

Etude des paramètres physico-chimiques de la biométhanisation des ordures ménagères

Jawad AOUN, Dunia BOUAOUN
Université libanaise - Faculté des Sciences - Département de chimie
BP 90656 FANAR - LIBAN

La méthanisation des ordures ménagères est une technique de valorisation qui présente plusieurs avantages : réduction des nuisances environnementales, production de biogaz et obtention d'un compost valorisable. Le procédé de méthanisation a été appliqué pour traiter des ordures ménagères triées et broyées. Les principaux objectifs de ce travail étaient de fixer les différentes conditions pour le démarrage du pilote de fermentation en discontinu, de suivre le procédé de méthanisation afin de vérifier sa faisabilité à l'échelle industrielle. Une température à plage mésophile, un pH neutre, un brassage convenable, un rapport AGV/TAC bien équilibré sont les principaux paramètres indispensables pour le contrôle du procédé de méthanisation. Par contre, une production excessive des AGV, une hétérogénéité des ordures et un brassage déficient contribuent à l'inhibition du processus de la méthanogénèse. Le digestat obtenu est humide, mature et riche en matières organiques. Après valorisation, il peut être utilisé comme amendement aux sols appauvris en matières organiques.

Mots-clefs

Ordures ménagères - Biométhanisation - Méthacompost - Matières organiques - Métaux lourds.

The methanization of the domestic wastes constitutes a treatment and a technical valorization with several advantages : reduction of environmental harmful effects, production of biogas and obtaining an organic fertilizer matter. The sequence of the methanization has been realized with a fermentation reactor containing selected and ground household refuse. The main purpose of this work was the control of various parameters for the starting of the fermentation pilot in a discontinuous way and the methanization procedure, also to verify feasibility of scaling up at industrial level. Our results constitute a first step towards other experimentations to be performed in this field.

A mesophilic range of temperature, a neutral acidity value, convenient stirring, a well balanced VFA/CAR ratio are the major parameters to be controlled, in addition to the good selection and grinding of the domestic wastes. Otherwise a deficient stirring system and an excessive VFA production contribute in addition to the heterogeneous nature of wastes

to the inhibition of methanogenesis process.

The obtained compost is mature, humid and rich in organic matter. After valorization, it could be used as amendment for deficient soils in organic matter.

Keywords

Domestic wastes - Biomethanization - Methacompost - Organic matter - Heavy metals.

INTRODUCTION

La croissance démographique et la progression du niveau de consommation des habitants conduisent à une augmentation de la production quotidienne en ordures ménagères. L'estimation de la production moyenne des déchets ménagers au Liban est évaluée à 1,2 kg/jour/habitant (Aoun, 1994. ; Aoun et Sfeir, 1997) ce qui correspond à 438 kg/habitant de déchets produits annuellement.

La lutte contre la pollution par les déchets doit permettre en particulier une limitation du gaspillage des ressources, une contribution à l'économie d'énergie et la valorisation des produits. L'accent porte principalement sur l'élimination des déchets ménagers dans des conditions favorables à l'environnement. La biotechnologie appliquée aux problèmes de l'environnement devrait permettre le traitement, l'élimination et la valorisation des déchets ménagers.

Le traitement des ordures ménagères par les procédés biotechnologiques peut s'effectuer par voie aérobie ou anaérobie. L'application de l'une ou de l'autre voie consiste en une gestion de la matière organique présente dans les déchets valorisables (Mustin, 1987). En effet, les ordures ménagères produites au Liban sont, selon la FAO (Food & Agricultural Organization, 1994), constituées pour 55 à 65 % de matières fermentescibles, et pour 3 à 6 % de métaux et de matières plastiques.

