



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com



International Journal of Thermal Sciences 41 (2002) 1151–1159

International
Journal of
Thermal
Sciences

www.elsevier.com/locate/ijts

Economie d'énergie en trigénération

Pépin Magloire Tchouate Heteu *, Léon Bolle

*Unité de thermodynamique et turbomachines, département de mécanique, Université catholique de Louvain, place du Levant n° 2,
1348 Louvain-La-Neuve, Belgique*

Reçu le 3 janvier 2001; accepté le 12 décembre 2001

Résumé

La trigénération est définie comme la production simultanée d'électricité, de chaleur et de froid à partir d'une installation alimentée par une même source d'énergie primaire telle le gaz naturel ou le gazole. L'électricité est produite via des moteurs ou turbines à gaz et la chaleur est récupérée au moyen d'une série d'échangeurs sur les circuits de refroidissement des fluides et des fumées d'échappement, dans le but d'optimiser la consommation d'énergie primaire. Tout ou partie de la chaleur récupérée, sous forme d'eau chaude ou de vapeur basse pression, sert à alimenter les réfrigérateurs à absorption pour la production de froid. Cet article développe un modèle de caractérisation de la trigénération en définissant en particulier les conditions et l'index d'économie d'énergie par rapport à la production séparée. Cette étude souligne l'importance du choix de la référence en production séparée sur l'évaluation de l'économie d'énergie et des émissions évitées que peuvent procurer les systèmes de trigénération.

© 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Abstract

Trigeneration is defined as the production of three useful forms of energy—heat, cold and power—from a primary source of energy such as natural gas or oil. For instance, trigeneration systems typically produce electrical power via a reciprocating engine or gas turbine and recover a large percentage of the heat energy retained in the lubricating oil, exhaust gas and coolant water systems to maximize the utilization of the primary fuel. The heat produced can be totally or partially used to fuel absorption refrigerators. Therefore, trigeneration systems enjoy an inherently high efficiency and have the potential to significantly reduce the energy-related operation costs of facilities. In this paper, we describe a model of characterization of trigeneration systems through the condition of primary energy saving and the quality index, compared to the separate production of heat, cold and power. The study highlights the importance of the choice of the separate production reference system on the level of primary energy saving and emissions reduction.

© 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Trigénération ; Cogénération ; Économie d'énergie ; Absorption ; Exergie

Keywords: Trigenation; Cogeneration; Energy saving; Absorption; Exergy

1. Introduction

Dans plusieurs secteurs industriels et dans le secteur tertiaire, les applications des systèmes de cogénération se multiplient à un rythme significatif. La production simultanée d'électricité et de chaleur (eau chaude ou vapeur) par cogénération se trouve en effet soutenue par un certain nombre de motivations convergentes. Le consommateur bénéficie d'économies financière et d'énergie; les entreprises de services énergétiques (y compris les producteurs et les distri-

buteurs d'électricité) y voient un moyen de développer leurs marchés dans de nouveaux créneaux qui s'inscrivent bien dans le processus de libéralisation du marché des énergies et qui bénéficient d'un soutien politique; la collectivité y trouve un triple avantage environnemental, de préservation des stocks d'énergie fossile et d'émergence de nouveaux emplois.

L'avantage énergétique est maximal lorsque ce sont les besoins thermiques qui pilotent le dimensionnement et le régime de fonctionnement des systèmes de cogénération. L'électricité produite est alors fatale et doit impérativement être reprise par le réseau local à des conditions correctes, si les besoins locaux d'électricité sont insuffisants. Un paramètre crucial conditionnant la faisabilité et la rentabilité

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : tchouate@term.ucl.ac.be (P.M. Tchouate Heteu).

Nomenclature

COP	coefficient de performance du groupe à absorption	η_E	rendement de la centrale électrique de référence
COP_C	coefficient de performance du groupe à compression de référence	η_Q	rendement de la chaudière de référence
E	puissance électrique requise W	λ	fraction de chaleur utilisée pour la réfrigération, $= \frac{Q_f}{Q}$
I	index d'économie d'énergie primaire	τ	facteur de Carnot
I_r	puissance perdue par irréversibilité W	ψ	rendement exergetique de l'installation
P	consommation en combustible du cogénérateur W	<i>Indices</i>	
P_f	puissance frigorifique requise W	0	ambiance
Q	puissance thermique demandée W	E	électricité
Q'	puissance thermique du cogénérateur W	f	froid
Q_f	puissance thermique fournie au réfrigérateur à absorption W	p	pertes
R	rendement exergetique de la combustion	Q	chaleur
T	température K	<i>Abréviations</i>	
<i>Lettres grecques</i>			
α_E, α_Q	facteur de conversion par le cogénérateur du combustible en électricité resp. chaleur	URA	unité de réfrigération par absorption
		TGV	turbine Gaz Vapeur (cycles combinés)
		COGEN-URA	groupe de cogénération couplé à une URA

des systèmes est donc le devoir d'utilisation de la puissance thermique disponible en cogénération.

Bon nombre de consommateurs—industriels et tertiaires—ont également des besoins de froid, soit répartis uniformément sur l'année, soit liés à l'évolution cyclique des conditions climatiques. Certaines de ces entreprises ont des besoins en froid satisfaits par des groupes frigorifiques à compression alimentés par de l'électricité. Les unités de réfrigération par absorption (URA) produisent du froid en consommant de la chaleur. Leur combinaison avec des unités de cogénération permet de produire du froid en plus des deux formes d'énergie finale de la cogénération classique : c'est la *trigénération*. Etant donné le développement futur du marché de la trigénération [1,2] aussi bien dans les industries du Nord que dans les pays en développement, appelés à accroître la fiabilité de leur approvisionnement électrique et à des prix raisonnables, aussi bien en zones rurales qu'urbaines, une méthodologie d'analyse de ces systèmes s'avère être un instrument particulièrement utile.

