

BILANS ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DE L'UTILISATION EN COGÉNÉRATION DU BIOGAZ ISSU DU TRAITEMENT DES EAUX USÉES URBAINES

Ioan Bitir*, Mohand Tazerout** et Olivier Le Corre**

*Université Politehnica de Bucarest, ** École des mines de Nantes

Le but du travail est de présenter une méthode rapide pour estimer l'effet énergétique et environnemental de l'utilisation du biogaz issu du traitement des eaux usées urbaines. Les émissions atmosphériques analysées sont composées du méthane et du dioxyde de carbone, principaux gaz à effet de serre. Un moteur thermique en cogénération est utilisé pour valoriser le biogaz. Les résultats prouvent que l'utilisation du biogaz en cogénération offre une autonomie énergétique importante pour une usine de traitement des eaux usées urbaines. L'impact environnemental (réduction de l'émission de CH_4 et de l'effet de serre global) représente un aspect important pour évaluer une exploitation biogaz.

The aim of this paper is to present a fast method to consider the energy and environmental effect of the use of biogas (resulting from municipal waste water treatment) in cogeneration. The analyzed atmospheric emissions are composed by methane and carbon dioxide, principal gases producing greenhouse effect. A spark ignition engine, as CHP cell, is used for biogas valorisation. An example of calculation for a real case offers estimated values, useful to take a decision concerning a biogas plant. If biogas is composed by 65% of methane, electric needs are provided by CHP cell for a specific production greater than $0.18 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ waste water and heat is provided from 69% of methane. The results prove that the use of biogas in cogeneration offers significant energy autonomy for a municipal waste water treatment plant. The environmental impact (reduction of the presence of CH_4 and the greenhouse effect) represents a significant aspect to evaluate a biogaz exploitation.

INTRODUCTION

Les procédés biologiques d'épuration sont généralement mis en œuvre dans une chaîne de traitement des eaux usées urbaines. Le traitement anaérobie (appelé encore méthanisation) s'envisage comme première étape biologique pour éliminer 70 à 80 % de la pollution organique.

Les auteurs ont fait une recherche sur les unités de traite-

ment des eaux usées urbaines qui utilisent des moteurs à biogaz pour une meilleure valorisation du potentiel énergétique. La puissance installée des moteurs en fonction du débit journalier de biogaz produit est présentée sur la figure 1. Cette statistique est réalisée à partir de plusieurs exemples, recensés dans le monde : Europe, Amérique de Sud, Australie, etc.

Dans cet article, nous étudions d'une part les bilans énergétiques et d'autre part les émissions environnementales, afin de permettre un audit des installations existantes.

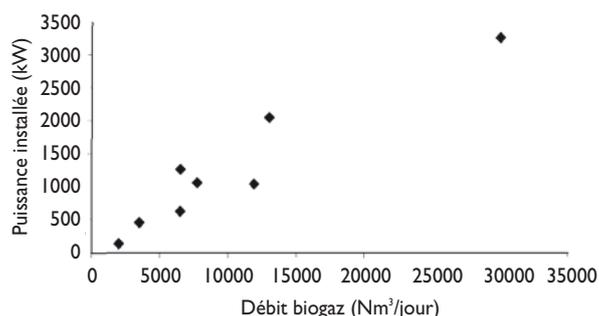


Figure 1 : Puissance électrique installée pour une centrale de cogénération à biogaz issu du traitement des eaux usées

DESCRIPTION DU TRAITEMENT DES EAUX

Le schéma classique d'une installation de traitement est présenté sur la figure 2. Dans la partie de préparation, constituant la sédimentation primaire, les particules solides en suspension se déposent et sont éliminées.

L'oxydation est la deuxième étape du procédé. L'eau subit une aération et un mélange avec des micro-organismes actifs. L'air qui est injecté par les diffuseurs permet d'avoir suffisamment d'oxygène pour permettre aux micro-organismes d'agir.