L'orientation vers de nouveaux procédés de gestion des ressources, en particulier le traitement des ordures ménagères par méthanisation, permet de résoudre partiellement le problème de la réduction des nuisances provoquées par les déchets ménagers (Barlaz et al., 1987, Barlaz et al., 1989, Bogner et al., 1989). La méthanisation se présente comme un procédé d'élimination et de traitement des ordures ménagères avec plusieurs avantages :

- réduction des nuisances et protection de l'être humain dans son cadre de vie ;
- production d'un biogaz valorisable énergétiquement ;
- production d'un amendement organique mature utile aux sols appauvris en matières organiques.

Plusieurs paramètres physico-chimiques de fonctionnement d'un réacteur de méthanisation en discontinu doivent être contrôlés (Chawakitchareon P, 1990). Le procédé appliqué doit aboutir à un digestat d'une valeur agronomique satisfaisante et à une production optimale de biogaz dans des conditions convenables à l'environnement (Mouton et al., 1985).

Les objectifs de cette recherche sont les suivants :

- mise au point sur l'ensemble des points permettant la maîtrise du procédé de méthanisation des ordures ménagères ;
- étude de la qualité du digestat, de sa composition en métaux lourds et de sa valorisation.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description du pilote de biométhanisation

La méthanisation des ordures ménagères a été effectuée dans un digesteur-fermenteur schématisé par la figure 1.

L'installation comprend les éléments suivants :

- un réacteur-fermenteur composé de deux unités en acier galvanisé de forme cylindrique et de 60 litres en volume chacune. L'unité principale constitue le fermenteur proprement dit et l'unité d'appoint achève la fermentation ;
- un bain-marie chauffé à l'aide d'une résistance réglable permettant de maintenir une température constante à 37 °C ;
- un gazomètre comportant deux flacons de 2 litres chacun, le premier (F₁) contenant une solution d'acide sulfurique (1.10² N), le second (F₂) recevant le liquide déplacé. Ce système a servi à la mesure du volume du biogaz produit par le déplacement d'un volume équivalent du liquide. La récupération du biogaz pouvait suivre les deux circuits C₁ ou C₂ suivant les besoins de mise en marche du pilote ;
- un système d'agitation mécanique à hélice a servi au brassage et à l'homogénéisation de la masse du broyat en fermentation. Le fermenteur principal a été alimenté par 25 kg d'un broyat d'ordures ménagères.

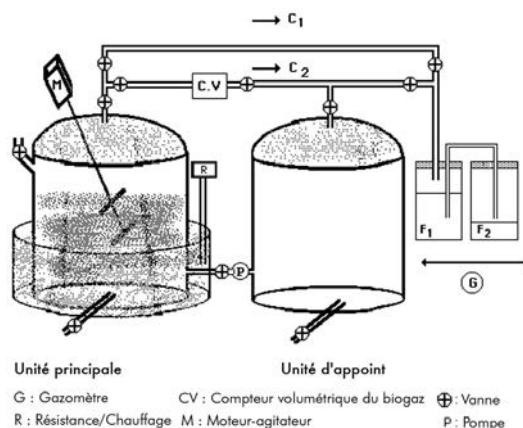


Figure 1 : Schéma de l'installation de biométhanisation des ordures ménagères

Protocole expérimental

La fermentation par voie anaérobie permet la valorisation des ordures ménagères. La figure 2 décrit la méthodologie proposée pour évaluer la faisabilité technique du procédé de méthanisation.

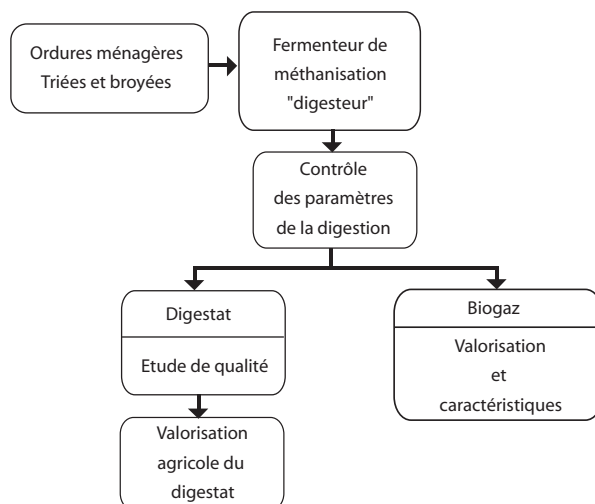


Figure 2 : Protocole expérimental suivi pour le traitement des ordures ménagères par voie anaérobie.