Cet article développe un modèle de caractérisation de la trigénération en définissant en particulier les conditions et l'index d'économie d'énergie par rapport à la production séparée.

2. La cogénération et la réfrigération par absorption

Le couplage de l'unité de cogénération et de l'unité de réfrigération par absorption (URA) permet de valoriser la chaleur cogénérée pour la production de froid, évitant l'utilisation des groupes frigorifiques à compression dont l'énergie mécanique requise pour comprimer le fluide réfrigérant est

environ 50 fois plus élevée [3]. Ce couplage peut se faire de deux manières :

- *Indirecte* : la chaleur cogénérée utile (eau chaude ou vapeur) est disponible aussi bien pour l'URA que pour d'autres applications éventuelles.
- *Directe* : l'URA est seule bénéficiaire de la chaleur cogénérée (fumées). Ce système, plus compact et économique, est moins flexible.

Dans cette étude, seule la cogénération par moteur à gaz est considérée. La plupart des moteurs à gaz disponibles sur le marché présentent des capacités de récupération de chaleur aux sources et niveaux de température suivants : fumées d'échappement (400–550 °C), intercooler (30–80 °C), bloc moteur et lubrifiants (75–120 °C). Le choix des sources de récupération dépendra du niveau de température requis par l'application et de la température d'entrée du cycle à absorption, idéalement supérieure à 85 °C [3]. La Fig. 1 représente le schéma d'intégration d'une unité de trigénération dans le réseau interne d'une entreprise.

3. Quelques modes de comparaison des cycles frigorifiques

Pour comparer la réfrigération par absorption et le cycle classique à compression, Ziegler et al. [4] introduisent la notion d'index de consommation d'énergie primaire (primary energy rate, PER) et le définissent comme la quantité d'énergie primaire consommée pour répondre à une demande unitaire en froid. Les auteurs calculent cet index

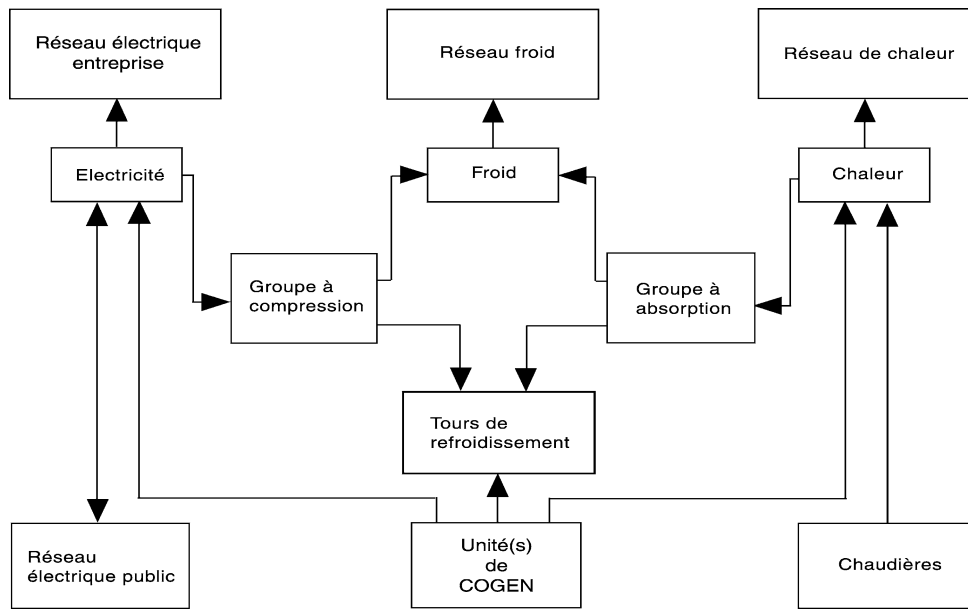


Fig. 1. Schéma d'une installation de trigénération dans une entreprise.

Fig. 1. Trigeneration plant in the energy system of a company.

pour différents systèmes, le système ayant le plus petit PER étant le meilleur.

En conclusion, Ziegler et al. constatent que l'intérêt des machines à absorption dépend de l'application et de l'origine de la chaleur. L'économie d'énergie est assurée lorsque la chaleur provient de la récupération sur effluents chauds des moteurs qui seraient, autrement, soit perdus, soit mal valorisés. C'est aussi parfois le cas lorsque la chaleur est extraite d'une unité de cogénération existante. Par contre, lorsque la chaleur est produite à seule fin d'alimenter directement l'URA, le PER est alors plus élevé que pour un cycle à compression classique. Ce résultat est confirmé par l'étude ponctuelle [5] qui présente les résultats du monitoring d'une installation dans un immeuble de 8000 m².

Une autre analyse Fortuin et al. [6] menée aux Pays-Bas vise à déterminer dans quelle mesure les machines à absorption couplées à une unité de cogénération sont économiquement plus intéressantes que les machines à compression pour les applications de conditionnement d'air à l'aide d'un circuit d'eau glacée 6 °C/12 °C. Elle conclut que pour les besoins en froid de puissance supérieure à 1000 kW et lorsque la chaleur fournie au générateur doit être supérieure à 100 °C, le seuil de rentabilité est atteint pour un coût de la chaleur se situant entre 1,34 et 3,57 EUR·GJ⁻¹ lorsque le prix de l'électricité est compris entre 6 et 9 Eurocent·kWh⁻¹. Ceci permet un délai de récupération du surcoût d'investissement de moins de 5 ans pour une production de 300 à 400 heures/an si la chaleur provient d'un réseau de chaleur résiduelle d'une centrale TGV et de 1 à 2 ans si l'URA fait partie d'une unité de cogénération locale à moteur à gaz. Par rapport à la production séparée de froid et d'électricité, la cogénération électricité et froid par cycle à absorption permet selon les auteurs les gains suivants :

	COGEN locale	COGEN réseau chaleur (TGV)
Energie primaire	10–25 %	30 %
NO _x	–	Env. 50 %
CO ₂	Env. 30 %	Env. 45 %

4. Caractérisation de la trigénération

L'objectif est ici de caractériser plus généralement par des équations simples les conditions d'économie d'énergie primaire dans une trigénération. Cette approche présente l'avantage de favoriser l'évaluation énergétique des systèmes de trigénération en fonction de leurs paramètres et performances techniques, du mode opératoire et constitue une aide à la décision lors du choix des systèmes à implémenter. Cette caractérisation se limite au fonctionnement des installations de trigénération en régime nominal et ne tient donc pas compte des variations de rendements et du coefficient de performance à charge partielle.

