

L'optimisation énergétique des procédés de transformation constitue une des réponses les plus efficaces et adoptées face aux nouvelles contraintes européennes dans le secteur de l'énergie et de l'environnement [1] [2] [3]. Ce travail présente comment la brasserie artisanale de Rulles (PME agro-alimentaire) peut, par une installation de biométhanisation couplée à une unité de micro-cogénération, faire de la dépollution de ses rejets d'eaux usées une production énergétique. Le bioréacteur aura comme matière première les eaux usées de la brasserie et produira du biogaz et des eaux quasiment non nocives pour l'environnement. Le biogaz produit servira de carburant pour l'unité de cogénération dont l'énergie produite sera réutilisée. Des unités de stockage tant pour la chaleur que pour le biogaz sont des éléments clés envisagés pour assurer un meilleur fonctionnement du système (Figure 1). Une telle installation remplira donc une double fonction: l'épuration des eaux usées d'une part et la production d'énergie d'autre part.

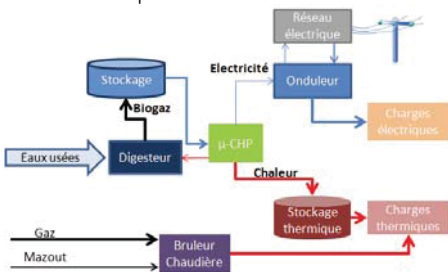
MENTION BIEN

MICRO COGÉNÉRATION À PARTIR DE BIOGAZ: MODÉLISATION ET RENTABILITÉ POUR UNE PME AGRO-ALIMENTAIRE

Patrick Kobou Ngani

Flux énergétique étudié

La brasserie artisanale de Rulles enregistre une évolution moyenne de 27% du volume annuel de bière brassée passant ainsi de 120 hectolitres en 2000 à 2300 hectolitres en 2011 [4]. Elle affiche une consommation énergétique annuelle de 27MWh en électricité, 62 MWh en gaz et 16MWh en mazout. Le processus brassier, avec un potentiel d'énergie récupérable de 1 à 5 kWh/hl de bières produit [5] [6] [7], offre à la brasserie une ressource d'énergie potentielle moyenne de 2300 X 3 kWh soit 6900 kWh par an.



Modélisation des éléments de valorisation énergétique Production de biogaz

La production de biogaz est faite à base des eaux usées générées par la brasserie, principalement des eaux de nettoyage des cuves de brassage. Notre modèle considère une production en gaz constante durant toute l'année. Le débit de gaz produit \dot{V}_{bgaz} peut être calculé connaissant le potentiel énergétique spécifique moyen des eaux usées PC_{ww} , le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du biogaz PCI_{bgaz} et le rendement du digesteur η_{dg} .

$$\dot{V}_{bgaz} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = \eta_{dg} \cdot \frac{V_{bierre} \left[\frac{hl_{bierre}}{an} \right] \times PC_{ww} \left[\frac{kWh}{hl_{bierre}} \right]}{365 \left[\frac{j}{an} \right] \times 24 \left[\frac{h}{j} \right] \times PCI_{bgaz} \left[\frac{kWh}{Nm^3} \right]}$$

$$V_{bierre} = 2300 \frac{hl_{bierre}}{an}, PC_{ww} = 3 \frac{kWh}{hl_{bierre}}, PCI_{bgaz} = 6 \frac{kWh}{Nm^3}, \eta_{dg} = 80\%,$$

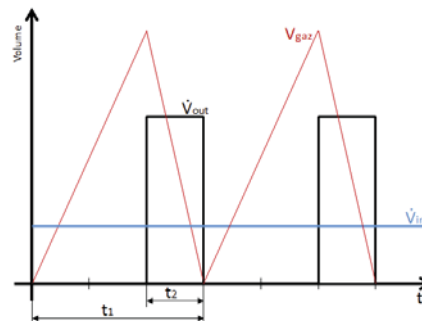
$$\rightarrow \dot{V}_{bgaz} = 0.105 \frac{Nm^3_{gaz}}{h}$$