Le contrôle de chacune des opérations du traitement était indispensable afin de maintenir un fonctionnement satisfaisant de l'installation expérimentale.

Paramètres de suivi du fonctionnement du fermenteur

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des ordures ménagères au cours de la méthanisation a été suivie par le contrôle des différents paramètres de fonctionnement du système de fermentation. Les paramètres de contrôle sont les suivants :

- pH et température ;
- Matières sèches (MS) exprimées en % ;
- Matières organiques (MO) exprimées en % de MS ;
- Taux alcalimétrique complet (TAC) exprimé en g.L⁻¹ ou "complete alcalimetric rate" (CAR) ;
- Acide gras volatils (AGV) exprimé en g.L⁻¹, ou "volatile fat"

acids'' (VFA) (Degrémont SA, tome 1)

- Carbone organique (CO) exprimé en g.L^{-1} déterminé par la méthode Anne (Bonneau et Souchier, 1979).
- Azote total exprimé en g.L^{-1} (méthode Kjeldahl, Afnor) ;
- Production journalière de biogaz exprimée en mL.jour^{-1} ;
- Valorisation du digestat ou du méthacompost.

Les analyses ont été effectuées selon les recommandations AFNOR et Degrémont.

Le contrôle du pH a été effectué régulièrement. Le pH a été maintenu entre 7 et 8 tout au long de notre étude. La chute du pH a été équilibrée en chaulant le digesteur par une solution de chaux éteinte (10 g.L^{-1}) favorisant ainsi la phase méthanogénique et équilibrant le système réactionnel.

Parallèlement à la détermination des paramètres physico-chimiques pour la valorisation du digestat, la teneur des métaux lourds (Zn, Cu, Fe, Pb, Hg, Cd) a été recherchée par spectrophotométrie d'absorption atomique (Degrémont, 1989).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le suivi expérimental régulier nous a permis de noter plusieurs points.

Température

La production du biogaz dépend directement de la température. Une phase mésophile a été maintenue entre 35 et 37 °C pour l'obtention d'une activité optimale des bactéries méthanogènes transformant les acétates en méthane.

Des températures élevées supérieures à 45 °C augmentent les vitesses des réactions et favorisent la production de CO_2 et de H_2O au lieu du méthane.

pH et AGV

Le pH a une importance primordiale pour l'accomplissement de la phase méthanogénique, puisqu'une diminution du pH entraîne une inhibition du processus de méthanisation.

La variation du pH dépend de l'évolution de la fermentation de la matière organique ; le pH diminue avec la production des AGV durant la phase acidogénique.

Les AGV produits lors de l'acidogénèse suite à l'hydrolyse des matières organiques ont évolué avec le temps. Ils ont été dégradés en H_2 et en acétate. Ce dernier s'est transformé en méthane au cours de la méthanogénèse. La figure 3 décrit l'évolution des AGV au cours du temps. Les variations observées ne suivent pas une allure déterminée et sont aléatoires en fonction du degré d'avancement des réactions chimiques entraînant la formation de plusieurs composés propres à la méthanogénèse.

Rapport AGV/TAC et AGV

La teneur des AGV formés est élevée, et la moyenne des valeurs du rapport AGV/TAC est de 0,93 ; la valeur maximale est de 1,19. Ce rapport reste élevé et dépend de la qualité hétérogène des ordures ménagères et en particulier de leur charge en matières organiques biodégradables. La teneur globale des AGV détermine le taux de la dégradation des matières organiques.