4.1. Cogénération froid et électricité

La puissance thermique nécessaire à la production de la puissance frigorifique P_f par l'URA est :

$$Q_f = \frac{P_f}{COP} \tag{1}$$

Le besoin correspondant en énergie primaire pour le cogénérateur vaut :

$$P = \frac{Q_f}{\alpha_Q} = \frac{P_f}{COP \cdot \alpha_Q} \tag{2}$$

Mais simultanément, le cogénérateur produit aussi une certaine quantité d'électricité

$$E = \alpha_E \cdot P$$

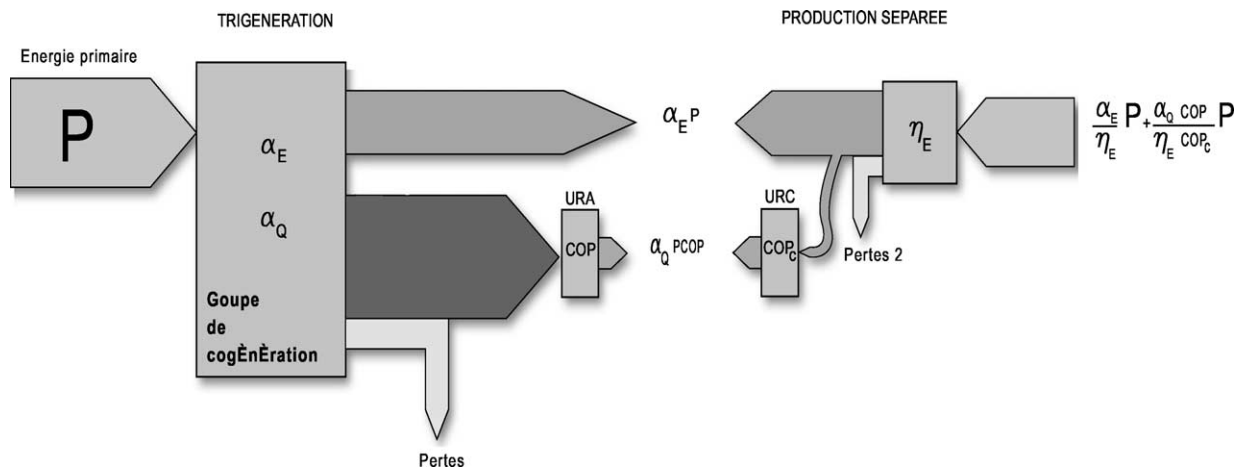


Fig. 2. Comparaison statique de la cogénération froid-électricité et de la production séparée.
 Fig. 2. Static comparison of a combined cold and power production with the separate production.

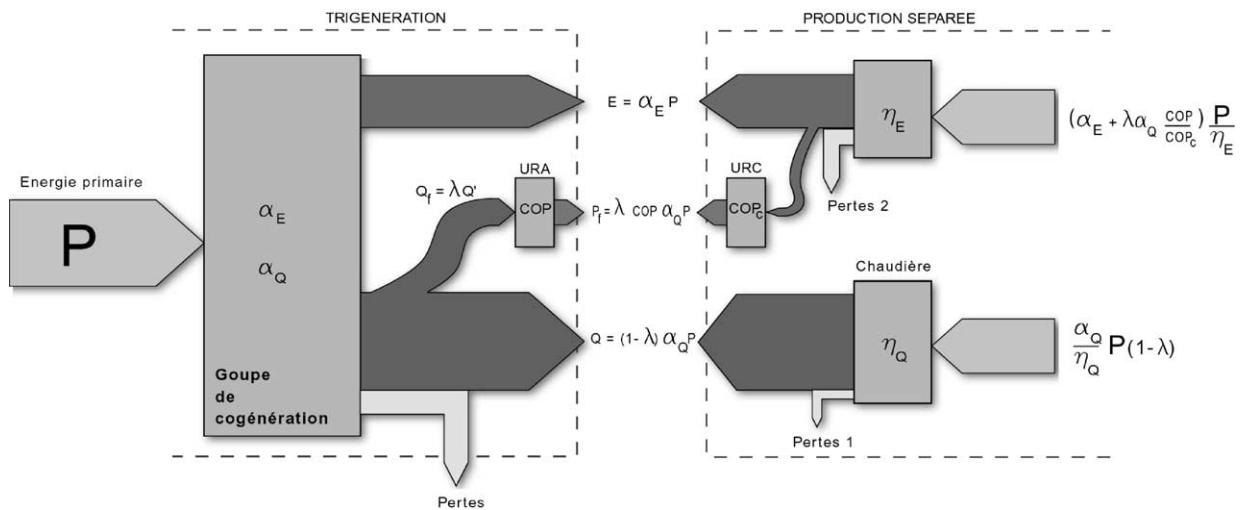


Fig. 3. Comparaison statique de la trigénération et de la production séparée.
 Fig. 3. Static comparison of trigeneration with the separate production system.

La production simultanée des puissances frigorifique P_f et électrique E requiert donc une puissance sous forme de combustible valant P (Fig. 2).

