

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 108 (1982)
Heft: 13

Artikel: Efficacité et rendement exergétique d'une petite centrale électricité-
chaleur
Autor: Tastavi, André
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-74663>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Efficacité et rendement exergetique d'une petite centrale électricité-chaleur

par André Tastavi, Lausanne

1. Introduction

C'est en 1824 que Sadi Carnot, l'un des fondateurs de la thermodynamique, a indiqué les limites de la transformation de la chaleur en énergie mécanique.

Actuellement, que ce soit pour les centrales thermiques à turbines à vapeur ou à gaz (classiques ou nucléaires) ou pour les moteurs à combustion interne (à explosion ou diesel), l'efficacité, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie mécanique produite et l'énergie thermique dépensée, se situe entre 20 et 45%. Le schéma de la figure 1 montre la répartition des énergies mises en jeu dans un cycle de moteur thermique.

Les valeurs de l'efficacité pour ces différents moteurs thermiques sont les suivantes:

- centrale à turbine à gaz simple env. 20%
- moteur à explosion env. 25%
- centrale à turbine à vapeur (nucléaire) env. 30%
- centrale à turbine à vapeur (classique) env. 42%
- gros moteur diesel marin env. 45%

Cela veut dire que seulement 20 à 45% de l'énergie thermique dépensée est utilisée. Les 80 à 55% restant sont rejetés dans l'atmosphère.

Certaines centrales à vapeur ou à gaz sont conçues pour produire simultanément de l'énergie électrique et de la chaleur destinée au chauffage: ce sont les centrales combinées électricité-chaleur ou centrales force-chaleur. Dans ce cas une part nettement plus faible de l'énergie dépensée est rejetée dans l'atmosphère d'où une augmentation de l'efficacité qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 80% et même dans certains cas 95% comme nous le verrons plus loin.

Il est clair que, sachant que nos ressources énergétiques fossiles seront bientôt épuisées, nous nous devons d'utiliser au mieux l'énergie primaire dont nous disposons. Dans cette optique, la production combinée d'électricité et de chaleur est une solution très intéressante.

C'est cette solution qui a été retenue par la maison Fiat qui a mis au point une minicentrale électricité-chaleur, le TOTEM (Total Energy Module) [3]¹. La figure 2 montre un éclaté du TOTEM.

Le TOTEM comporte un moteur de Fiat 127 de 903 cm³ entraînant un alternateur de 15 kW et une série d'échangeurs de chaleurs à contre-courant permettant de récupérer de la chaleur dans l'huile de graissage, dans l'eau de refroidissement du bloc moteur et dans les gaz d'échappement. La chaleur dégagée par l'alternateur est aussi récupérée dans le circuit secondaire. La figure 3 montre la disposition des différents récupérateurs de chaleur.

La figure 4 représente le bilan énergétique du TOTEM.

Le module TOTEM peut être alimenté au gaz naturel mais aussi, et c'est là que

son application se révèle être la plus prometteuse, au biogaz (gaz des champs ou gaz de station d'épuration). Nous en verrons plus loin deux applications.

Une très intéressante publication de M. Pierre Bremer intitulée « Le potentiel énergétique suisse du gaz de fumier » [2] conclut, en particulier, que l'utilisation « du gaz de fumier peut être rentable, même à court terme » et que « la plus grande partie de l'agriculture suisse pourrait être, à plus long terme, autonome du point de vue énergétique ». Si on ajoute à cela qu'après avoir subi la fermentation anaérobie on constate « une amélioration de la valeur fertilisante des engrais organiques et une réduction des pertes ammoniacales », on se rend compte du grand intérêt que représente la production de biogaz à partir du fumier.