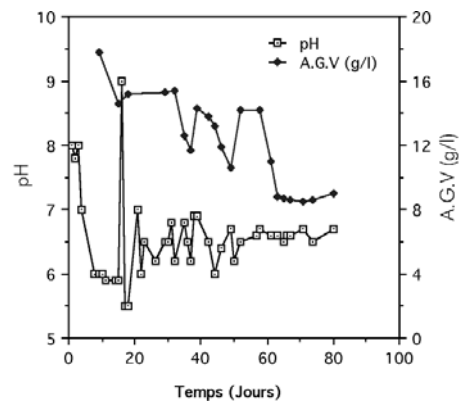


Figure 3 : Variation des AGV et du pH au cours du temps d'expérimentation.

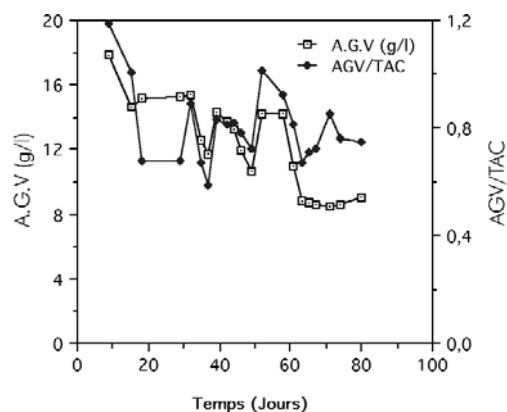


Figure 4 : Profil de variation du rapport AGV/TAC et des AGV en fonction du temps.

La figure 4 décrit le profil des fluctuations observées qui sont remarquables, en particulier avec les AGV. En effet, toute augmentation des acides organiques est accompagnée d'une élévation d'acidité du milieu et par suite d'une augmentation du rapport AGV/TAC. Un équilibre dynamique doit être établi entre les groupes de microorganismes acidogènes et méthanogènes. Cet équilibre a été maintenu par les bicarbonates formés qui confèrent au système un pouvoir tampon. L'équilibre du pH dépend de la concentration de bicarbonate qui est en équilibre avec le dioxyde de carbone (CO_2) produit. Des conditions favorables aux bactéries méthanogènes doivent être maintenues en veillant à ce que les bactéries acidogènes ne produisent plus d'acides organiques.

Evolution de la matière organique (MO)

L'évolution de la matière organique au cours du temps est un critère de la transformation de la fraction fermentescible des matières organiques oxydables. Cette fraction est susceptible de fournir des acides gras volatils (AGV) qui, par la suite, produisent le biogaz riche en méthane (CH_4).

La décomposition des matières organiques dépend de la nature des ordures ménagères, en particulier de la fraction biodégradable. La figure 5 montre une production maximale des AGV après 10 jours d'expérimentation ($17,8 \text{ g.L}^{-1}$) ; elle est moyenne après 50 jours de suivi expérimental ($10,2 \text{ g.L}^{-1}$) et minimale après 72 jours d'expérimentation ($8,8 \text{ g.L}^{-1}$).

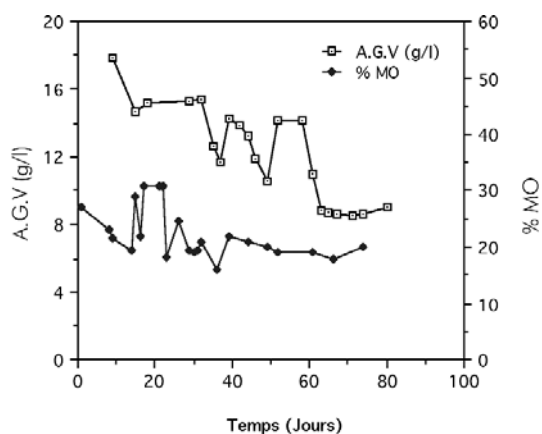


Figure 5 : Evolution des AGV et de la matière organique du broyat des ordures ménagères au cours de l'expérimentation.