Par comparaison, la production séparée de ces mêmes puissances P_f et E requiert une puissance P' donnée par :

$$P' = \frac{E}{\eta_E} + \frac{P_f}{COP_C \cdot \eta_E} = \frac{1}{\eta_E} \left(E + \frac{P_f}{COP_C} \right) \quad (3)$$

Il y aura économie d'énergie primaire si $P < P'$, ce qui se traduit par la condition :

$$\alpha_E > \eta_E - \alpha_Q \frac{COP}{COP_C} \quad (4)$$

4.2. Cas d'une trigénération simultanée

Désignons par Q la puissance thermique requise, par Q' la puissance thermique produite par le cogénérateur, et par λ la fraction de Q' utilisée par l'URA :

$$Q_f = \lambda Q' \quad (5)$$

$$Q_f + Q = Q' \quad (6)$$

$$Q = (1 - \lambda) Q'$$

$$Q_f = \frac{P_f}{COP} = \frac{\lambda}{1-\lambda} Q$$

Dans le cas présent, la puissance P requise pour l'alimentation du cogénérateur (Fig. 3) vaut :

$$P = \left(\frac{P_f}{COP} + Q \right) \frac{1}{\alpha_Q} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{Q}{\alpha_Q} = \frac{E}{\alpha_E} \quad (7)$$

Par comparaison, la puissance P' consommée sous forme d'énergie primaire pour produire de manière séparée les puissances P_f , Q et E vaut :

$$P' = \frac{E}{\eta_E} + \frac{P_f}{COP_C \cdot \eta_E} + \frac{Q}{\eta_Q} = \frac{\alpha_E}{\alpha_Q} \frac{Q}{1-\lambda} \frac{1}{\eta_E} + \frac{COP}{COP_C} \frac{\lambda}{1-\lambda} \frac{Q}{\eta_E} + \frac{Q}{\eta_Q} \quad (8)$$

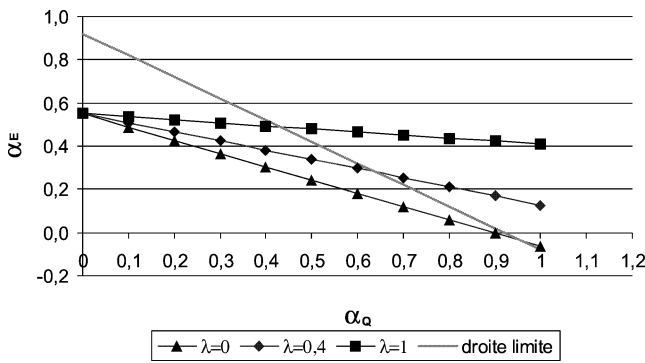


Fig. 4. Représentation des droites d'équilibre entre la production séparée et la trigénération.

Fig. 4. Primary energy consumption equilibrium lines between separate and combined production.

Il y aura économie d'énergie primaire si $P < P'$, ce qui conduit à la condition :

$$\alpha_E > \eta_E - \left(\lambda \frac{COP}{COP_C} + \frac{\eta_E}{\eta_Q} (1 - \lambda) \right) \alpha_Q \tag{9}$$

Dans le cas extrême où $\lambda = 1$, on retrouve évidemment le résultat précédent, relatif à la cogénération froid et électricité.

A l'opposé, si $\lambda = 0$, on retrouve la condition classique pour la cogénération chaleur-électricité :

$$\alpha_E > \eta_E \left(1 - \frac{\alpha_Q}{\eta_Q} \right) \tag{10}$$

Le graphique de la Fig. 4 représente pour différentes valeurs de λ l'ensemble des caractéristiques des moteurs à gaz pour lesquelles la consommation d'énergie primaire est la même tant pour la production séparée que pour la production simultanée. Au dessus de chaque droite est située la surface des points pour lesquels la trigénération permettrait d'économiser de l'énergie. Cette surface est limitée vers le haut par la droite limite puisque la somme des facteurs α_E et α_Q ne peut dans la majorité des cas être supérieure à 0,9 si l'on tient compte des pertes. Notons que la référence est ici une TGV ($\eta_E = 0,55$) combinée à un groupe à compression ($COP_C = 5$) ; la chaleur est produite dans une chaudière ($\eta_Q = 0,9$).

5. Index d'économie d'énergie

Nous définissons un index d'économie d'énergie primaire (I) pour la trigénération qui représente le gain relatif d'énergie primaire par rapport à la production séparée. Il est donné par la relation :

$$I = \frac{P' - P}{P'} = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_E}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\eta_Q} - \left(\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} - \frac{COP}{COP_C} \frac{\alpha_Q}{\eta_E} \right) \lambda} \tag{11}$$

Considérons deux références de production séparée pour le calcul de l'index d'économie énergétique :

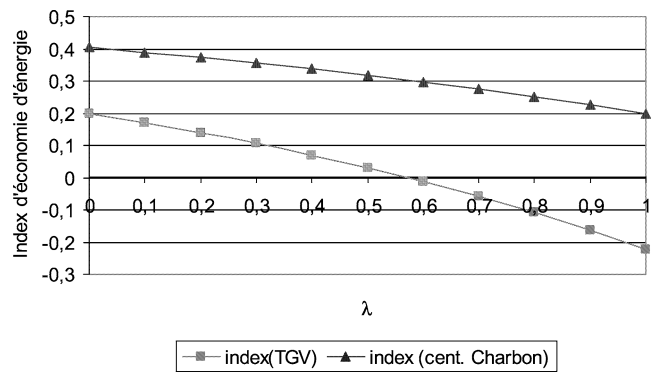


Fig. 5. Index d'économie d'énergie en fonction de λ .

Fig. 5. Quality index of a trigeneration system as a function of λ .