Pour la Suisse, cette étude montre que le potentiel énergétique disponible à partir uniquement des fumiers de bovins et de

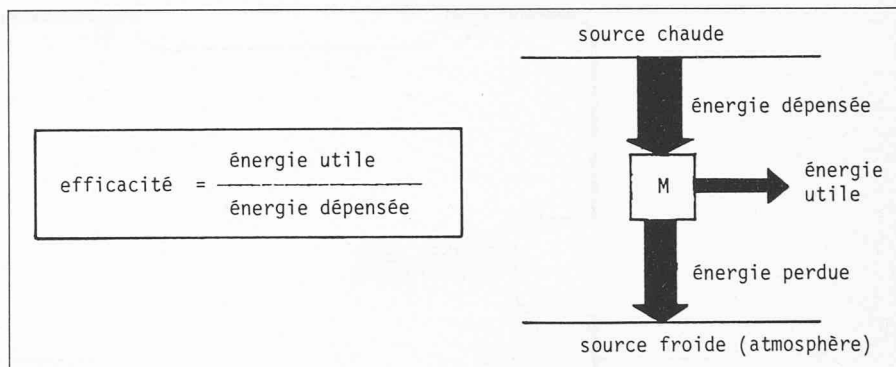


Fig. 1. — Représentation schématique d'un cycle de moteur thermique, turbine à vapeur ou à gaz, moteur à explosion ou diesel.

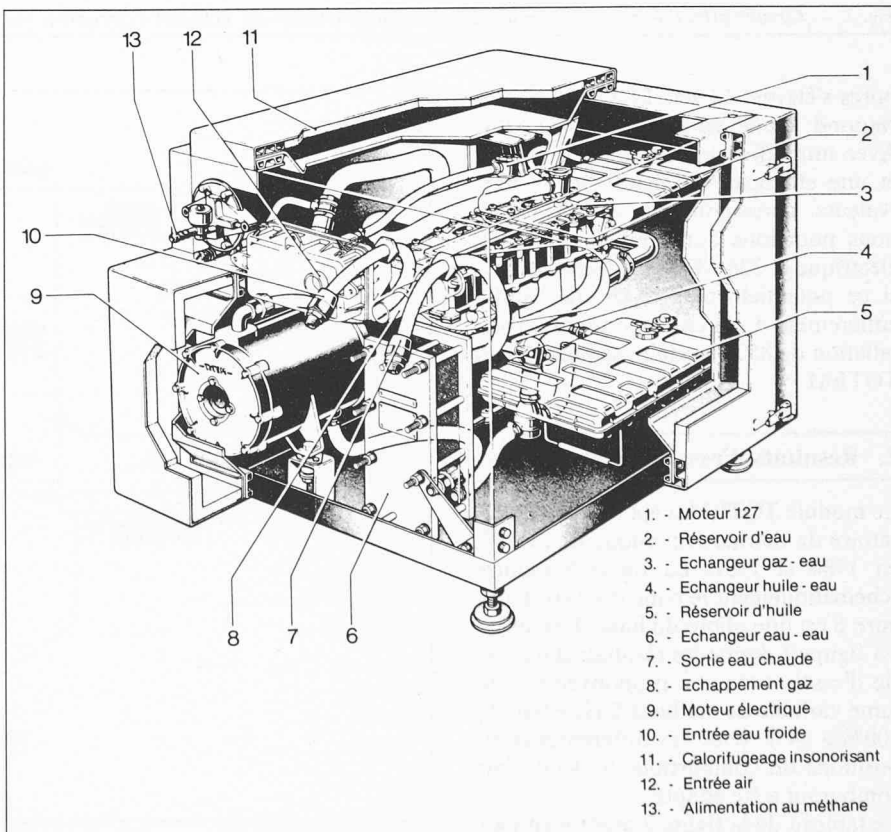


Fig. 2. — Eclaté du TOTEM montrant ses différents éléments. (Document Fiat)

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie, en fin d'article.