Nos résultats montrent que la biodégradation des matières organiques est intense. Ceci traduit l'existence d'une activité satisfaisante qui tend à stabiliser les matières organiques biodégradables présentes dans les ordures ménagères. Cette stabilisation s'effectue en faveur de la production des AGV.

Production du biogaz

La figure 6 décrit le profil d'évolution du biogaz dans le digesteur. Une phase de latence d'une durée de deux semaines a été observée au terme de laquelle une production maximale de biogaz a eu lieu. La production se prolonge en décroissant lentement sur une période de 32 jours. Pendant toute cette phase, aucun apport de broyat d'ordures ménagères n'a été effectué.

La production du biogaz mesurée au cours de cette période dans un fermenteur en discontinu dépend de la cinétique de la dégradation du substrat utilisé.

Nous avons remarqué que le volume de biogaz produit était réduit. Ce résultat est en rapport avec la faible teneur en fraction fermentescible, ce qui pose un problème pour le compostage et entraîne un déséquilibre entre la fraction dégradée et celle indésirable. De ce fait, l'hétérogénéité des ordures et leur complexité entravent la méthanisation. Les ordures destinées aux digesteurs doivent être riches en composés organiques fermentescibles.

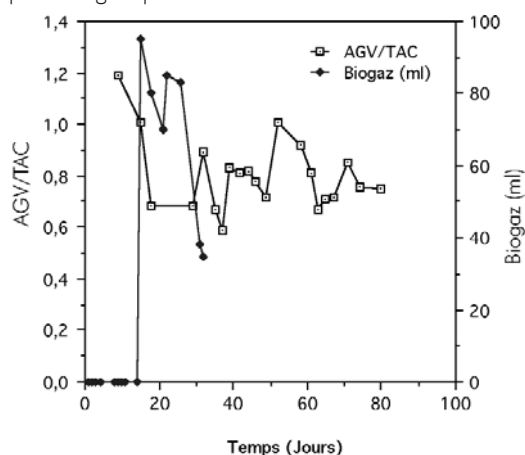


Figure 6 : Profil d'évolution du biogaz et du rapport AGV/TAC dans le digesteur en fonction du temps.

La diminution de la production du biogaz est accompagnée d'une production importante des AGV et d'une chute du pH, ce qui est en accord avec les difficultés souvent rencontrées dans le fonctionnement d'un système discontinu (figure 6). Après 32 jours, la méthanisation a été inhibée ; seule la phase acidogène s'est poursuivie.

Production du biogaz en fonction du taux de matière organique (MO).

La production de biogaz observée est très faible. En effet, le broyat des déchets utilisés contenait une grande proportion de MO non biodégradable. Le tableau 1 regroupe les résultats de cette production par rapport au pourcentage en MO.

Temps en jours	MO (%)	Biogaz (ml)	Biogaz (mL.kg ⁻¹ MO)
15	29,03	95	3,28
18	30,78	80	2,59
21	30,82	70	2,28
22	30,88	85	2,75
26	24,54	83	3,38
31	19,38	38	1,96
32	20,96	35	1,67

Tableau 1 : Production de biogaz par rapport au pourcentage en matière organique des ordures ménagères.

Le rendement de la production de biogaz est faible par rapport à la teneur en matières organiques des ordures utilisées. Le temps de séjour a été déterminé suite à l'arrêt total de la production de biogaz. Le cumul du volume de biogaz produit correspond à 18 mL.kg⁻¹ de MO.

L'abattement de la matière organique est de 42 %. Ce taux est très faible par rapport à la nature et à la teneur en matière organique biodégradable des ordures ménagères utilisées.