- référence I : centrale à charbon $\eta_E = 0,36$ chaudière à gaz $\eta_Q = 0,90$
- référence II : centrale TGV $\eta_E = 0,55$ chaudière à gaz $\eta_Q = 0,90$

Si nous supposons d'une part le COP du groupe à compression égal à 5, celui du groupe à absorption égal à 0,7 et un moteur à gaz dont les caractéristiques sont $\alpha_E = 0,38$ et $\alpha_Q = 0,53$, nous pouvons écrire les relations suivantes :

- par rapport à la référence I :

$$I(\lambda) = 1 - \frac{1}{1,644 - 0,383\lambda} \tag{12}$$

- par rapport à la référence II :

$$I(\lambda) = 1 - \frac{1}{1,280 - 0,454\lambda} \tag{13}$$

Pour le cas ainsi calculé, le graphique de la Fig. 5 montre qu'il y a économie d'énergie dans une trigénération par rapport à la référence TGV si moins de la moitié de la chaleur produite par le cogénérateur est utilisée pour la production de froid.

Par contre, si la référence est la centrale au charbon, l'index de qualité est supérieur à 20 % pour toutes les valeurs de λ .

L'étude de sensibilité par rapport au COP du cycle à absorption est illustrée pour la référence TGV par la Fig. 6. Le COP y varie de 0,5 à 1,2.

On en déduit que pour le cycle LiBr/H₂O à double effet dont le COP se situe entre 1,0 et 1,2 une économie d'énergie primaire peut être réalisée jusqu'à une valeur de λ égale à 0,7.

Pour un cycle H₂O/NH₃ à un effet dont le COP varie entre 0,5 et 0,7, une économie d'énergie primaire est envisageable tant que moins de la moitié de la chaleur produite par l'unité de cogénération est utilisée pour la production de froid.

Les deux graphiques de la Fig. 7 présentent l'évolution de l'index pour le cas d'une température de froid supérieure à 5 °C ($COP_C = 3,8$) et pour la production de froid à

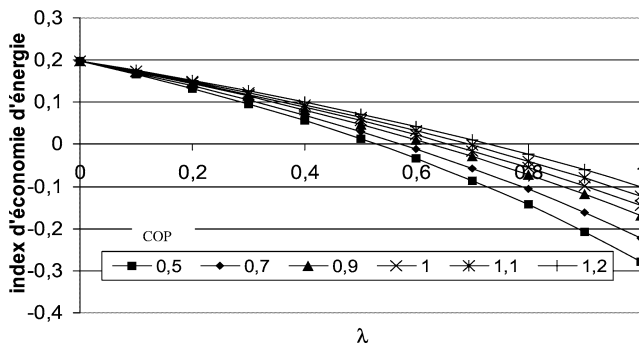


Fig. 6. Sensibilité de l'index par rapport au COP du cycle à absorption (référence II).

Fig. 6. Sensitivity analysis of the Quality index to the COP of absorption units (reference II).

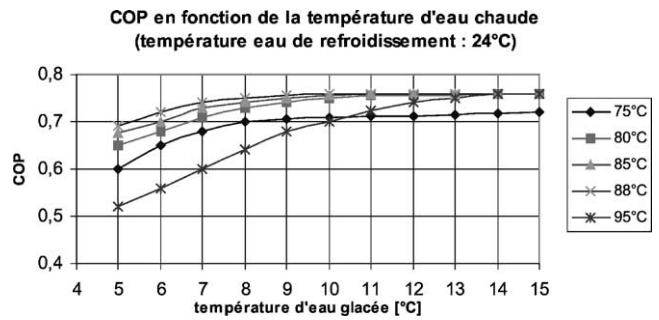


Fig. 8. Variation du COP d'une URA LiBr/H₂O à un seul effet en fonction des températures d'eau chaude et d'eau glacée (réalisée à partir des données recueillies chez un fournisseur).

Fig. 8. Coefficient of performance of a single effect LiBr/H₂O absorption unit as a function of hot and cold water temperature.

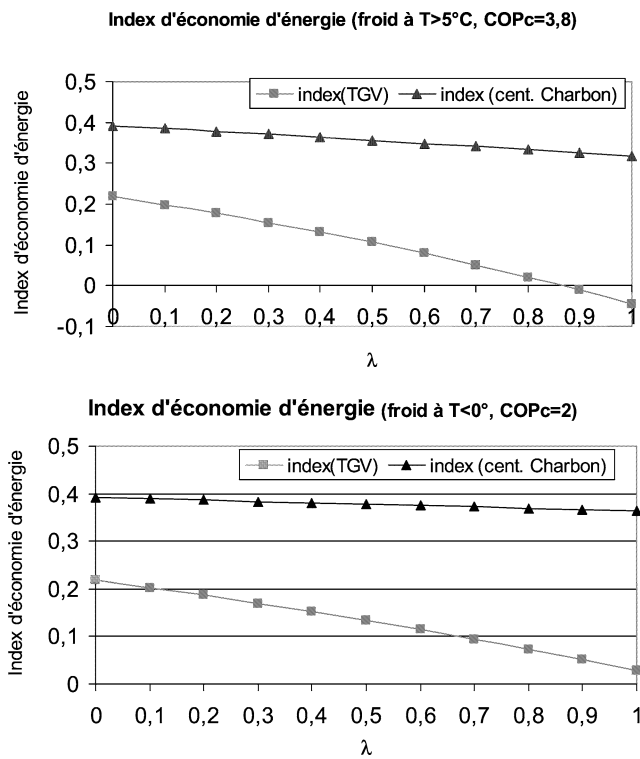


Fig. 7. Evolution de l'index d'économie d'énergie en fonction de l'application.

Fig. 7. Quality index of trigeneration systems for different cooling applications.

température inférieure à 0 °C ($COP_C = 2$). Les COP de l'URA sont respectivement 1,05 et 0,7.

