

VALORISATION DU BIOGAZ PAR MOTEUR À ALLUMAGE COMMANDÉ UNE APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DU DIMENSIONNEMENT

M. Bereza*, O. Le Corre** et M. Tazerout**
École polytechnique de Varsovie — École des mines de Nantes

Le dimensionnement d'une installation de production d'électricité utilisant du biogaz nécessite de mettre au point un modèle permettant d'intégrer les changements de quantité et de qualité du combustible durant la durée de vie de l'installation. Une description de type « boîte grise » de la combustion du biogaz dans les moteurs à allumage commandé permet d'obtenir la puissance électrique produite en fonction du combustible. Les caractéristiques du biogaz sont modélisées par « journées types ». La décision d'investissement se faisant principalement sur un critère financier, cette analyse introduit la recette électrique, le coût de revient lié à l'investissement et la maintenance. Les résultats présentés permettent de connaître la puissance à installer en fonction du débit de biogaz. Une présentation du « prix plancher », prix minimum pour qu'un projet soit rentable, est présentée.

The size of an electric power plant using biogaz has to be achieved by the development of a model designed to integrate fuel quality and quantity evolutions throughout life duration of the power plant. A description by « grey box » for the biogaz combustion in spark ignition engines allows to estimate the electric power output. The biogaz composition is featured by « typical days ». The investment decision is generally based on economical criteria, the electric trade, the investment and the maintenance costs are introduced. Results show the optimal power output to install according to the available biogaz flow-rate. The « bottom price » for the electric power, which is the minimum price beneath such a project can not make any profit, is presented.

INTRODUCTION

La fermentation méthanique des déchets correspond à une digestion anaérobie, c'est-à-dire à une transformation de la matière organique en méthane et en gaz carbonique par un système microbien complexe fonctionnant en absence d'oxygène. Cette technique consomme peu d'énergie, produit peu de boues et génère un biogaz combustible utilisable de

manières diverses. Sa composition dépend de nombreux éléments :

1. la composition des déchets,
2. la température au cœur de la décharge,
3. la perméabilité de la décharge par rapport à l'atmosphère (l'air est un inhibiteur de la synthèse du méthane),
4. le temps d'entreposage des déchets (figure 1).

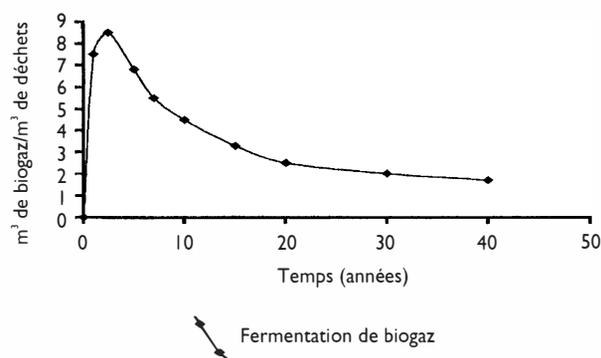


Figure 1 : Production du biogaz en fonction du temps⁽¹⁾

Toutefois, durant la période comprise entre la seconde année et la dixième année, il est possible de définir un biogaz caractéristique par ses trois constituants principaux (tableau 1).

Tableau 1 : Composition volumique du biogaz

Élément	Plage de variation/Contenu moyen
Méthane	30 — 65/45
Dioxyde d'azote	20 — 40/35
Azote	5 — 40/15
Autres	1 — 3 / 1

Le pouvoir calorifique inférieur obtenu est de l'ordre de 25 MJ/Nm³ de biogaz. Une fois traité (soufre et organohalogénés) et asséché, la valorisation de ce dernier peut être réalisée sous différentes formes :

- Injection dans le réseau de gaz naturel sous certaines

conditions drastiques de composition. Le Danemark et les Pays-Bas développent cette valorisation.

– Substitution de carburant dans les transports comme dans l'expérience menée à Lille.