La figure 7 montre les variations des MO biodégradables par rapport à l'évolution de la production du biogaz au cours de nos expérimentations. Nous avons constaté que la transformation de la MO en biogaz se poursuivait normalement selon le processus de la méthanisation. Le seul inconvénient est la quantité minimale de biogaz dégagé.

L'amélioration des résultats de la fermentation anaérobie peut avoir lieu en augmentant régulièrement et progressivement le taux des MO facilement biodégradables. La production du biogaz serait alors plus importante.

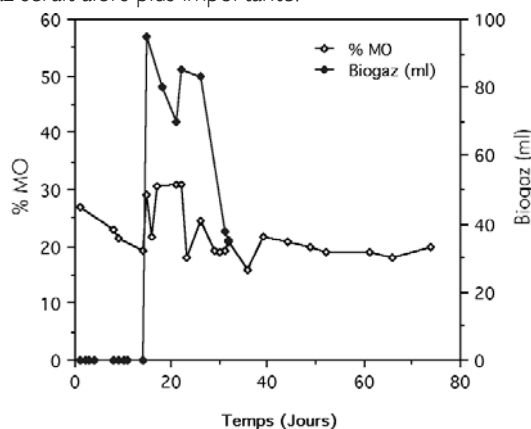


Figure 7 : Profils d'évolution des matières organiques et du biogaz dans le digesteur en fonction du temps.

Qualité des ordures ménagères digérées (digestat)

Le digestat obtenu contient une quantité satisfaisante de matière organique stabilisée par la fermentation qui pouvait être facilement utilisable comme amendement organique pour les sols appauvris en humus. Le tableau 2 regroupe les propriétés du digestat obtenu.

Paramètres	Broyat	Digestat	Caractéristiques préconisées par les normes françaises
pH (eau)	7,35	6,9	6,8 - 7,2
% MS	67	83,5	/
% MO de la MS	49	42	> 20
Carbone organique (g.I. ¹)	26,93	24,6	< 40
Azote total (mg.g ¹)	1,73	1,45	< 2 (% MS)
C/N	19,24	16,96	< 20
Cu (ppm)	91,5	50	≤ 800
Zn (ppm)	363	200	≤ 1000
Fe (ppm)	1915	1032	Non défini par les normes
Pb (ppm)	57,2	0,18	≤ 800
Cd (ppm)	1,1	0,12	< 8
Hg (ppm)	1,03	0,5	< 8
Microorganismes			
Anaérobies	Présence	Présence	Néant
Aérobies	Présence	Néant	Néant
Champignons	Présence	Néant	Néant
Escherichia coli	Présence	Néant	Néant
Salmonelles	Présence	Néant	Néant
Staphylocoques	Présence	Néant	Néant
Matières étrangères			
Verres < 10 mm	Néant	Néant	Néant
Plastiques	Néant	Néant	Néant
Cailloux	Néant	Néant	Néant
Morceaux de fer	Néant	Néant	Néant

Tableau 2 : Caractéristiques des ordures ménagères digérées sèches.

Les valeurs indiquées montrent que les paramètres physico-chimiques caractérisés par le pH, les MS, les MO, le CO et les matières azotées sont acceptables. Le rapport C/N inférieur à 20 montre que le digestat est « mûr ». La teneur en métaux lourds est conforme aux normes maximales admises.

Une fraction de cette matière organique est non biodégradable. Ainsi, le digestat assure une source d'azote organique appréciable, un apport en éléments nutritifs majeurs et en oligo-éléments.

Notons que la présence de microorganismes aérobies n'a pas été décelée et que les matières étrangères (verres, plastiques, cailloux, fer) sont absentes. Le digestat est de qualité acceptable et son affinage et son ensachage sont faciles.

Etant donné que la teneur en MO dans le digestat est relativement faible par rapport à d'autres déchets valorisables, il est recommandé de mélanger les ordures ménagères brutes avec d'autres déchets valorisables afin d'augmenter la charge en matières organiques fermentescibles.

