible. D'autre part, la valeur obtenue pour K, qui est caractéristique de la présence d'inhibitions dans le système, et qui peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 20 selon la sévérité de cette inhibition, confirme qu'il existe une inhibition faible due à l'existence de complexes lignocellulosiques sans que le processus fermentaire soit affecté. La valeur de K est corrélée par la faiblesse de la valeur de μ<sub>max</sub>, qui dénote une vitesse lente

caractéristique de notre substrat constitué par des déchets de bovins, qui ne peut s'expliquer que par la limitation et la prépondérance de la phase d'hydrolyse.

**Tableau 1.** Evolution de la productivité maximale en CH<sub>4</sub> en fonction de la concentration initiale au cours de la fermentation "batch" des déchets bovins à 37 °C et 55 °C

Température (° C)	Concentration initiale (g MO/l)	Durée Fermentation (jours)	Rendement maximum en CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /j)
37	32,39	9	0,43
	44,92	13	0,60
	58,14	13	0,69
	68,38	15	0,76
	78,57	16	0,90
	94,87	22	0,67
55	44,44	9	0,82
	59,34	10	0,89
	62,17	13	0,91
	71,99	14	0,94
	82,68	12	1,18
	95,76	11	0,89

**Tableau 2.** Comparaison des valeurs de Bo,  $\mu_{max}$  et K moyen obtenus dans notre étude à celles rapportées dans la littérature

Paramètres	Nos résultats	Résultats obtenus par Chen
Bo (l/g SV)	0,314	0,320
$\mu_{max}$ (j <sup>-1</sup> )	0,132	0,326
K moyen	0,703	0,900

## Conclusion

Les résultats obtenus au cours de cette expérimentation montrent que la fermentation méthanique des déchets de bovins en continu donne des résultats appréciables pour de courts temps de rétention hydraulique, 0,68 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/(m<sup>3</sup>.j) pour un TRH de 5 jours à 55 °C et 0,46 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.j.) pour un TRH de 8 jours à 37 °C sans que le processus fermentaire ne soit affecté. Les pourcentages en CH<sub>4</sub> sont de l'ordre de 52 % dans ces conditions. L'application du modèle de Contois nous permettra de concevoir le bioréacteur pilote correspondant et de prédire quelle sera la production de méthane lors de la fermentation méthanique des déchets de bovins dans les conditions expérimentales du présent travail. La stabilité des digesteurs méthaniques pourra, dans la pratique, encourager l'utilisation des déchets de bovins dans le monde rural en tant qu'alternative fiable et rentable pour la production d'énergie.

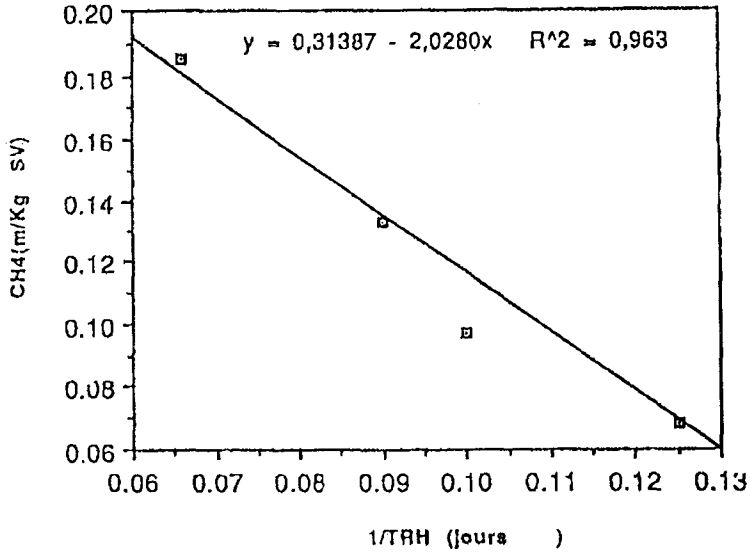


Figure 13. Courbe de variation de  $CH_4$  en fonction de  $1/TRH$

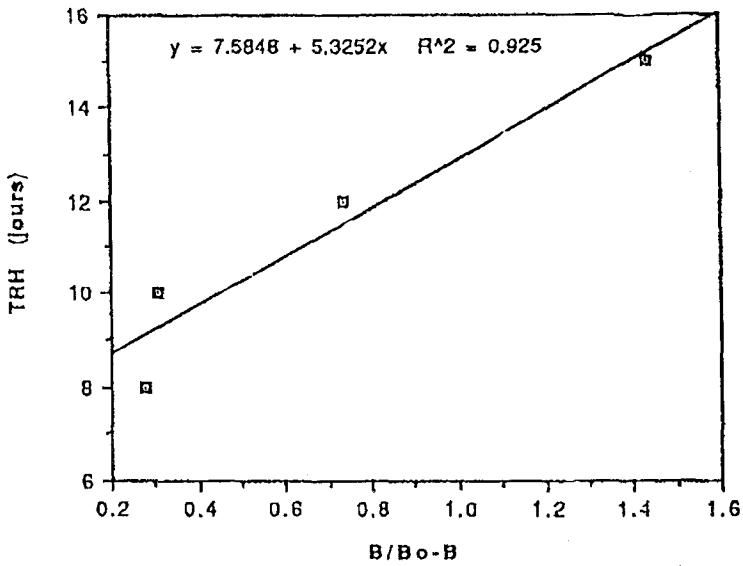


Figure 14. Courbe  $TRH = f(B/Bo-B)$

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Faculté des sciences de Meknès pour l'aide apportée à la réalisation des analyses chimiques et le Département de génie chimique de l'Ecole polytechnique de Montréal (Québec) pour le soutien constant manifesté au cours de cette étude.