Ce processus est suivi d'une décantation pour séparer les particules de l'eau. Les micro-organismes sont retournés vers l'aérateur pour continuer le processus de nettoyage. Les boues résultantes du processus de traitement primaire

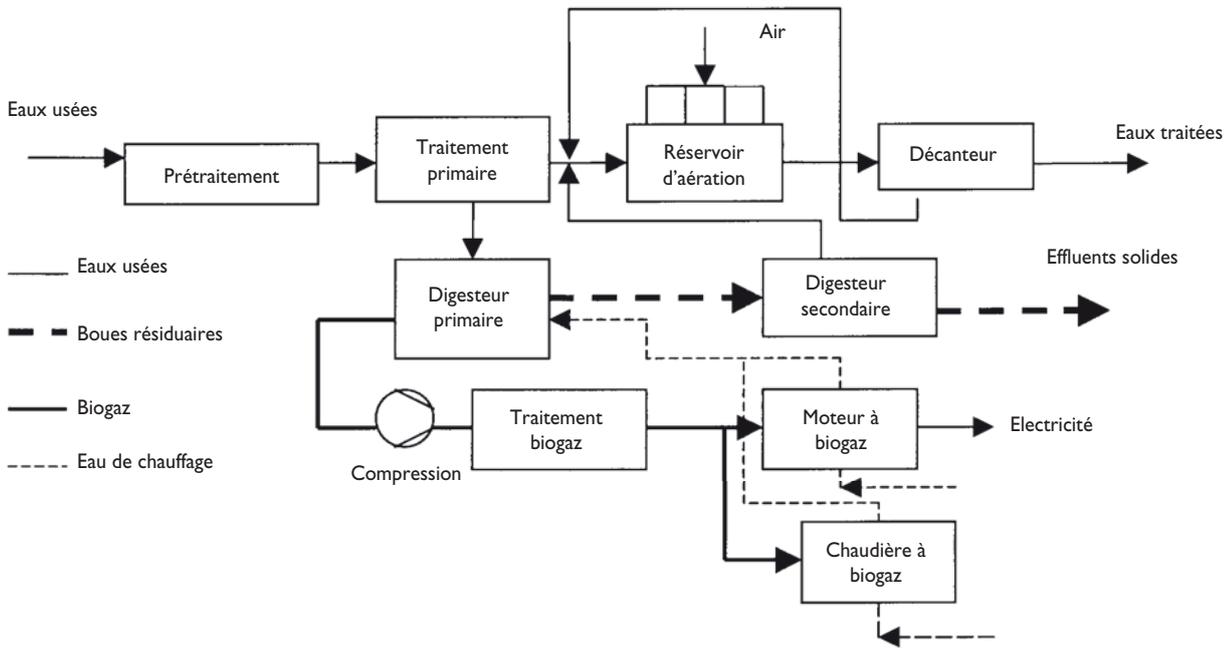


Figure 2 : Schéma de traitement activé des eaux usées avec l'utilisation du biogaz en cogénération [1]

sont séchées dans un digesteur primaire chauffé. Dans le réacteur primaire, en l'absence d'oxygène, les bactéries se développent, réduisant, principalement, les polluants en de simples acides gras organiques, du méthane et du dioxyde de carbone.

Le temps de rétention des effluents dans le digesteur est de l'ordre de 20 à 30 jours pour une température de 30~35°C. En fonction de la composition physico-chimique des boues, l'efficacité du processus de digestion anaérobie est variable. Le rendement d'épuration est exprimé comme le rapport entre la quantité de matière organique volatile digérée et celle totale :

$$d = \frac{C_v^{dig}}{C_v} \quad (1)$$

Déterminer la quantité de biogaz produit par le traitement d'une certaine quantité d'eaux usées s'avère extrêmement difficile. Les principaux facteurs qui influencent la décomposition des MO en suspension sont : la température, le pH, le temps de séjour, etc. La production volumique spécifique de biogaz (par mètre cube d'eau traitée) est notée v^b :

$$v^b = \frac{V^b}{V_{eaux}} \quad (2)$$

Le biogaz contient de 55 à 80 % de méthane et de 20 à 45 % de dioxyde de carbone. La teneur en méthane dépend seulement de la composition en matières organiques de l'eau. Elle n'est pas fonction du débit d'eau traitée [2]. L'épuration du biogaz consiste à retirer les composants

indésirables. Quel que soit l'usage final du biogaz, il est quasiment impossible de l'utiliser tel que produit. Les substances à éliminer, pour permettre une utilisation du biogaz en cogénération, sont : l'eau, les organo-halogénés et le soufre [3].