– Valorisation énergétique. Brûler du biogaz dans des chaudières ou des fours est la voie la plus ancienne et la mieux maîtrisée. Produire du travail, généralement converti sous forme d'électricité, a cependant l'avantage de ne nécessiter aucune proximité du consommateur final (contrairement à la chaleur). Pour finir, s'il est possible de valoriser la chaleur nécessaire à la production de travail (le fameux prix à payer à la nature, selon Carnot) sous forme d'eau chaude, on parle alors de cogénération.

Dans cet article, il est proposé une méthodologie de dimensionnement optimal de la valorisation du biogaz par moteur(s) à allumage commandé. Basée sur une distinction entre les variables endogènes et exogènes de l'installation, les équations de conservation de la matière et le premier principe de la thermodynamique permettent de définir une représentation mathématique. Le critère optimal est défini sur les conditions d'achat du vecteur énergétique considéré couplées aux frais d'investissement et de maintenance.

PROBLÉMATIQUE

La problématique de dimensionnement d'une installation de valorisation énergétique du biogaz par moteur(s) se construit sur :

- un gisement de méthane (qualité et quantité),
- une base de données constructeur contenant :
 - la puissance nominale de l'équipement, son fonctionnement à pleine charge et à mi-charge,
 - le coût d'investissement,
 - le coût de maintenance.

L'optimisation consiste donc à déterminer le nombre, la puissance à installer et la conduite de l'installation en fonction du gisement (figure 2).

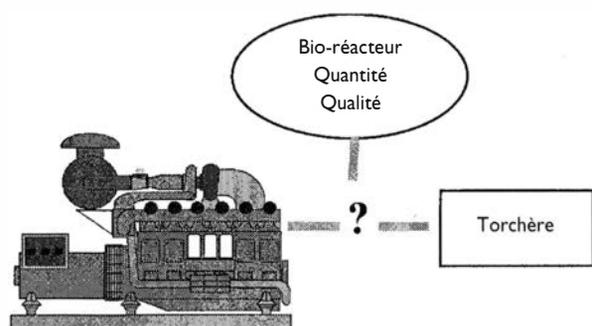


Figure 2 : Valorisation énergétique par moteur à gaz

On peut distinguer deux types d'informations^[2] :

- les données endogènes (technique et économique) : elles ne dépendent que de l'installation,
- les données exogènes (quantité et qualité du biogaz) : elles sont indépendantes de l'installation. Par nature, ces grandeurs

Nomenclature

CR	Coût de revient de l'investissement
I	Investissement
E	Recette électrique
M	Coût de la maintenance
PCO	Pouvoir comburivore
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
P _e	Puissance électrique
N	Nombre de moteurs
T	Durée de vie de l'équipement
i	Taux d'intérêt
q _{BR}	Débit produit par le bioréacteur
q _{bio}	Débit de biogaz dans un moteur
Λ	
q _{bio}	Débit maximal de biogaz
φ	Richesse
η _e	Rendement électrique
% _m CH ₄	Pourcentage massique de méthane

sont la plus grande source d'erreur pour le dimensionnement de l'installation.

DONNÉES ENDOGÈNES

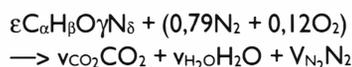
Les données endogènes sont scindées en deux parties :

- le moteur fonctionnant en biogaz,
- le critère financier.

Techniques

Les moteurs fonctionnant au biogaz sont une adaptation des moteurs à gaz naturel. Seuls l'allumage et la carburation sont modifiés.