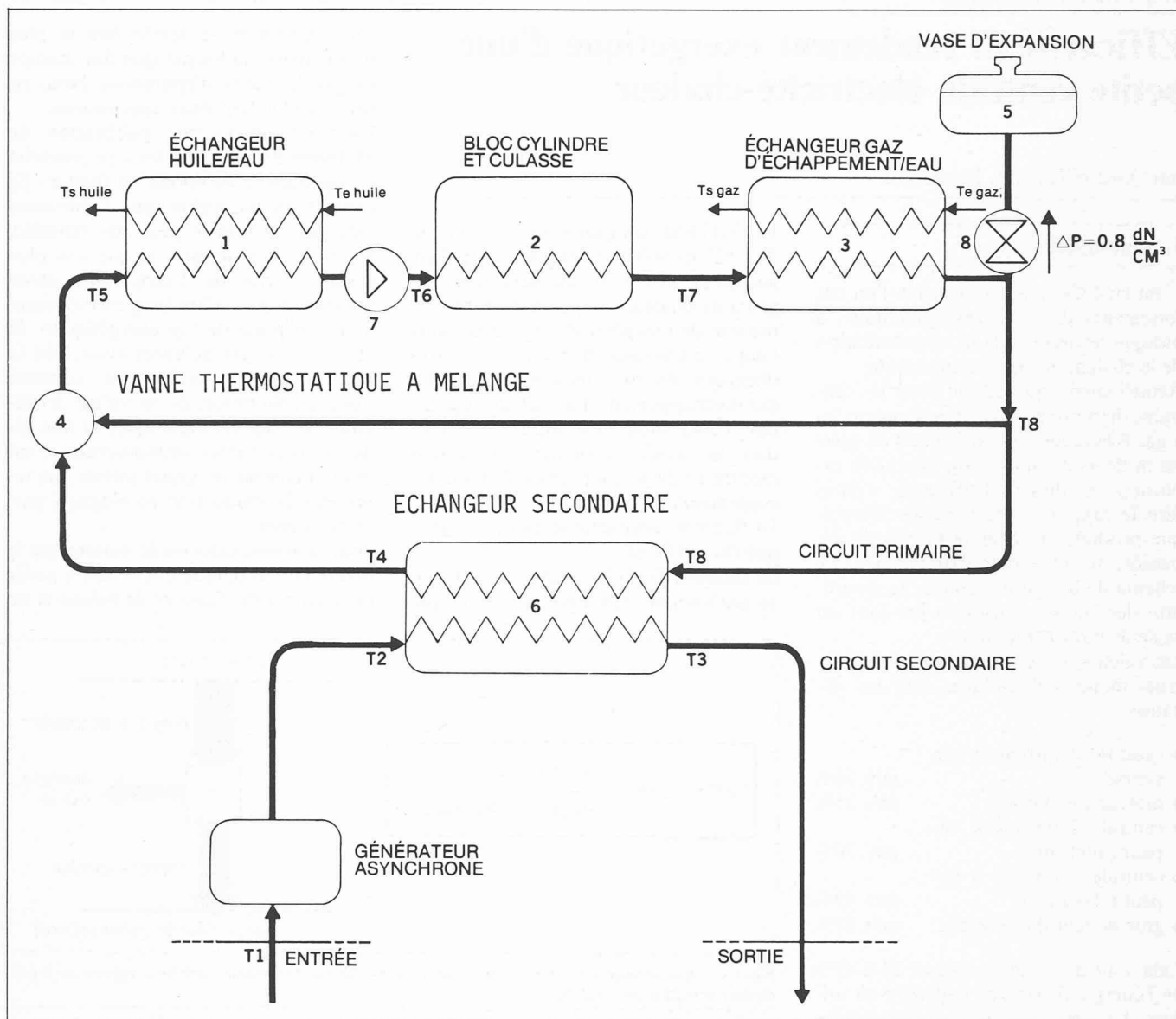


Fig. 3. — Circuits primaire et secondaire de récupération de chaleur du TOTEM. (Document Fiat)

porcs s'élève à 14 900 TJ/an ce qui correspond à une puissance de 472 MW. Avec une efficacité mécanique de 27% et une efficacité de chauffage de 69% (valeurs correspondant au TOTEM), nous pourrions donc obtenir 127 MW électrique et 326 MW thermique à 70°C si ce potentiel énergétique était utilisé entièrement. Cela correspondrait à l'installation de 8500 modules semblables au TOTEM.