Stockage du biogaz

Sa capacité maximale est déterminée par le débit de biogaz produit, le débit de consommation de ce biogaz par la cogénération et la réserve maximale souhaitée. Le graphe suivant illustre un comportement simplifié du flux de biogaz dans le réservoir. Le biogaz entre dans le stockage avec un débit \dot{V}_{in} constant pendant tout le temps t_1 , le biogaz n'est puisé du réservoir avec un débit \dot{V}_{out} seulement pendant le temps t_2 (Figure 2). Donc le volume de biogaz dans le réservoir va croître jusqu'au temps t_1-t_2 et décroître pour

atteindre zéro au temps t_1 . Donc le volume maximal que doit avoir le stockage est $\dot{V} = \dot{V}_{in} (t_1 - t_2)$. En supposant que toute la quantité de biogaz produite pendant le temps t_1 est consommée pendant le temps t_2 , on peut écrire: $\dot{V}_{in} \times t_1 = \dot{V}_{out} \times t_2$. Sachant que c'est le moteur de la cogénération qui débite le biogaz du réservoir, on peut écrire:

$$\dot{V}_{out} = \frac{P_{elN}}{\eta_{el} \cdot PCI_{bgaz}} \rightarrow V = \dot{V}_{in} \cdot t_1 \left(1 - \frac{\dot{V}_{in} \cdot \eta_{el} \cdot PCI_{bgaz}}{P_{elN}} \right)$$



Pour une installation de 1kW électrique, et une durée de stockage de 12h, il faudrait un stockage de 1m³ mais seulement 1,2m³ pour la même puissance électrique et le temps de stockage. Cela représente une économie en volume de stockage si on augmentait la puissance du moteur tout en gardant la durée de stockage fixe. Nous choisissons le volume de 3m³: il offre un assez grand temps de stockage donnant ainsi une meilleure flexibilité en terme de pilotage de l'unité de la cogénération.

Unité de micro-cogénération

L'unité de micro-cogénération constitue l'élément central de notre système de valorisation des déchets de la brasserie. Le modèle TRNSYS choisit pour ceci est le type 907 du package «Cogeneration CHP» de la librairie TESS et fournit comme principales informations:

- _Electrical power: la puissance électrique générée P_{el}
- _Exhaust Heat Rate: Puissance thermique des gaz d'échappement \dot{Q}_{ex}
- _Jacket Water Heat Rate: Puissance thermique de l'eau de refroidissement \dot{Q}_{jw}
- _Required heat input: La quantité d'énergie thermique \dot{Q}_{input} nécessaire pour produire l'électricité P_{el}
- _Part Load Ratio: le facteur de charge du moteur PLR qui est le rapport de la puissance électrique fournie P_{el} et de la puissance nominale du moteur P_{eln}

Ces données nous permettent de calculer la consommation en biogaz \dot{V}_{ex} connaissant le PCI du gaz.

$$\dot{V}_{ex} \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{\dot{Q}_{input} [kW]}{PCI_{biogaz} \left[\frac{kWh}{m^3} \right]}$$

Le facteur de charge f_c est la fraction d'heures totale de fonctionnement sur l'année. Le volume total de gaz produit pendant un intervalle de temps t sera totalement consommé par le moteur pendant un temps $f_c \cdot t$.

$$\dot{V}_{biogaz} \cdot t = \dot{V}_{ex} \cdot f_c \cdot t \rightarrow \dot{V}_{biogaz} = f_c \frac{P_{elN}}{\eta_{el} \cdot PCI_{biogaz}} \rightarrow P_{elN} = \frac{\dot{V}_{biogaz}}{f_c} \cdot \eta_{el} \cdot PCI_{biogaz}$$

Avec $\dot{V}_{biogaz} = 0.105 \frac{m^3}{h}$, $\eta_{el} = 0,35$, $PCI_{biogaz} = 6 \frac{kWh}{m^3}$

Nous avons choisi un moteur d'1kW de puissance électrique nominale P_{elN} . Bien qu'on aura un facteur de charge de près de 25%, il pourra toujours être utilisé dans le futur jusqu'au moment où la production de bière sera 4 fois supérieure à la production actuelle.

Stockage thermique

L'énergie thermique produite par la cogénération est stockée dans un ballon d'eau chaude stratifié dont le flux d'eau et d'énergie dans le ballon est illustré par:

L'apport énergétique venant de la source thermique $Q_s = \dot{m}_h C_p (T_h - T_N)$, et la charge thermique $Q_l = \dot{m}_L C_p (T_l - T_N)$. Les couples (\dot{m}_h, T_h) et (\dot{m}_L, T_l) représentent les propriétés d'entrée et de sortie de la source chaude; (\dot{m}_L, T_l) et (\dot{m}_L, T_l) celles de la source froide.

Performances

Performance énergétique et environnementale

Il est important de se rappeler que l'installation a aussi pour but de dépolluer les eaux de la brasserie, donc nous devons ajouter aux besoins électriques la consommation électrique qui serait faite pour une épuration aérobie qui est d'environ 1kWh/kg_{DCO} [8]. Avec un taux de pollution d'eaux usées de 0,87 kg_{DCO}/hl de bière produite soit 1990 kWh d'électricité par an.