On appelle pouvoir comburivore PCO d'un gaz combustible, le rapport entre la quantité d'air nécessaire et suffisante pour assurer la combustion complète sans excès ni défaut d'air et la quantité de carburant mis en présence. Il est défini en corrélation avec l'équation chimique de combustion d'un carburant de formulation générique C_αH_βO_γN_δ :



On obtient à l'équilibre : $\varepsilon = 0,21/\alpha + \beta/4 - \gamma/2$

$$PCO = \left(\frac{\text{masse d'air}}{\text{masse de carburant}} \right)_{sto} = \frac{(\alpha + \beta/4 - \gamma/2) (M_{O_2} + 3,76 M_{N_2})}{M_C\alpha + \beta + M_O\gamma + M_N\delta}$$

Pour un biogaz de composition volumique telle que : CH₄ 50 %, CO₂ 35 % et 15 % d'air, on obtient un pouvoir comburivore de 4,8 (la valeur pour le gaz naturel est 16,8). Ainsi, pour obtenir une quantité de méthane presque constante il est nécessaire d'introduire une quantité de biogaz presque 4 fois supérieure à la quantité de gaz naturel.

Valorisation du biogaz

Afin d'abaisser la formation de polluants atmosphériques tels que les monoxydes d'azote, etc., le mélange introduit est dit pauvre car il y a un défaut de carburant par rapport à la quantité de comburant en présence. On définit la richesse φ par :

$$\varphi = \left(\frac{\text{masse de carburant}}{\text{masse d'air}} \right)_{\text{réel}} \text{PCO}$$

Comme le remplissage d'un moteur est indépendant de la qualité du mélange introduit (la dépression créée par le mouvement du piston est indépendante du mélange introduit), la masse maximale, notée q_m du mélange biogaz-air est égale à celle admise lors d'un fonctionnement gaz naturel-air :

$$q_{\text{bio}} = \frac{q_m}{1 + \frac{\text{PCO}}{\varphi}}$$

La production électrique est alors obtenue par :

$$P_e = \eta_e q_{\text{bio}} \%m\text{CH}_4 \text{PCI}_{\text{CH}_4}$$

Avec η_e , le rendement de conversion (mécanique et électrique).

Les moteurs peuvent être amenés à fonctionner à charge partielle ; le rendement dépend de la charge (du débit de biogaz) par^[3-4] :

$$\eta_e = a - b \frac{\hat{q}_{\text{bio}}}{q_{\text{bio}}}$$

Depuis 1987, Ito *et al.* appliquent ce type de modèle pour les moteurs à gaz. Le modèle correspond à des valeurs communément admises :

Pleine charge - rendement 35 %
Mi-charge - rendement 30 %

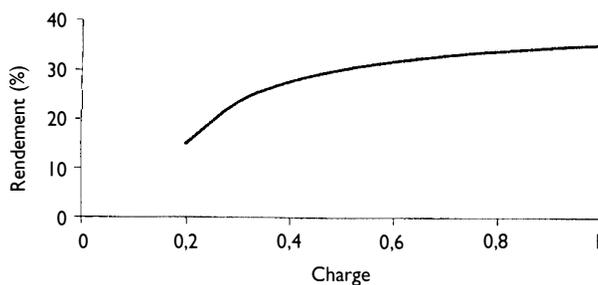


Figure 3 : Évolution du rendement en fonction de la charge

La production électrique dépend donc de la quantité et la qualité du biogaz par l'intermédiaire de :

- la charge du moteur, représentée par q_{bio} ,
- la qualité du biogaz, représentée par le pouvoir comburi-

voire PCO et directement par la teneur massique de méthane $\%m\text{CH}_4$.

Critère financier

L'investissement dans un équipement s'effectue généralement en effectuant une analyse entre les recettes, l'investissement et la maintenance¹ :

- la recette électrique est :

$$E = \int_0^N \sum_{i=0}^N P_e^i \varphi_e dt$$

- le coût de revient CR économique de l'investissement I pour l'installation est réparti sur la durée de vie, t :

$$CR = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} I$$

- la maintenance M est supposée proportionnelle à l'énergie électrique produite :

$$M = \int_0^N \sum_{i=1}^N P_e^i \varphi_m dt$$

Elle nécessite un arrêt du (des) moteur(s). On considérera une disponibilité de 90 %, i.e. 3 jours d'arrêt par mois.

DONNÉES EXOGÈNES

Caractériser le biogaz consiste à effectuer une analyse chimique de sa composition. En phase de dimensionnement ces données sont généralement indisponibles. En outre, la production dépend des ordures ménagères mises dans le centre d'enfouissement.