BILANS ÉNERGÉTIQUES

Tenant compte du contenu en énergie primaire (exprimé par le PCI du biogaz), on peut déterminer les quantités d'électricité et de chaleur maximales produites. En fonction des besoins locaux, et de leurs courbes de variation journalière, on estime les quantités d'énergie économisées (ou substituées) par l'utilisation de la cogénération.

À partir de la structure du processus de traitement des eaux, on peut exprimer les consommations électriques spécifiques pour les différentes étapes du traitement de l'eau. La chaleur nécessaire pour assurer les conditions optimales de digestion, s'exprime en fonction de la production spécifique de biogaz et de la quantité de chaleur q nécessaire pour produire 1 Nm³ de biogaz par digestion anaérobie :

$$e_{ai}^{eaux} = e_{ai}^{aérobie} + e_{ai}^{dig} \quad (3)$$

$$e_{ch}^{dig} = q \cdot v^b \quad (4)$$

Le moteur à biogaz produit de l'électricité et de la chaleur. Il est possible de faire un bilan pour vérifier si le biogaz peut assurer lui-même les besoins énergétiques de la filière de traitement. Pour ce faire, on intègre les consommations électriques supplémentaires, nécessaires pour traiter le biogaz. Il s'agit essentiellement d'une compression pour permettre l'épuration du soufre. Pour un débit spécifique de biogaz,

l'énergie électrique spécifique consommée s'exprime par :

$$e_{el}^{comp} = k^{comb} \cdot v^b \cdot \varphi^{comp} \quad (5)$$

Le pouvoir calorifique du biogaz est une fonction de la concentration en méthane C_{CH_4} (%). Pour l'exprimer, on introduit le pouvoir calorifique

$$PCI_{rap} \left(\frac{Wh}{\% CH_4 \cdot Nm^3} \right) \text{ ramené à une concentration de 1 \%}$$

concentration en méthane. À partir de la relation (2), l'énergie spécifique pour le traitement de chaque m^3 d'eau usée est :

$$e^b = v^b \cdot PCI_{rap} \cdot C_{CH_4} \quad (6)$$

Une partie de l'énergie exprimée par la relation (6) est transformée en électricité. Une autre est rejetée sous forme de chaleur. À l'aide du rendement électrique du moteur, on écrit :

$$e_{el}^b = \eta_{el}^b \cdot v^b \cdot C_{CH_4} \cdot PCI_{rap} \quad (7)$$

De même, on obtient l'énergie thermique :

$$e_{th}^b = \eta_{th}^b \cdot v^b \cdot C_{CH_4} \cdot PCI_{rap} \quad (8)$$

Du fait de plusieurs niveaux de température, l'efficacité de la récupération n'est pas complète. On a donc introduit un rendement de récupération et on aboutit à :

$$e_{th,réc}^b = \eta_{th}^{réc} \cdot \eta_{th}^b \cdot v^b \cdot C_{CH_4} \cdot PCI_{rap} \quad (9)$$

Le bilan électrique spécifique net s'effectue sur la différence entre la production et la consommation de l'installation de traitement des eaux.

$$\varnothing e_{el} = e_{el}^b - e_{el}^{cons} \quad (10)$$

$$\varnothing e_{el} = e_{el}^b - (e_{el}^{eaux} + e_{el}^{comp}) \quad (11)$$

On peut écrire le bilan thermique spécifique net :

$$\varnothing e_{th} = e_{th,réc}^b - e_{th}^{dig} \quad (12)$$

Si $\varnothing e$ est négatif alors la totalité de l'énergie est utilisée *in situ*, sinon il y a un excès d'énergie pour lequel il faut trouver un usage.