## Références bibliographiques

- Albagnac G. et Verrier D. (1983). Méthanisation des effluents d'industries agro-alimentaires. *Biomasse actualités*, 2 : 17-21.
- Andrew J.F. (1975). Dynamic Model of the anaerobic digestion process. *Water and Sewage Works*, march 1975, 62-65 and april 1975, 74-77.
- Apha. (1985). Standards methods for the examination of water and wastawater. American public health association, Washington, D.C., Usa.
- Asinari C.M., di San Marzano., Binot R., Bol T., Fripiat J.L., Hutschemackers J., Melchior J.L., Perez I., Naveau H.P. and Nyns J.E. (1981). Volatile fatty acids, an important state parameter for the control of the reliability and the productivities of methane anaerobic digestion. *Biomass*, 1 (1) : 47-59.
- Bories A. (1980). Fermentation méthanique avec séparation de phase acétogénique et méthanogénique appliquée au traitement des effluents à forte charge polluante (distilleries). *Ann. Techn. Agrico.*, 29, (3) : 509-528.
- Bories A., Raynal J. and Bazil F. (1987). Anaerobic digestion of high-strength distillery waste (cane molasses stillage) in fixed -film. *Biological Wastes*, 23 : 251 - 267.
- Chen Y.R. et Hashimoto A.G. (1978). Kinetics of methane fermentation. *Biotechnology and bioengineering Symp.* 8 : 269-282.
- Chen Y.R. et Hashimoto A.G. (1980). Substrate utilization kinetic model for biological treatment processes. *Biotechnology and bioengineering*, 22 : 2081-2095.
- Cobb S.A. et Hill D.T. (1990). Volatil Fatty acid interference with alkalinity measurements in anaerobic fermenters. International summer congress. Amer. society of agri. engineers. Colombus. Ohio. Direction de la statistique. (1995). *Annuaire statistique du Maroc*. 1995. p.13.
- Dubourguier H.C., Albagnac G. et Verrier D. (1985). Methane production processes by fermentation of biomass. G.E. Beghi (ed.), *Synthetic fuels*, 299-333.
- Fall C., Mayer R.C. et Chavarie C. (1993). Potential of biogas production from dry cow manure. Groupe Biopro. Ecole polytechnique de Montreal. Québec. p. 813-816.
- Hashimoto A.G., Rchen Y. and Vault V.A. (1981). Anaerobic fermentation of beef cattle, sections 2-0, document of solar E.G. 77-01-4042, serie/TR-98372-1.



Hashimoto A.G. and Huska R.L. (1982). Methane from cattle waste : Effects of temperature, hydraulic time, and substrate concentration on kinetic parameter (K). *Biotech. bioeng.*, **24** : 2039-2052 .

Henson J.M., Bordeaux F.M., Rivard C.J. and Smith P.H. (1986). Quantitative influences of butyrate or propionate on thermophilic production of methane from biomass. *Appl. Environ. microbiol.* **51** : 288-292.

Henze M. and Harremoes P. (1983). Anaerobic treatment of waste water in fixed film reactors. A literature review. *Water science and technology*, 8-9-15. 90 pages.

Marique P.H., Gilles A., Edeline F. and Joassin L. (1989). Thermophilic semisolid anaerobic digestion of municipal refuses. *Biotechn. Bioeng.*, **33** : 536-541.

Mlaouhi A. (1993). Optimisation du fonctionnement de fermenteurs méthaniques pour effluents d'élevage bovins. Thèse de docteur de l'Ecole centrale de Paris. France. 204 pages.

Monod J. (1942). Recherches sur la croissance des cultures bactériennes. Hermann et Cie. Paris.

Norman J. (1983). Anaerobic fermentation, Fast Program. Commission of the European communities. Versailles workshop : 17-36.

Ouhbal M. (1989). Etude de certains paramètres influençant la fermentation méthanique de la bouse de vache. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle. Faculté des sciences de Rabat. 105 pages.

Rodier J. (1984). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires eaux de mer. 7<sup>e</sup> édition. Dunod. Paris.

Roy F. (1985). Fermentation méthanique des déchets glucidiques solides et des lipides, expérimentation en fermenteurs pilotes. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Lille, France. 84 pages.

Zoetemeyer R.J., Van den Heuvel J.C. and Cohen A. (1982). pH influence on acetogenic dissimilation of glucose in anaerobic digester. *WaterResearch.*, **16** : 303-311.