Il est donc nécessaire d'effectuer des hypothèses sur :

- le pas de discrétisation temporel,
- les valeurs moyennes et les écarts types associés de la quantité et de la qualité du biogaz.

La discrétisation temporelle réside d'un compromis entre le nombre de données à gérer et le temps de calcul. Le choix de « journées types » est réalisé. Ces dernières permettent l'arrêt de l'installation. Par contre, une seule journée type est utilisée par mois pour décrire la production journalière du gisement.

Problème d'optimisation

Le bilan matière consiste à décrire l'utilisation du biogaz produit par le bio-réacteur q_{BR} :

$$q_{\text{BR}}(t) = q_t(t) + \sum_{i=0}^N q_{\text{bio}}^i(t)$$

Cette équation peut être traduite sous la forme suivante :

$$q_{\text{BR}}(t) \geq \sum_{i=0}^N q_{\text{bio}}^i(t)$$

La production d'électricité a été décrite. Une contrainte de dimensionnement est ajoutée :

$$0 \leq q_{\text{bio}}^i(t) \leq \hat{q}_{\text{bio}}^i \delta_i$$

Le problème d'optimisation économique s'exprime sous la forme mathématique :

$$\max_{\delta_i, q_{\text{bio}}} (E - CR - I)$$

La caractéristique générale de ce problème est d'être de grande taille, non linéaire et avec des nombres binaires. Un algorithme générique pour ce type de problème a été développé^[5-6]. Le logiciel GAMS (General Algebraic Modelling Systems) permet une description symbolique du problème. L'utilisateur doit régler les paramètres de convergence de l'algorithme.

Application

Afin de générer des résultats exploitables, le paramètre de référence est la quantité de biogaz produit q_{BR} .

Tableau 2 : Base de données constructeurs
T = 10 ans et i = 3 %

Type	Investissement - Coût de revient
470 kW	2866 kF — 387 kF
740 kW	3495 kF — 500 kF
1 000 kW	4146 kF — 595 kF

Base de données constructeur

La base de données est composée de trois moteurs dérivés d'application en gaz naturel.

Gisement

L'évolution de la quantité en fonction du temps est présentée sur la figure 1. La teneur en méthane est par contre plutôt constante entre la seconde et la dixième année d'exploitation (figure 4).

La teneur volumique d'air est supposée constante et la teneur de dioxyde de carbone considérée comme unique constituant complémentaire.

Résultat

L'étude porte sur les cinq mois tarifaires d'hiver. En effet, le coût marginal d'installation est supérieur au coût de référence en base (nucléaire et ou cycle combiné). La production électrique à partir du biogaz est économiquement rentable sur la semi-base.

La figure 5 présente une allure en escalier. En fonction de la quantité disponible de biogaz, deux possibilités existent :

- soit l'installation est dimensionnée pour fonctionner à charge élevée ;
- soit elle est surdimensionnée pour fonctionner à charge partielle.

L'optimisation réside en fait dans la décision, ou non, d'effectuer l'investissement. Sachant qu'avec le profil de production de biogaz, il est probable que l'installation fonctionnera à charge partielle en fin de vie (par manque de combustible).

A chaque décision d'investissement pour une puissance supérieure, la charge globale de l'installation diminue. On notera qu'elle reste supérieure à 80 %, gamme dans laquelle l'installation fonctionne avec un très bon rendement global (supérieur à 32 %).