BILANS ENVIRONNEMENTAUX

La figure 3 pose la problématique de l'analyse environnementale. On définit la décomposition maximale théorique comme l'émission directe dans l'atmosphère de la méthanisation des boues.

Pour estimer ce volume, on utilise l'efficacité du processus de digestion. À partir des relations (1) et (2), on peut écrire :

$$v_{nat}^b = \frac{v^b}{d} \quad (13)$$

Ce volume de biogaz incaptable est une source de pollution atmosphérique¹. La teneur en méthane et en dioxyde de carbone sont données par la composition chimique des déchets. Le volume spécifique de CH_4 et de CO_2 pouvant être rejeté dans l'atmosphère s'expriment par :

$$v_{nat}^{CH_4} = v^b \cdot \frac{C_{CH_4}}{d} \quad (14)$$

$$v_{nat}^{CO_2} = v^b \cdot \frac{C_{CO_2}}{d} \quad (15)$$

De plus, pour assurer les besoins énergétiques de la filière

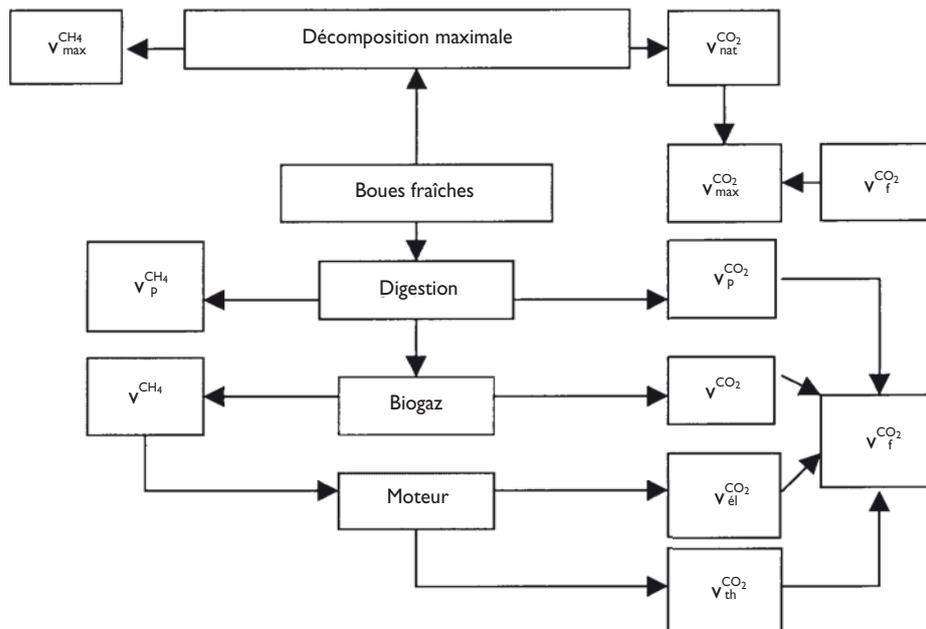


Figure 3 : Schéma pour l'analyse écologique du processus anaérobie

de traitement des eaux, sans la digestion anaérobie, une quantité d'énergie électrique est nécessaire. Une pollution supplémentaire est donc à introduire pour cette production d'électricité (que l'on suppose produite par une centrale thermique gaz). Il faut déterminer cette pollution atmosphérique en CO₂ supplémentaire. La réaction de combustion stœchiométrique est :



La quantité d'électricité produite peut être exprimée en fonction du volume de CH₄ :

$$E_g = \eta_{\text{él}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4} \cdot V_g^{\text{CH}_4} \quad (17)$$

Donc,

$$V_g^{\text{CH}_4} = \frac{E_g}{\eta_{\text{él}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4}} \quad (18)$$