2. Résultats d'essais en laboratoire

Le module TOTEM a été testé au Laboratoire de thermodynamique de l'EPFL en 1980 et 1981. La figure 5 montre schématiquement le banc d'essais. La figure 6 est une photo du banc d'essais. La figure 7 donne les résultats d'une série d'essais avec une proportion en volume variable de méthane CH_4 allant de 100% à 64%. Pour ces différentes compositions du combustible, le débit d'air comburant a été adapté.

Ce tableau de la figure 7 montre en particulier que l'efficacité électrique varie

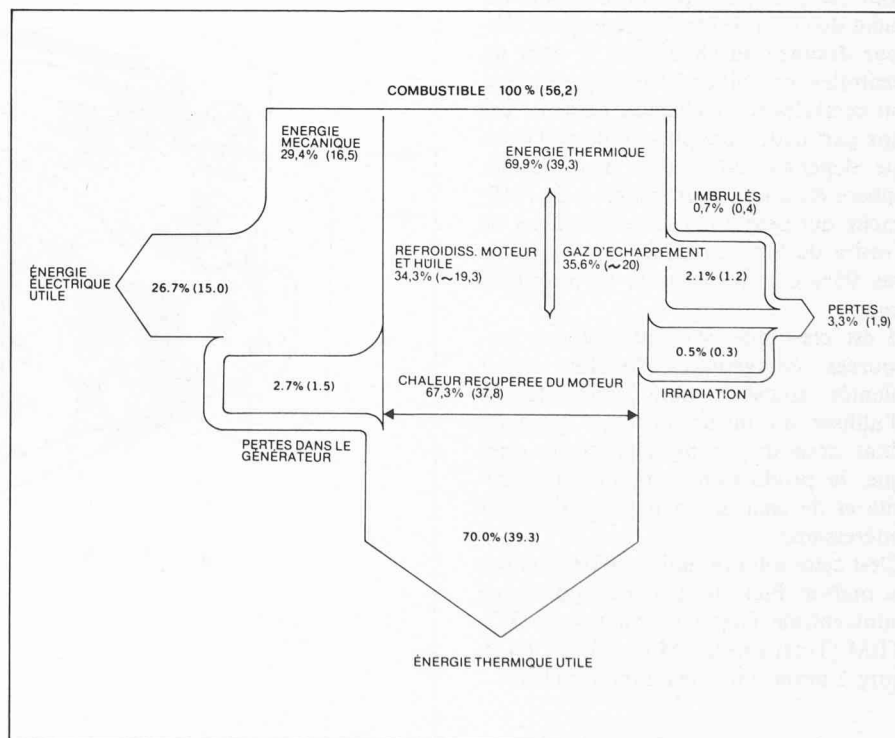


Fig. 4. — Bilan énergétique du TOTEM. (Document Fiat)

entre 27% et 26% et l'efficacité thermique entre 68% et 70%. Ces chiffres confirment ceux avancés par la maison Fiat.

Dans ce tableau, nous avons en particulier:

- ligne 9: efficacité électrique

$$\varepsilon_e = \frac{\dot{E}^-}{\dot{Q}_{\text{chim}}^+}$$

- ligne 10: efficacité thermique

$$\varepsilon_t = \frac{\dot{Q}^-}{\dot{Q}_{\text{chim}}^+}$$

- ligne 11: efficacité globale

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_t$$

Cette dernière efficacité indique la proportion d'énergie primaire qui a été transformée en énergie électrique et en chaleur utile. Elle varie dans ce cas entre 95 et 96%. Seulement 4 à 5% de l'énergie contenue dans le combustible est perdue par convection et rayonnement et dans les gaz d'échappement.

Pour l'utilisateur, cette efficacité indique bien quelle proportion de l'énergie dépensée a été retrouvée sous forme d'électricité et sous forme de chaleur. Cette notion d'efficacité est donc très pratique pour établir un bilan énergétique.