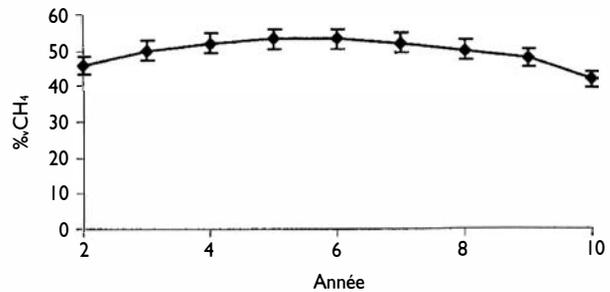


Figure 4 : Teneur volumique de méthane en fonction de l'âge du bioréacteur

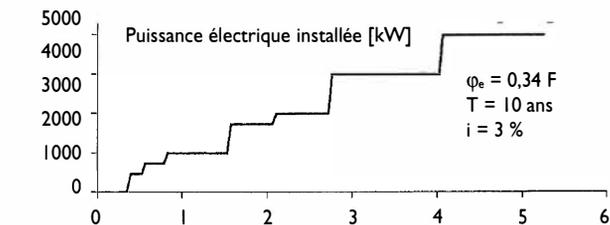


Figure 5 : Puissance électrique en fonction du volume (million de m³) du CET

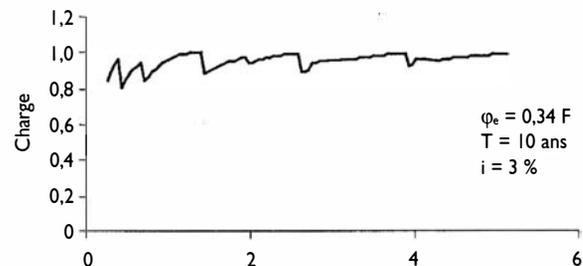


Figure 6 : Charge de l'installation en fonction du volume (million de m³) du CET

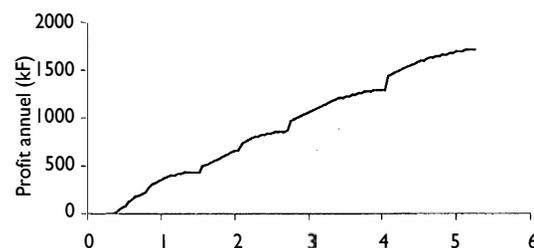


Figure 7 : Gain annuel généré par l'installation en fonction du volume (million de m³) du CET

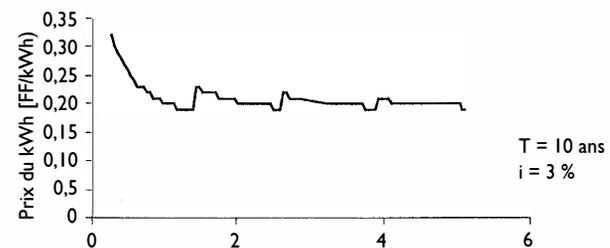


Figure 8 : Prix «plancher» en fonction du volume (million de m³) du CET

Le profit est une fonction monotone croissante en fonction du débit de biogaz généré.

Un résultat important est le prix « plancher » à partir duquel la décision d'investissement est annulée. Il permet aussi de quantifier une partie des risques inhérents à ce type d'études. Un investissement est décidé si et seulement si il génère du profit. A partir des résultats précédents, on peut écrire le profit P sous la forme :

$$P = E - M - I$$

Si le profit est positif, on peut prendre la décision d'investir. Ceci dépend du coût de rachat de l'électricité. Notons avec un indice 1, le critère² pour un prix φ_e^1 , respectivement avec un indice 2 le prix φ_e^2 . On peut écrire :

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1} = \frac{E_e \varphi_e^1}{P_1} - \frac{\varphi_e^1 - \varphi_e^2}{\varphi_e^1}$$

Cette formule permet d'obtenir le prix « plancher », i.e. le prix pour lequel $P_2 = 0$:

$$\varphi_e^p = \varphi_e^1 - \frac{PI}{E_e}$$

Le prix plancher dépend de la puissance installée, de la charge de l'installation. Il dépend donc des mêmes paramètres que précédemment (figure 8).

Ainsi, pour un volume de stockage supérieur à 500 000 m³, le prix de vente de l'électricité pouvant déclencher la décision d'investissement est de l'ordre de 22 à 24 centimes.