En utilisant les relations (16) et (18), on obtient :

$$V_g^{\text{CO}_2} = \frac{E_g}{\eta_{\text{él}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4}} \quad (19)$$

$$V_g^{\text{CO}_2} = \frac{E_{\text{él}}^{\text{aérobie}}}{\eta_{\text{él}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4}} \quad (20)$$

La quantité totale de CO₂ rejetée en atmosphère est, donc :

$$V_{\text{max}}^{\text{CO}_2} = V_{\text{nat}}^{\text{CO}_2} + V_g^{\text{CO}_2} \quad (21)$$

L'effet de serre ES produit par le méthane est de 20 fois plus grand que celui du dioxyde de carbone², on écrit :

$$ES_{\text{max}} = ES_{\text{nat}} = V_{\text{nat}}^{\text{CH}_4} \cdot 20 + V_{\text{max}}^{\text{CO}_2} \quad (22)$$

Le volume spécifique de CH₄, respectivement CO₂, obtenu après la digestion anaérobie est :

$$V^{\text{CH}_4} = v^b \cdot C_{\text{CH}_4} \quad (23)$$

$$V^{\text{CO}_2} = v^b \cdot C_{\text{CO}_2} \quad (24)$$

En supposant que le volume de biogaz récupéré passe par le moteur, il résulte :

$$V_{\text{cogé}}^{\text{CO}_2} = v^b \cdot C_{\text{CH}_4} \quad (25)$$

À une quantité \varnothing_e correspond une quantité de CO₂ rejetée ou évitée. Si le bilan est négatif, on utilise l'électricité produite par la centrale thermique à gaz *in situ*. On rejette à l'atmosphère un volume $\varnothing_{\text{él}}^{\text{CO}_2}$. Inversement, si le bilan est positif, le même volume est évité. À partir de l'équation (20), on écrit :

$$\varnothing_{\text{él}}^{\text{CO}_2} = - \frac{\varnothing_{\text{él}}}{\eta_{\text{él}}^b \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4}} \quad (26)$$

En ce qui concerne le bilan thermique, on considère que la quantité de chaleur supplémentaire est produite dans une chaudière à gaz. La relation de combustion reste la même. La relation (19) devient :

$$\varnothing_{\text{th}} = \eta_{\text{th}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4} \cdot \varnothing_{\text{g}}^{\text{CH}_4} \quad (27)$$

$$\varnothing_{\text{g}}^{\text{CH}_4} = - \frac{\varnothing_{\text{th}}}{\eta_{\text{th}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4}} \quad (28)$$

Couplant (20) et (28), on aboutit à :

$$\varnothing_{\text{th}}^{\text{CO}_2} = - \frac{\varnothing_{\text{th}}}{\eta_{\text{th}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4}} \quad (29)$$

Pour obtenir l'impact environnemental relatif des polluants, on fait le rapport entre les valeurs finales et celles maximales.

$$R_{\text{CH}_4} = - \frac{V_f^{\text{CH}_4}}{V_{\text{max}}^{\text{CH}_4}} = (1 - d) \quad (30)$$

Pour le dioxyde de carbone, on a :

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{V_f^{\text{CO}_2}}{V_{\text{max}}^{\text{CO}_2}} \quad (31)$$

L'expression de l'effet de serre maximal (22) devient :

$$ES_{\text{max}} = v^b \left(\frac{C_{\text{CH}_4}}{d} \cdot 20 + \frac{C_{\text{CO}_2}}{d} \right) + \frac{e_{\text{él}}^{\text{aérobie}}}{\eta_{\text{él}}^g \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4}} \quad (32)$$

De même, on peut exprimer l'effet de serre final, comme le résultat de l'utilisation du biogaz en cogénération :

$$ES_f = V_f^{\text{CH}_4} \cdot 20 + V_f^{\text{CO}_2} \quad (33)$$

avec

$$V_f^{\text{CH}_4} = v^b \cdot \frac{C_{\text{CH}_4}}{100} \cdot \left(\frac{100-d}{d} \right)$$

$$V_f^{\text{CO}_2} = V_{\text{nat}}^{\text{CO}_2} + V_{\text{cogé}}^{\text{CO}_2} + \varnothing_{\text{él}}^{\text{CO}_2} + \varnothing_{\text{th}}^{\text{CO}_2}$$