3. Rendement exergetique

S'il n'y avait pas de pertes de chaleur par convection et rayonnement et dans les gaz d'échappement, l'efficacité globale serait de 100% et elle ne ferait qu'exprimer le premier principe de la thermodynamique sans donner d'indication sur le degré de perfection du système.

Le thermodynamicien ne peut donc pas se contenter de la seule définition de l'efficacité pour juger de la qualité d'une transformation énergétique. Il utilise donc une notion qui tient compte simultanément du premier et du deuxième principe de la thermodynamique, c'est le *rendement exergetique* [1]. Ce rendement permet en particulier de tenir compte du niveau de température auquel la chaleur est livrée: plus ce niveau est élevé, meilleur est le rendement exergetique.

La définition générale du rendement exergetique utilisable pour toutes les machines et installations thermiques est la suivante:

$$\eta_x = \frac{\sum \dot{E}^- + \sum \dot{E}_q^- + \sum \dot{E}_w^-}{\sum \dot{E}^+ + \sum \dot{E}_q^+ + \sum \dot{E}_w^+} \quad (1)$$

$\dot{E}^-$ = puissance mécanique fournie par le système à l'extérieur

$\dot{E}^+$ = puissance mécanique reçue par le système de l'extérieur

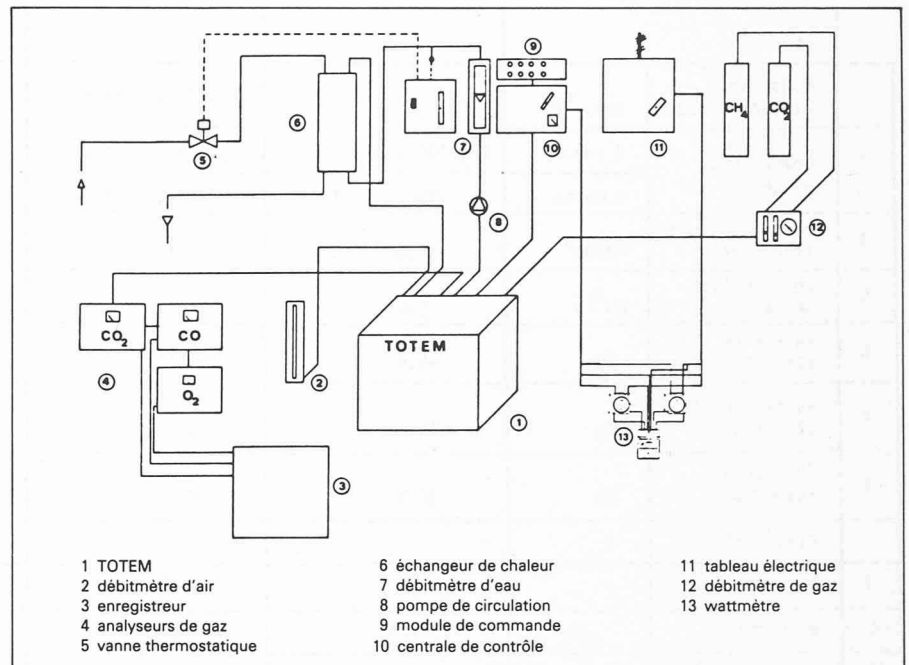


Fig. 5. — Représentation schématique de l'installation de mesure du TOTEM au Laboratoire de thermodynamique de l'EPFL.