La consommation en énergie primaire est définie par sur base d'une production énergétique $E_p = \frac{E_{th}}{\eta_{th}} + \frac{E_{el}}{\eta_{el}(1-\tau)}$ à partir d'une centrale TGV avec un rendement électrique de 55% et une chaudière à gaz avec un rendement de 98%. Les pertes de distribution de l'énergie électrique τ s'élève à 5% [9]; E_{th} est la consommation en chaleur et E_{el} celle en électricité. L'économie en énergie primaire serait de 10 MWh /an pour une consommation initiale (sans valorisation des eaux usées) de 145 MWh. Ceci représente donc une économie relative en énergie primaire de 6,8%.

Bilan énergétique de la brasserie			
		Valeurs	Unités
Biogaz	Production biogaz	923	m ³
	PCI biogaz	6	kWh/m ³
	Energie totale biogaz	5538	kWh
Micro-cogénération	puissance nominale	1	kW
	rendement électrique	34	%
	rendement thermique	52	%
	heures de fonctionnement	1893	heures
	Taux de charge	21.6	%
	production électrique	1882.92	kWh
production thermique	2879.76	kWh	
Dépollution	Quantité DCO à dépolluer	1990	kg _{DCO}
	Cout de dépollution aérobie	1	kWh/kg _{DCO}
	Cons. élec dépollution	1990	kWh
Besoins	Besoins thermiques digesteur	432.0	kWh
	Besoins électriques de base	40467.4	kWh
	Besoins gaz (propane)	55910.7	kWh
	Besoins mazout	6354.8	kWh
	Besoins thermiques	62265.6	kWh

Economie d'émissions		
	Valeur	Unité
Economie en élec	3872.9	kWh
Energie finale élec.	7412.3	kWh
Coéf. d'émissions gaz	0.251	kgCO ₂ /kWh
Economie - elec.	1860.5	kgCO₂
Economie en chaleur	2447.8	kWh
Energie finale chaleur	2719.8	kWh
Coef. d'émissions prop.	0.267	kgCO ₂ /kWh
Economie - chaleur totale	726.2	kgCO₂
Economie totale	2586.7	kgCO₂

La performance environnementale de l'installation se résumera à l'économie d'émissions de gaz à effet de serre (GES) exprimée en tonnes de CO₂ équivalent. Avec Le coefficient d'émission spécifique pour le gaz naturel est de 251kgCO₂/kWh d'énergie primaire et 267kgCO₂/kWh pour le gaz liquide [10] [11], la brasserie réalise une économie d'émissions totale de 34 tonnes de CO₂ équivalents soit l'économie relative de 6,6% (2586/39171). Cette valeur est importante pour l'octroi de certificats verts représentant ainsi une variable importante pour la rentabilité économique.

Performance et sensibilité économique

La performance économique de l'installation dépend de nombreuse variables et hypothèses que nous rapprocherons le plus de la réalité.

Durée de vie de l'installation

La durée de vie de l'installation sera basée sur celle des éléments ayant la plus courte. Nous allons choisir 15 ans qui est la durée de vie minimale pour les moteurs à combustion externe [12]. Le taux d'actualisation i choisi est de 5%.

Investissement

Le coût de l'investissement du système est la somme des coûts d'acquisition et d'installation des différents éléments constituant le système. Avec une puissance électrique nominale d'1 kW, un rendement électrique de 32% et 54% de rendement thermique, les investissements sont:

- L'investissement pour la construction du digesteur sera considéré nul car l'épuration des eaux usées devraient obligatoirement être faite. Nous estimons que l'argent qui serait dépensé à mettre en oeuvre une épuration aérobie couvre les frais de construction du digesteur anaérobie.
 - Le cout d'acquisition et d'installation de la micro-cogénération et du ballon de stockage est de 15000 €/kW électrique
 - Le cout d'acquisition et d'installation du stockage de biogaz est de 1000€/m³ soit 3000€ pour le volume souhaité de 3m³
- Donc l'investissement total s'élève à 18000€.