La variation relative de l'effet de serre est définie par :

$$R_{\text{ES}} = \frac{ES_f}{ES_{\text{max}}} \quad (34)$$

APPLICATIONS

Les consommations énergétiques spécifiques nécessaires pour traiter 1 m³ d'eau usée, sont données ci-après^[1] :

- pré-traitement (préparation) : 5,4 Whe,
 - traitement primaire : 9,5 Whe,
 - pompes de recirculation : 17 Whe,
 - pompes de mélangeage : 28 Whe,
 - aération : 130 Whe,
 - sédimentation finale : 5,4 Whe,
- soit une consommation totale : 195,3 Whe.

On estime que la chaleur utilisée pour le chauffage du digesteur est de l'ordre de 1500-2000 Wh/Nm³. La pression de compression exigée pour assurer le traitement du biogaz est entre 1-4 bar. Le PCI_{rap} se trouve entre 105-115 Wh/(%CH₄*Nm³biogaz).

La figure 4a présente la variation de la consommation et de la production électrique spécifique en fonction de la concentration en méthane et de la production spécifique de biogaz obtenue par le traitement anaérobie ($\eta^{\text{comp}} = 0,8-0,9$; $\eta_{\text{él}}^b = 0,25-0,3$; $\eta_{\text{th}}^b = 0,4-0,5$; $\eta_{\text{th,réc}} = 0,7-0,8$). Par exemple, pour une usine qui produit du biogaz avec une concentration en

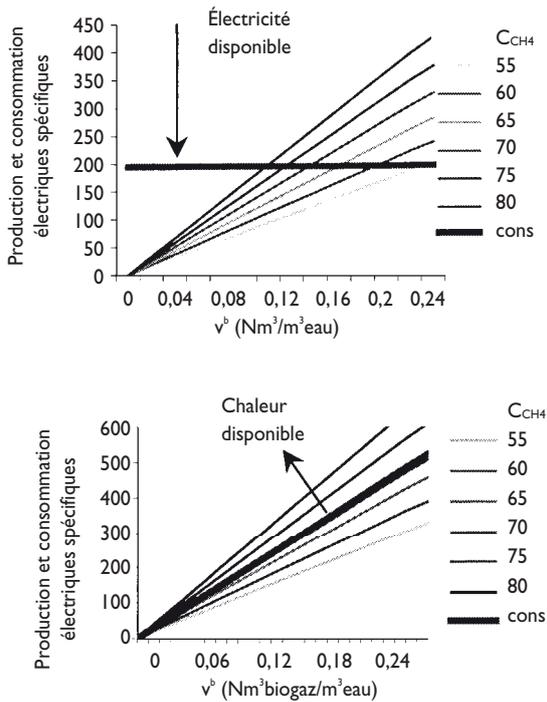


Figure 4 : Productions et consommations énergétiques (a - électriques, b - thermiques)

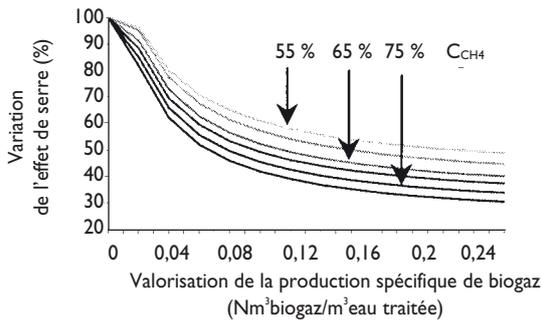


Figure 5 : Variation de l'effet de serre (d = 80 %)

méthane de 65 %, les besoins électriques sont entièrement assurés par l'utilisation du biogaz en cogénération pour une production spécifique supérieure à 0,18 Nm³ biogaz/m³ eau traitée. En ce qui concerne l'autonomie thermique, la figure 4b démontre que pour une concentration en méthane supérieure à 69 %, l'usine de traitement peut assurer les besoins thermiques en récupérant la chaleur rejetée par le moteur à biogaz.