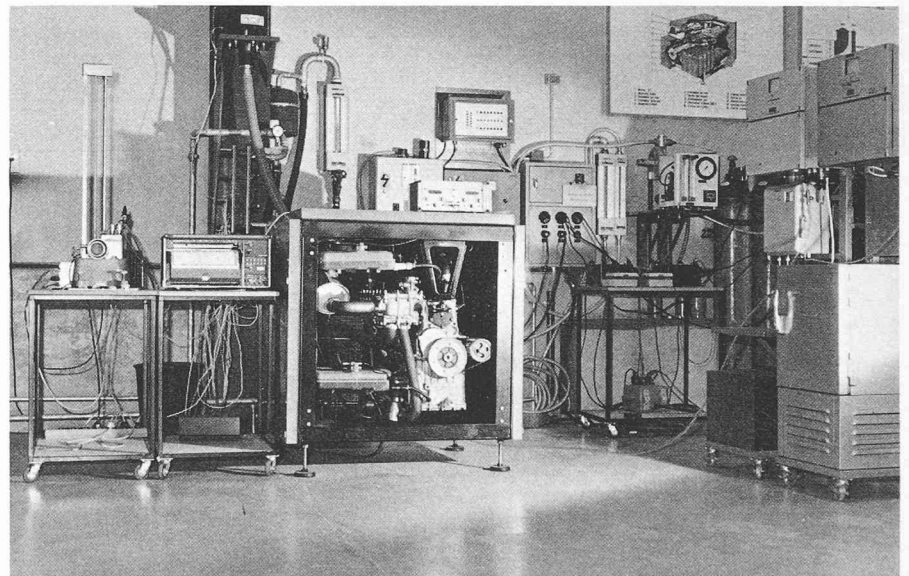


Fig. 6. — Photographie du banc d'essai du TOTEM au Laboratoire de thermodynamique de l'EPFL (paroi frontale enlevée). (Photo J.-C. Rochat)

$\dot{E}_q^-$ = copuissance-chaleur (exergie-chaleur) fournie par le système à l'extérieur

$\dot{E}_q^+$ = copuissance-chaleur (exergie-chaleur) reçue par le système de l'extérieur

$\dot{E}_w^-$ = copuissance-transformation (exergie-transformation) fournie par le système à l'extérieur

$\dot{E}_w^+$ = copuissance-transformation (exergie-transformation) reçue par le système de l'extérieur.

Règle d'exclusion: Une puissance ou une copuissance ne peut figurer qu'à l'endroit où elle apparaît positivement, c'est-à-dire soit au numérateur, soit au dénominateur, mais jamais aux deux à la fois.

Calcul d'une copuissance-chaleur (exergie-chaleur)

$$\dot{E}_q^+ = \theta \dot{Q}^+ = \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) \dot{Q}^+ \quad (2)$$

$\theta = 1 - \frac{T_a}{T}$ = facteur de Carnot

T_a = température de l'atmosphère

T = température à laquelle s'opère le transfert-chaleur

$\dot{Q}^+$ = puissance chaleur échangée.

Calcul d'une copuissance-transformation (exergie-transformation)

En régime permanent:

$$\dot{E}_w^+ = \dot{M}(k_1 - k_2) \quad (3)$$

$\dot{M}$ = débit-masse parcourant le réseau

	No essai		1	2	3	4
1	Conditions atmosphériques	bar, °C	0,972 , 25	0,972 , 23,5	0,972 , 21,5	0,972 , 24,3
2	Composition du gaz	% volume	CH ₄ :100 , CO ₂ :0	CH ₄ : 79 , CO ₂ : 21	CH ₄ : 70 , CO ₂ : 30	CH ₄ : 64 , CO ₂ : 36
3		% masse	100 , 0	57,6 , 42,4	45,7 54,3	38,9 61,1
4	Pouvoir calorifique inf.	MJ/Nm ³	35,66	28,17	24,97	22,83
5	Consommation de gaz	Nm ³ /h	5,61	7,11	7,89	8,62
6	Puissance absorbée	kW	55,5	55,5	54,7	54,4
7	Puissance électrique	kW	15,1	14,8	14,5	14,3
8	Puissance thermique	kW	37,0	38,0	37,6	37,8
	Efficacités	-				
9	• électrique	-	0,27	0,27	0,27	0,26
10	• thermique	-	0,68	0,69	0,69	0,70
11	• totale	-	0,95	0,96	0,96	0,96
	Gaz de combustion					
12	• température	°C	105	105	105	105
13	• O ₂	% volume	0,3	0,3	0,3	0,3
14	• CO	% volume	0,8	0,9	0,7	0,8
15	• CO ₂	% volume	10,4	11,6	12,6	13,3

Fig. 7. — Résultats d'essais au Laboratoire de thermodynamique de l'EPFL.