Evolution des métaux lourds au cours de la méthanisation

L'évolution du processus de méthanisation s'accompagne d'une fluctuation de l'acidité du milieu, surtout au cours de l'hydrolyse des matières organiques et de leur transformation en acides gras volatiles. Ce passage se traduit par une hausse du pH du milieu et l'addition de la chaux permet la correction de l'acidité suite à la production massive des AGV.

En effet, le lessivage des métaux lourds au cours de la fermentation des ordures ménagères est un phénomène

courant. L'action de la chaux sur les métaux lourds, surtout dans des valeurs de pH optimales comprises entre $4 < \text{pH} < 11$ entraîne leur insolubilisation et leur fixation sous forme d'hydroxydes métalliques, et facilite leur récupération dans le lixiviat.

Ainsi, une réduction sensible de la teneur en sels et en métaux lourds a été observée dans le digestat. Ceci constitue un moyen d'amélioration de la qualité chimique du digestat.

Les résultats de la variation de la teneur de divers métaux lourds au cours de la méthanisation et le conditionnement (séchage) du digestat sont regroupés dans le tableau 3.

Métaux lourds	Broyat	Au cours de la méthanisation	Digestat	Caractéristiques préconisées par les normes françaises
Cu (ppm)	91,5	68	50	≤ 800
Zn (ppm)	363,0	249	200	< 1000
Fe (ppm)	1 945	2 090	1 032,5	Non défini par les normes
Cd (ppm)	1,0	0,128	0,119	≤ 8
Pb (ppm)	57,2	12,8	0,175	≤ 800
Hg (ppm)	1,03	0,8	0,5	≤ 8

Tableau 3 : Evolution de la teneur des métaux lourds au cours de la digestion des ordures ménagères.

Les valeurs obtenues montrent que la teneur en métaux lourds des ordures digérées (méthacompost) est bien moindre que celle fixée par la norme NFU 44 051. Ainsi, son utilisation comme amendement ne présente aucun risque pour la végétation et pour les sols.

Problèmes d'inhibition de la production du biogaz

Les problèmes d'inhibition sont liés à plusieurs facteurs :

1. Brassage

La difficulté est d'obtenir une homogénéisation de la masse du broyat pendant la fermentation afin de faciliter la liquéfaction et par suite l'hydrolyse des matières organiques. La recirculation de la liqueur à travers un échangeur thermique devrait permettre une méthanisation convenable et une production satisfaisante de biogaz.

2. Production des AGV

Une production excessive des AGV au cours de l'hydrolyse entraîne une chute rapide du pH du milieu et par suite une inhibition de la méthanisation.

3. Système en discontinu

Après 35 jours de fermentation anaérobie et en discontinu, nous avons remarqué une baisse nette de la teneur des MO et une production du biogaz. La progression temporelle du processus de fermentation entraîne une diminution du taux des matières organiques dans le fermenteur et une production de biogaz.

CONCLUSION

Notre objectif était d'étudier la voie anaérobie du compostage comme moyen de valorisation de la matière organique et de réduction des nuisances.

Le procédé de méthanisation utilisé pour le traitement des ordures ménagères a permis de mettre en évidence les points suivants :

- les paramètres de fonctionnement nécessaires à la production optimale du biogaz sont une température variable entre 35 °C

et 37 °C, un pH moyen compris entre 6,8 et 7,4, et une homogénéisation de la masse par brassage pour la maintenir aussi uniforme que possible.

- la valeur moyenne du rapport AGV/TAC est égale à 0,93. Cette valeur est élevée. Elle traduit une production intense des acides organiques et des carbonates.

- le digestat produit est mature, humide, contenant des MO facilement utilisables pour l'agriculture. La teneur en matière organique correspond à 16 % en masse de matière sèche. Ceci constitue une source fertilisante convenable pour les sols appauvris en matières organiques.