La figure 5 présente la variation relative de l'effet de serre, pour une efficacité moyenne du processus de digestion de 80 % et pour 5 % d'autres composants dans le biogaz. Pour les calculs, on utilise : $\rho_{CO_2} = 1,978 \text{ kg/Nm}^3$; $\rho_{CH_4} = 0,771 \text{ kg/Nm}^3$; $\eta_{el}^g = 0,3-0,5$; $PCI_{CH_4} = 9450 \text{ Wh/Nm}^3$; $\eta_{ch}^g = 0,9-0,92$.

CONCLUSIONS

La cogénération moteur thermique représente une excellente opportunité pour la filière de traitement des eaux

usées. Ce procédé offre dans le même temps le combustible et le consommateur (électrique et thermique). Comme une source d'énergie décentralisée, on garde tous les avantages connus (réductions des pertes de transport et effort financier réduit). Le degré d'autonomie électrique et thermique est suffisamment important pour générer un intérêt conjoint énergétique et environnemental et, donc, un impact financier. L'effet environnemental est exprimé par la réduction de la présence du méthane en atmosphère. Malgré une augmentation de la quantité de CO₂ émis, l'effet de serre général pourrait être réduit jusqu'au 30 % de la valeur initiale.

* Ioan Bitir,
Université Politehnica de Bucarest - UPB - 33 apusului - BL.D4
ESC D Apt 40 - Bucarest 760.63.79 - Roumanie

** Mohand Tazerout et Olivier Le Corre,
École des mines de Nantes - Département systèmes énergétiques
et environnement - 4, rue Alfred Kastler - BP 20722 - 44037
Nantes cedex 3

Notes :

1. Les auteurs ne font aucune distinction entre des gaz à ES (origine fossile ou autres) car les effets sont identiques.
2. Le coefficient est un ordre de grandeur. Le GWP du méthane dépend de l'horizon temporel retenu : 62 pour un horizon de 20 ans, 24,5 pour 100 ans, 7,5 pour 500 ans.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Ademe, en la personne de M. Gérard Matricali, pour le soutien financier apporté à cette étude. Ils tiennent en outre à remercier les deux rapporteurs de la revue pour leurs remarques.

Notations

- C [%] : concentration
- d [%] : efficacité de digestion
- e [Wh/m³] : énergie spécifique
- p [Pa] : pression
- q [Wh/m³] : chaleur spécifique de digestion
- v [Nm³/m³] : production spécifique de biogaz, CH₄, CO₂
- C [m³] : quantité de matière organique volatile
- E [Wh] : énergie
- MO : matière organique
- R [%] : impact relatif
- PCI [J/m³] : pouvoir calorifique inférieur
- V [m³] : volume

Indices

- ch : chaudière
- él : électrique
- g : gaz
- max : maximal
- nat : naturel
- rap : rapporté
- th : thermique

Lettres grecques

- η : rendement
- ρ : densité
- Δ : différence

Exposants

- B : biogaz
- Comp : compression
- Cons : consommée
- dig : digestion
- rec : récupérée
- t : total

Bibliographie

- [1] Zupancic, G.-D; School of environmental sciences, Nova Gorica : Biogaz from waste water treatment.
- [2] Boeglin, J.-C. ; *Traitements biologiques des eaux résiduaires*, décembre 1998, *Techniques industrielles*, J 3942.
- [3] *Energie Plus* – 15 octobre 1998; *Un gaz naturel et renouvelable*, pp. 3-25.
- [4] Caddet; Long-term Reliability from CHP at a Large Sewage Works (Davyhulme, Manchester).
- [5] Caddet; Long-term Reliability from CHP at a Medium sized Sewage Works (Countess Wear, Devon).