Recettes

- L'énergie électrique produite est autoconsommée au prix de 0.23 €/kWh avec un taux de croissance annuel de 5% [13].
- Toute l'énergie thermique produite contribue à combler les besoins en chaleur du bâtiment donc représente de l'énergie (gaz, le propane) en moins à acheter. Le propane coute 0,113 €/kWh avec un taux de croissance annuel de 2,4% [13].
- Les certificats verts (CV): D'après la feuille de calculs du nombre de certificats verts de la région Wallonne, l'installation de cogénération recevrait 3,8 CV par an qui valent chacun un minimum de 65 € [14].
- Le coût de dépollution (d'épuration) des eaux usées qui sera dans le cas de présent économisé. Il s'agit ici de l'énergie électrique qui ne sera pas consommée.

Dépenses

- Les dépenses principales liées au fonctionnement du système sont essentiellement les coûts d'entretiens des équipements.
- Les coûts d'entretien de l'unité de cogénération peuvent s'élever à 0,05 €/kWh électrique produit [15].

_Les coûts d'entretien du ballon d'eau chaude et du stockage de biogaz restent minimes et seront considérés nuls, compensés par les coûts d'entretien de l'installation d'épuration aérobie.

_Durant toute la période d'investissement, nous allons supposer une taxe fixe sur les intérêts de 20%.

Valeur résiduelle

En fin de vie de l'installation (la 15^{ème} année d'investissement), on suppose que les équipements auront une valeur totale de 2000.

Valeur actuelle nette du projet

La valeur actuelle nette d'un projet VAN se calcule comme [16]:

$$VAN = \left(\sum PWF_{i,k} (R_k - D_k) \right) + PWF_{i,n} V - I$$

$$PWF = (1 + (1 - t)i)^{-n}$$

_Le facteur d'actualisation PWF (Present Worth Factor)

_La durée de l'investissement n

_La somme des recettes à l'année k R_k ($k \leq 1$)

_La somme des dépenses à l'année k D_k

_Le taux d'actualisation i

_La taxe sur les intérêts t

_La valeur résiduelle du projet à la fin de l'investissement (l'année n) V

_L'investissement initial I

Les calculs de la valeur actuelle nette (VAN) du projet nous donnent une valeur de -10300€ après 15 ans. Ceci veut dire que le projet, sous des différentes hypothèses choisies précédemment, n'est pas du tout rentable. Ceci est principalement dû à la faible teneur en matière organique des eaux usées car la rentabilité du projet dépend fortement de l'économie en énergie réalisable. Il faut aussi ajouter que ces résultats sous-entendent que la chaleur produite par l'unité de cogénération est entièrement valorisée.

Variation de la teneur en matière organique des eaux usées et influence des certificats verts

La teneur en matière organique des eaux usées représentent le critère le plus important de la valorisation et de la rentabilité du projet. C'est elle qui détermine la quantité de biogaz qui sera produit et donc la quantité d'énergie qui sera valorisée. La Figure 3 illustre la quasi linéarité qui existe entre la charge organique la puissance électrique de la cogénération et la VAN du projet que ce soit avec ou sans l'apport des certificats verts. Pour tous les types d'installations (en puissance) et pour toutes teneurs en matière organique des eaux usées, les certificats verts constituent un apport plus qu'important. En fonction de la puissance installée, les CVs rapportent 3 à 12 fois plus que le projet en lui seul aurait rapporté sans l'apport des certificats verts (Figure 4).

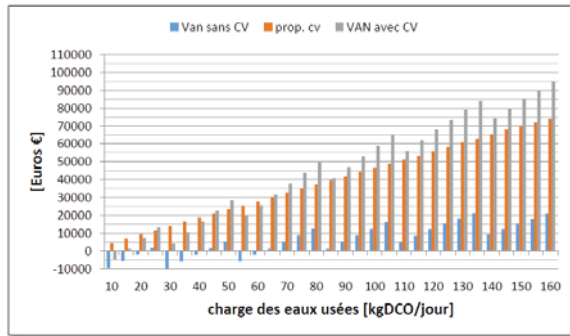
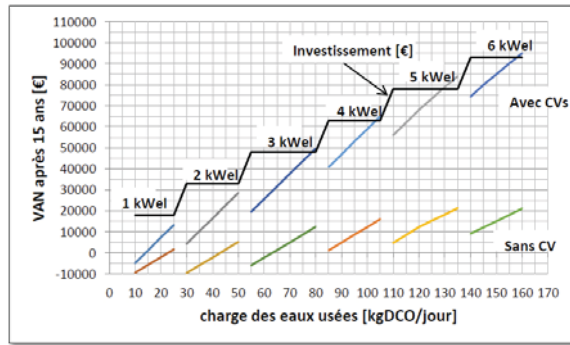
Variation du rendement du système de chauffage

Comme mentionné précédemment, la rentabilité du projet comme calculée dans les cas précédent suppose que toute la chaleur produite par la cogénération est utilisée. Toute diminution du rendement conduit à une diminution de la valeur nette du projet avec l'effet inverse minime sur le temps de retour sur investissement.