- la teneur en métaux lourds du digestat a été réduite grâce à la chaux ajoutée pour maintenir un pH convenable à la méthanisation.

- le brassage par intermittence, la production excessive d'AGV et l'utilisation d'un système en discontinu inhibent le processus de méthanisation.

Cette expérimentation constitue une étape importante vers une bonne maîtrise du traitement des ordures ménagères et une meilleure gestion des déchets ménagers. Des améliorations devraient être apportées au niveau de l'agitation par un brassage permanent à l'aide d'un échangeur thermique, et par une meilleure humidification de la masse en fermentation.

Le choix de la méthanisation en discontinu pour des quantités réduites de déchets doit être précédé par un système convenable de collecte, de tri et de broyage. Les conditions de fonctionnement optimales doivent être bien maîtrisées afin d'obtenir un biogaz riche en méthane et un digestat de qualité satisfaisante.

Ainsi, la méthanisation assure la préservation de l'environnement tout en contribuant à la réduction des nuisances et à la gestion d'une ressource valorisable.

Références bibliographiques

Afnor, 1981. Norme U44 051. Amendements organiques : dénominations et spécifications.

Afnor, 1986. Recueil de normes françaises. Eaux méthodes d'essai, Paris.

Aoun J., 1994. Contribution à l'élimination et au traitement des déchets ménagers, rapport de recherches, 40 pages, Université libanaise (UL), Faculté des Sciences II, Liban.

Aoun J., Sfeir N., 1997. Etude de l'évolution physico-chimique et organique d'un fermenteur anaérobie d'ordures ménagères. Rapport de recherches, 84 pages, CNRS libanais, Fac. des Sc. II (UL) et Fac. des Sc. Agro - Université Saint-Esprit de Kaslik (USEK), Liban.

Barlaz M.A., Milke M.V., Ham Belevi H., 1987. Gas production parameters in sanitary landfill simulators, Waste Management & Research, n° 5, pp. 27-39.

Barlaz M.A., Schaeffer D.M., Ham R.K., 1989. Bacterial population development in sanitary characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill, Appl. Environ. Microbiol., n° 55, pp. 55-56.

Bogner J.E., Rose C., Piorowski R., 1989. Modified biochemical methane potential (BMP) assays to assess biodegradation potential of landfill refuse, in proceedings 5th International Conference on solid wastes, sludges and residual materials : characterization, technology, management and public health, Rome, 26-29 April.

Bonneau M., Souchier B., 1979. Constituants et propriétés du sol. Ed. Masson, tome 2, 459 p.

Chawakitchareon P., 1990. Etudes descriptives de décharge de déchets et recherche de critères permettant d'estimer le potentiel méthanique des ordures ménagères et/ou d'orienter leur traitement. Thèse de DEA de l'INSA, Toulouse, Université de Chulalongkorn, Bangkok, Thaïlande.

Degrémont SA, 1989. Mémento technique de l'eau, Tomes I-2, 9^e édition, Paris, I 450 p.

Desaint J., 1993. Ordures ménagères, élimination et valorisation énergétique. La technique moderne, n° 5-6-7, pp. 42-46.

FAO (Food and Agricultural Organization). Utilization of composts consultants report rate, April 13th 1994.

Lardinois I., 1993. Technology transfer for development waste consultants organic waste, Urban solid waste series 1, pp. 43-49, 91-99.

Mouton C., Beckelynyck J., Albagnac G. et Dubourguier H.C., 1985. Production et récupération de biogaz produit par les ordures ménagères enfouies en décharge, TSM, L'eau, n° 9, pp. 391-404.

Mustin M., 1987. Le compost : gestion de la matière organique, Edition François Dubusc, Paris, 954 pages.

Remerciements :

Cette étude a bénéficié de l'appui financier du Centre National de Recherches Scientifiques Libanais (CNRSL) et de l'appui technique des laboratoires de l'Institut National des Recherches Agronomiques Libanais (NRAL).