6. Influence de la qualité de la chaleur

Les équations précédentes montrent bien que l'économie d'énergie dépend du rendement électrique α_E et du rendement thermique α_Q du groupe de cogénération. La qualité de la chaleur disponible pour l'utilisateur final ou pour la machine frigorifique à absorption influence fortement les ca-

ractéristiques de l'installation. Pour les moteurs à gaz, où la chaleur est disponible à plusieurs niveaux de température (voir paragraphe 2), la température de l'eau de retour du circuit de chauffage est un facteur de grande importance. Si elle est trop élevée, une partie de la chaleur disponible au niveau du moteur n'est pas valorisable et doit être évacuée par le circuit de refroidissement par l'ambiance. Les valeurs usuelles de α_Q pour les moteurs de grande puissance se situent généralement entre 45 % et 55 % pour une température de retour de 70 °C. Elles sont entre 40 et 50 % pour une température de retour de 90 °C et diminuent jusqu'à 30 % pour une température de retour de 110 °C. Pour des valeurs aussi basses, l'économie d'énergie devient très faible ou même négative (Fig. 4). Dès lors, une analyse exergétique doit être faite en vue de mesurer l'efficacité des systèmes de trigénération, étant donné que les unités de réfrigération par absorption, selon qu'elles sont à un seul ou à double effet, nécessitent pour leur alimentation de l'eau chaude ou de la vapeur basse pression, donc à des températures différentes. Des études de cas réalisées ponctuellement par Rosen et Le [7,8] ont permis d'évaluer différents systèmes d'approvisionnement d'un réseau urbain de froid.

L'analyse exergétique d'un système découle de l'application de la seconde loi de la thermodynamique et complète l'analyse énergétique par la prise en compte des températures de l'ambiance (T_0), de la source de chaleur (T_Q) et du niveau de froid (T_f) requis (Fig. 8). Le bilan exergétique d'une installation de trigénération simultanée (Fig. 3) peut s'écrire comme suit :

$$-P_f \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) + Q \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right) + E + I_r + \sum_p Q_p \tau_p = (RP) \tag{14}$$

où R est le rendement exergétique de la combustion (généralement compris entre 0,9 et 1) et

$$\tau_p = 1 - \frac{T_0}{T_p} \tag{15}$$

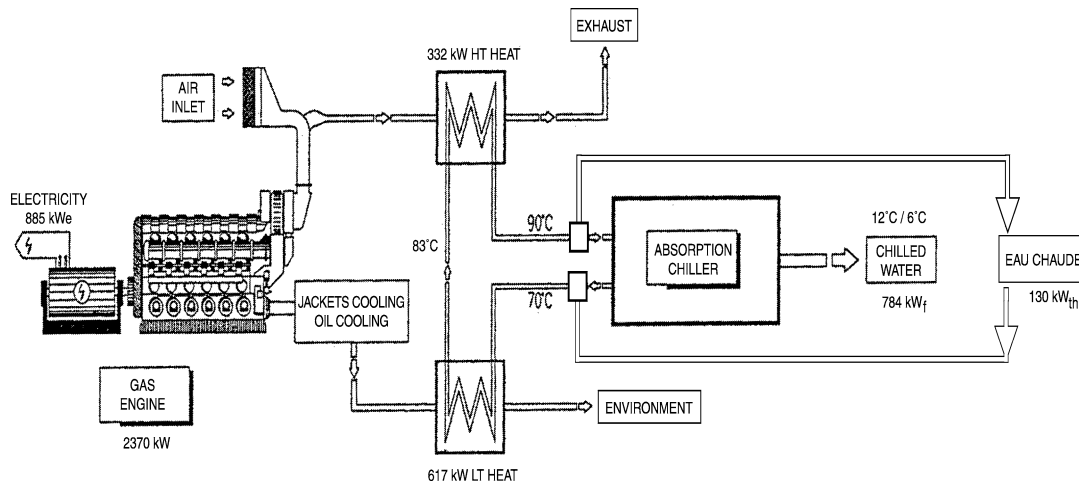


Fig. 9. Trigénération moteur à gaz—exploitation d'été.

Fig. 9. Operation diagram of a trigeneration plant in summer.

Tableau 1

Analyse exergétique et énergétique de trois modes d'exploitation d'une installation de trigénération

Table 1

Energy and exergy analysis of three operation modes of a trigeneration plant

	Cas 1 : URA simple effet, eau chaude 90°C/70°C	Cas 2: URA double effet, vapeur 120°C/2 bar valorisation partielle de $Q_{\text{fumées}}$	Cas 3 : même URA qu'au cas 2 mais avec valorisation totale de $Q_{\text{fumées}}$, donc augmentation de la puissance frigorifique
E	225 kW	225 kW	225 kW
P_f	70 kW	70 kW	161 kW
T_f	6°C	6°C	6°C
Q_f	100 kW	58 kW	134 kW
τ_f	-0,05	-0,05	-0,05
Q	250 kW	216 kW	216 kW
T_Q	90°C	82°C	82°C
τ_Q	0,193	0,175	0,254
α_E	0,36	0,36	0,36
α_Q	0,56	0,44	0,56
λ	0,286	0,213	0,383
ψ	0,467	0,449	0,457
I	0,143	0,097	0,163

Q_p désigne le flux des pertes thermiques, T_p la température à laquelle ces pertes ont lieu et I_r les irréversibilités.

Il s'ensuit l'expression du rendement exergétique ψ de l'installation :

$$\psi = \frac{-P_f(1 - T_0/T_f) + Q(1 - T_0/T_Q) + E}{(RP)} \quad (16)$$

Pour les résultats représentés aux Figs. 4, 5 et 6, le froid est produit à 6°C, l'eau chaude à la sortie du cogénérateur est à 90°C. Le Tableau 1 illustre l'influence du choix de l'URA et par conséquent du niveau de température de l'eau à l'entrée du générateur sur l'efficacité d'un système de trigénération. Nous avons choisi comme exemple le groupe de cogénération de SOKRATHERM avec les données nominales suivantes ($E = 225$ kW, $Q_{\text{fumées}} = 134$ kW,

$Q_{\text{bloc moteur}} = 216$ kW). L'eau à 70°C est chauffée à 82°C (refroidissement du bloc moteur), puis à 90°C (refroidissement des fumées). Trois cas d'exploitation en trigénération sont envisagés et les résultats sont synthétisés dans le Tableau 1 :

Cas 1 : URA alimentée par un circuit d'eau chaude 90°C/70°C, le COP est 0,7.