CONCLUSION

Le dimensionnement optimal d'une installation de valorisation du biogaz par moteur à allumage commandé est un problème difficile. En fait, le gisement du biogaz (qualité et quantité) est une donnée difficile à quantifier en phase de projet. De plus, le fonctionnement de l'installation s'effectue intrinsèquement à charge partielle car la production de biogaz évolue en fonction du temps. Dans cet article, il est donc proposé une approche par journées types pour la quantité et la qualité du biogaz. Une base de données moteur, basée sur les indications des constructeurs, a été définie. L'exemple traité permet de connaître la puissance à installer en fonction du volume de déchets. De multiples extensions peuvent être faites, néanmoins le niveau de modélisation et les outils mathématiques semblent être adaptés aux objectifs de dimensionnement optimal.

Des contraintes supplémentaires, telles que des taxes sur les émissions de polluants atmosphériques (dioxyde de carbone, oxydes d'azote, etc.) peuvent venir compléter cette étude. Cette approche pourrait ainsi mettre en évidence les processus de régulation, voire les effets pervers.

* **M. Bereza**,
École polytechnique de Varsovie

** **O. Le Corre et M. Tazerout**,
École des mines de Nantes - Département systèmes énergétiques et environnement - 4, rue Alfred Kastler - BP 20722 - 44307 Nantes cedex 3

Notes :

1. Le prix éventuel du biogaz n'est pas présenté dans cette étude car ce dernier doit être au minimum capté et brûlé en torchère.
2. Ce critère est supposé être le résultat d'une optimisation préalable.

Références

- [1] Bereza M., *Optimisation technico-économique de la valorisation du biogaz dans les moteurs à allumage commandé*, travaux de fin d'études - Université Polytechnique de Varsovie (1999).
- [2] Le Corre O., *Optimisation de la conduite et du dimensionnement d'installations de cogénération*, thèse de doctorat Ecole des mines de Paris (1995).
- [3] Ito K., R. Yokoyama and T. Shiba, *Optimal operation of a Diesel engine cogeneration plant including a heat storage tank*, Journal of Engineering for Gas turbines and Power, October, Vol. 114, p. 687-694 (1992).
- [4] Yokoyama R., K. Ito and Y. Hatsumoto, *Optimal sizing of a gas turbine cogeneration plant in consideration of its operational strategy*, Asme Cogeneration Turbo IGTI, Vol 6, p. 363-370 (1991).
- [5] Kocis G. and I. Grossmann, *Computational experience with DICOPT solving MINLP problems in process systems engineering*, Computers Chemical Engineering, Vol. 13, n°3, p 307-315 (1989).
- [6] Duran M.A. and I. Grossmann, *An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs*, Mathematical Programming n°36, p 307-339 (1986).

[4] Yokoyama R., K. Ito and Y.

Rapprocher déchet et design peut paraître singulier. Pourtant, le déchet intervient comme mécanisme de rappel ; au-delà, il interpelle les designers, et plus largement les créateurs. De plus en plus, ils devront avoir une démarche prospective, anticipatrice, préventive, remettre en cause la conception des produits pour mieux tenir compte de l'après-usage et des préoccupations environnementales, qui constituent des valeurs d'avenir.

Et puis, une fois n'est pas assez. Réemploi, réutilisation, recyclage, boucles et cascades, les produits doivent devenir des re-produits, les créateurs des re-créateurs.

Enfin, le produit doit être efficace dans sa mission, ainsi que dans sa démission. Pour les déchets ultimes (à réduire autant que possible), leur concours peut là encore être précieux. Pour libérer l'avenir, le design doit investir le champ du déchet nous dit Gérard Bertolini, économiste, directeur de recherche au CNRS et spéculateur sur l'avenir des déchets.

Format 15,5*24 - 204 pages - 179 F TTC franco de port (169,67 F HT - TVA 5,5 % : 9,33 F)

Société Alpine de Publications

7, chemin de Gordes - 38100 Grenoble
Tél. : 04 76 43 28 64
Fax : 04 76 56 94 09
E.et.T@wanadoo.fr