Conclusion et perspectives

La valorisation des eaux usées permettrait une économie relative de consommation énergétique de 6,3% soit une meilleure performance environnementale. Cette performance est grandement dépendante de la teneur en matière organique des eaux usées. Il serait donc intéressant d'entreprendre l'intégration de la matière. Néanmoins Le plus grand défi reste la performance économique du projet; il reste non rentable malgré l'apport colossal des certificats verts.

D'où la question de savoir si l'amélioration de notre empreinte écologique, qui passe en majeure partie par l'amélioration des techniques et procédés énergétiques, est d'abord un enjeu économique. Et est-ce que cela devrait encore pour longtemps être supporté par les pouvoirs publics?



- 1_ CE, «Efficacité énergétique: performance énergétique des bâtiments,» [En ligne]. Available: http://europa.eu/legislation_summaries/other/127042_fr.htm. [Accès le 10 03 2013].
- 2_ CE, «L'efficacité énergétique à l'horizon 2020,» [En ligne]. Available: http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/en0002_fr.htm. [Accès le 03 03 2013].
- 3_ CE, «Promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables,» [En ligne]. Available: http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/en0009_fr.htm. [Accès le 09 03 2013].
- 4_ B. A. d. R. sprl, «Historique,» [En ligne]. Available: <http://www.larulles.be/historique/>. [Accès le 09 May 2013].
- 5_ H. Y. e. G. Gu, «Biomethanation of brewery wastewater using an anaerobic upflow blanket filter,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 4, n° %113-4, pp. 219-223, 1996.
- 6_ G. S. Simate, J. Cluett, S. E. Iyuke, E. T. Musapatika, S. Ndlovu, L. F. Walubita et A. E. Alvarez, «The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art,» *Desalination*, vol. 273, n° %112-13, pp. 235-247, 2011.
- 7_ E. Levlín, «Sustainable and Integrated Sewage and Organic Waste Handling with Global Warming Impact, a case study of Aland and Energy recovery by SCWO or anaerobic digestion,» *Dep. of Land and Water Resources Engineering - Sweden, Stockholm*.
- 8_ Waterleau, «Nouvelle énergie à partir d'eaux usées,» [En ligne]. Available: <http://www.waterleau.com/fr/technologie/>. [Accès le 03 June 2013].
- 9_ IEA, «Key World Energy STATISTICS,» 2012. [En ligne]. Available: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>. [Accès le 10 03 2013].
- 10_ B. Environnement, «CERTIFICATS VERTS POUR LA COGENERATION DE QUALITE: UNE AIDE UTILE A LA PRODUCTION D'ELECTRICITE VERTE,» 2011.
- 11_ TWW, «Kennwerte - Umweltfaktoren».
- 12_ D. Six, G. Vekemans et A. Dexters, «Market opportunities for micro-CHP in Flanders (Belgium)».
- 13_ APERE, «PRIX D'ACHAT DE L'ÉNERGIE PAR LES MÉNAGES,» *Renouvellement*, n° %149, Decembre 2012.
- 14_ «Pour répondre à la fois à vos besoins de chaleur et d'électricité, la cogénération,» [En ligne]. Available: <http://energie.wallonie.be/fr/la-cogeneration.html?IDC=7883>. [Accès le 06 June 2013].
- 15_ R. G. Simader, R. Krawinkler et G. Trnka, «Micro CHP systems: state-of-the-art,» *Austrian Energy Agency, Vienna*, 2006.
- 16_ A. Kheiri, *Support de cours - Thermoéconomie, Arlon*, 2012.
- 17_ T. Biogaz, «Biogaz,» [En ligne]. Available: <http://tsiorybiogaz.com/index.php/9-uncategorised/8-biogaz>. [Accès le 18 May 2013].
- 18_ IEA, «Electricity/Heat in Belgium in 2009,» [En ligne]. Available: <http://www.iea.org/countries/membercountries/belgium/>. [Accès le 02 June 2013].
- 19_ UNECE, «Statistical database,» [En ligne]. Available: http://w3.unece.org/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=08_GEFHPrivHouse_r&ti=Private+households+by+Household+Type%2C+Measurement%2C+Country+and+Year&path=.../Database/STAT/30-GE/02-Families_households/. [Accès le 03 June 2013].