Cas 2 : URA alimentée par un circuit de vapeur 120°C/2bar, le COP étant égal à 1,2, la puissance calorifique nécessaire à la production de la même puissance frigorifique qu'au cas 1 est plus petite, ce qui entraîne une valorisation partielle de la chaleur disponible sur les fumées.

Cas 3 : même URA qu'au cas 2 mais on valorise toute la chaleur disponible sur les fumées, ce qui implique une augmentation de la puissance frigorifique produite.

Ces résultats, en montrant que le cas de l'exploitation la plus efficace exergétiquement n'est pas toujours celui qui procure la meilleure économie d'énergie primaire, confirme l'importance de l'analyse exergétique lors de l'évaluation des systèmes de trigénération. Néanmoins, le poids extrême que prend le flux d'exergie pure sous forme d'électricité dans l'expression de ψ atténue très fortement l'impact des variations des températures T_f et T_Q caractéristiques des besoins de froid et de chaleur.

7. La trigénération saisonnière

Elle concerne les applications pour lesquelles la cogénération chaleur-électricité est pratiquée pendant l'hiver pour satisfaire la demande en chaleur et la cogénération froid-électricité pendant les mois d'été pour satisfaire la demande en froid pour la climatisation. Les immeubles de bureaux ou

d'habitation, les hôpitaux et les aéroports en sont quelques exemples. Le calcul du gain d'énergie primaire doit se faire globalement sur une année de consommation. Ce fonctionnement permet entre autres de mieux rentabiliser l'installation de cogénération par une durée d'utilisation plus élevée sur l'année. La Fig. 9 est un exemple d'installation de trigénération dans un immeuble, exploitation d'été. En hiver, l'unité de réfrigération est « by-passée » et toute la chaleur sert à la fourniture d'eau chaude.

8. Conclusions

La production de froid par les cycles à absorption est a priori intéressante dans le souci de consommer de l'énergie calorifique, moins noble que l'électricité. Des études de cas ont été réalisées sur ce sujet. La caractérisation de la trigénération par des équations simples nous a permis de cerner plus généralement les possibilités d'économie d'énergie primaire. Il en ressort qu'une cogénération de froid et d'électricité ne permet pas d'économiser systématiquement de l'énergie mais permet dans certaines conditions une économie financière. Par contre, la production simultanée de froid, de chaleur et d'électricité (trigénération) permet une économie d'énergie primaire en fonction de la fraction de chaleur utilisée pour la production de froid. C'est le cas des abattoirs, des entreprises agroalimentaires, pharmaceutiques et chimiques.

Dans le cas de la trigénération saisonnière—production de chaleur en hiver et production de froid en été—, il convient de faire une analyse globale pour déterminer le gain d'énergie primaire. C'est le cas des complexes d'habitation et de bureaux, des hôpitaux et des centres commerciaux.

Pour quantifier le gain effectif d'énergie de la trigénération simultanée par rapport à la production séparée, un index d'économie d'énergie primaire a été défini. Deux références de production séparée ont été prises en considération :

- Référence I : centrale à charbon $\eta_E = 0,36$ chaudière à gaz $\eta_Q = 0,90$.
- Référence II : centrale TGV $\eta_E = 0,55$ chaudière à gaz $\eta_Q = 0,90$.

Pour le cycle LiBr/H₂O à double effet dont le *COP* se situe entre 1,0 et 1,2, une économie d'énergie primaire peut être réalisée jusqu'à une valeur de λ (fraction de la chaleur utilisée pour la production de froid) égale à 0,7, en considérant la référence II.

Pour le cycle H₂O/NH₃ à un effet dont le *COP* varie entre 0,5 et 0,7, une économie d'énergie primaire (référence II) est envisageable tant que moins de la moitié de la chaleur produite par l'unité de cogénération est utilisée pour la production de froid.

La prise en considération de la référence I conduit dans tous les cas à une économie d'énergie.

L'économie d'énergie est :

- Inférieure à 20 % pour la référence II.
- Comprise entre 20 et 40 % pour la référence I.

Elle est plus élevée si l'on prend en considération le rendement du réseau de transport/distribution en production séparée.

Les résultats obtenus sont fonction du mode opératoire et dépendent fortement des niveaux de température requis aussi bien pour la chaleur que pour le froid. Parmi les trois variantes d'exploitation prises ici comme exemples, on a observé que le cas de l'exploitation la plus efficiente exergétiquement n'est pas toujours celui qui procure la meilleure économie d'énergie primaire. Cela confirme la nécessité de la double approche énergétique et exergétique lors de l'évaluation des systèmes de trigénération.

Abridged English version

Energy saving with trigeneration

The implementation of combined heat (hot water or steam) and electricity is increasing in many industrial and tertiary applications because it improves energy supply and reduces operation costs. In many cases, CHP are designed—size and operation mode—according to the heat demand. Some industries have large and constant cooling needs supplied from classical compression refrigerating machines, driven by electricity. Absorption Refrigeration Unit (ARU) produces cold by means of heat consumption. Trigeneration can be defined as combined heat and power production with additional production of cooling. This paper develops a model to characterize trigeneration and defines in particular the condition for primary energy saving and the Quality Index of trigeneration taking into account two references for separate production of electricity, heat and cooling.

Reference I: boiler ($\eta_Q = 0.90$), coal power plant ($\eta_E = 0.36$).

Reference II: boiler ($\eta_Q = 0.9$), steam & gas turbine ($\eta_E = 0.55$).

Two technologies of absorption refrigerators according to the binary fluid used and the cooling temperature are the major ones:

- Lithium bromide ARU: the binary fluid is LiBr–H₂O, for air conditioning in buildings, where refrigerating temperature is above 5 °C. Water is the refrigerant and LiBr the absorbent.
- Ammonia ARU: H₂O is the absorbent and NH₃ the refrigerant, for refrigerating temperatures between –60 °C and 5 °C.

There are two ways of coupling cogeneration plants to ARU:

- indirect: the heat from the CHP is used to produce hot water or steam to be fed in the generator of the ARU. This coupling system can allow providing simultaneously heat to other purposes.
- direct: the ARU is fed directly with the exhaust gas of the CHP. This system does not need additional boiler and is therefore more compact and economical, but there is no way of using this heat for other purposes.

By characterizing the absolute and relative primary energy saving of a trigeneration plant compared to the separate production, we distinguish:

- (1) “All time” trigeneration plant: cooling and heating are simultaneous (industries, hospitals, etc.). Fig. 3 shows a static comparison of both combined and separate production of power, heat and cooling. If P is the primary energy consumption of trigeneration, the separate production consumes P' (Eq. (8)). The condition for primary energy saving is given by Eq. (9) which is depicted in Fig. 4 for different values of λ defined as the portion of the cogenerated heat used to drive the absorption unit. Each line represents the couples (α_Q, α_E) for which the energy consumption is the same for combined and separate production. There is an upper limit for all CHP-units related to the overall efficiency and we set this limit by $\alpha_Q + \alpha_E = 0.90$, which is the maximum overall efficiency of commercially available CHP-units. For each value of λ , the area between the corresponding line and the depicted “limit” line is the sample of (α_Q, α_E) characterizing units that can be combined with ARU and lead to a primary energy saving.
- (2) “Seasonal” trigeneration plant: this is for installations operating in winter for heating and in summer for cooling purposes (office buildings, hotels, etc). This means that there is no cold production in winter ($\lambda = 0$) and the total heat produced in summer is used for cooling ($\lambda = 1$). In this case, an annually based calculation is necessary to evaluate the primary energy saving.

A *Quality Index of trigeneration* is defined as the relative primary energy saving of the trigeneration compared to the separate production (Eq. (11)). There is no energy saving if the quality index is negative. With the following assumptions: $COP = 0.7$, $COP_C = 5$, $\alpha_E = 0.38$, $\alpha_Q = 0.53$, Eq. (11) becomes Eq. (12) for reference I, respectively, Eq. (13) for reference II. In the case of reference II, the trigeneration plant allows primary energy savings if less than 50% of the heat recuperated from the engine is used for cooling purposes. In the case of reference I, the quality index is higher than 20% for all values of λ (Fig. 5). A sensitivity analysis has been carried out to evaluate the evolution of the quality index as a function of the COP of ARU. For reference II, we considered the range of ARU, commercially available,

that is $0.5 < COP < 1.2$ (Fig. 6). The analysis shows that the combination of CHP with a double effect LiBr absorption refrigerator with COP between 1 and 1.2 enables primary energy saving as far as less than 70% of the recuperated heat is used for cooling. For single stage Ammonia absorption refrigerators ($0.5 < COP < 0.7$), primary energy saving is expected if less than half of the recuperated head is used for cooling.

The results of the exergy and energy analyses of three operation modes of the same trigeneration plant (Table 1) highlights the importance of exergy analysis when evaluating such systems. It is important to mention that systems with a high quality index do not always match with the one with the best exergy efficiency (Eq. (16)).

Remerciements

Les auteurs remercient les entreprises productrices-distributrices d'électricité ELECTRABEL et SPE, qui ont financé la présente étude dans le cadre de leur programme de recherches « Connaissance des émissions de CO₂ en Belgique » [9,10].

Références

- [1] W. Dotiwala, E. Pruisikma, Extending the market of cogeneration with absorption refrigeration, *Modern Power System* (1999) 41–42.
- [2] E. Hufford, Absorption chiller improve cogeneration energy efficiency, *ASHRAE J.* (March 1992) 46–53.
- [3] J. Langreck, Cogen-absorption plants for refrigeration purposes and turbine air inlet cooling, *Cogeneration and On-Site Power Production* 1 (2) (2000) 46–49.
- [4] F. Ziegler, P. Riesch, Absorption cycles: A review with regard to energetic efficiency, *Heat recovery Systems CHP* 13 (2) (1993) 147–159.
- [5] M. Desprets, Gasgestookte absorptiemachines, *Energie & Milieu* 1 (1998) 8–15.
- [6] J.B. Fortuin, A. Darmoutomo, E.J.P. Corneth, Absorption cooling and cogeneration, *Klima Beheersing* 20 (11) (1991) 339–344.
- [7] M.A. Rosen, M.N. Le, Efficiency measures for process integrating combined heat and power and district cooling, in: *Thermodynamics and the Design, Analysis, and Improvement of Energy Systems*, in: AES, Vol. 35, 1995, pp. 423–434.
- [8] M.A. Rosen, M.N. Le, Thermodynamic assessment of the components comprising an integrated system for cogeneration and district heating and cooling, in: *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*, in: AES, Vol. 38, 1998, pp. 3–11.
- [9] P. Tchouate Heteu, L. Bolle, O. Squilbin, Potentiel de cogénération dans les applications industrielles de séchage et de production de froid par des cycles à absorption—Évaluation des performances des unités de cogénération, Rapport projet CO₂-Phase 2, ELECTRABEL-SPE, Université catholique de Louvain, 1999.
- [10] P.M. Tchouate Heteu, Mini-cogeneration/trigeneration: Technical and economic aspects, in: *Proceedings of the AIM International Conference on Power Generation and Sustainable Development*, Liège, Belgium, 2001, pp. 73–77.