$k = h - T_a \cdot s =$ coenthalpie massique

$h =$ enthalpie massique

$s =$ entropie massique.

Dans le cas de la minicentrale électricité-chaleur, nous pouvons représenter la prestation exergetique concernant la chaleur fournie à l'extérieur de deux façons différentes indiquées à la figure 8. Dans le cas a), la frontière est traversée par:

- l'exergie-transformation reçue du combustible $\dot{E}_{wo}^+$
- le réseau de chauffage recevant l'exergie-transformation $\dot{E}_w^-$
- la puissance électrique fournie au réseau électrique $\dot{E}^-$.

Le rendement exergetique est donc donné par:

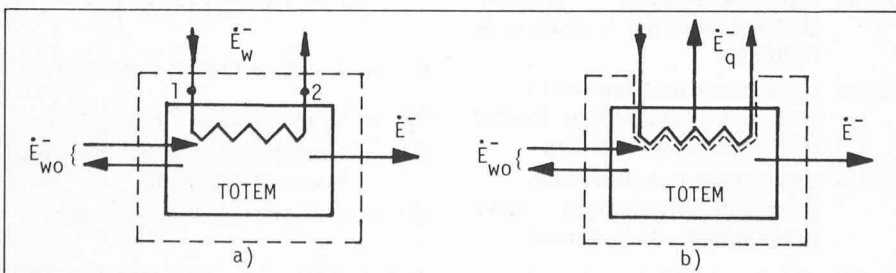


Fig. 8. — Représentation schématique des flux traversant la frontière du système

$\dot{E}_{wo}^+ =$ exergie-transformation reçue du combustible par le système

$\dot{E}_w^- =$ exergie-transformation fournie au réseau de chauffage par le système

$\dot{E}^- =$ puissance électrique fournie à l'extérieur par le système

$\dot{E}_q^- =$ copuissance-chaleur fournie à l'extérieur par le système.

$$\eta_{xa} = \frac{\dot{E}^- + \dot{E}_w^-}{\dot{E}_{wo}^+} \quad (4)$$

Dans le cas b), la frontière est traversée par:

- l'exergie-transformation reçue du combustible $\dot{E}_{wo}^+$
- le flux de chaleur mettant en jeu l'exergie-chaleur $\dot{E}_q^-$ fournie par le système
- la puissance électrique fournie au réseau électrique $\dot{E}^-$.

Le rendement exergetique est donc donné par:

$$\eta_{xb} = \frac{\dot{E}^- + \dot{E}_q^-}{\dot{E}_{wo}^+} \quad (5)$$

Calculons le rendement exergetique par les relations (4) et (5) pour l'essai n° 1.

Cas a)

$$\dot{E}_{wo}^+ = 55,97 \text{ kW}, \quad \dot{E}^- = 15,1 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_w^- &= \dot{M}[h_2 - h_1 - T_a(s_2 - s_1)] \\ &= 0,495 \cdot [326,6 - 251,2 - 293,15 \\ &\quad (1,051 - 0,8309)] = 5,38 \text{ kW} \end{aligned}$$

d'où

$$\eta_{xa} = \frac{15,1 + 5,38}{55,97} = 0,37$$

Cas b)

$$\dot{E}_{wo}^+ = 55,97 \text{ kW}, \quad \dot{E}^- = 15,1 \text{ kW}$$

$$\dot{E}_q^- = \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) \cdot \dot{M}(h_2 - h_1)$$

avec

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{333,15 + 351,15}{2} \\ &= 342,15 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_q^- &= \left(1 - \frac{293,15}{342,15}\right) \cdot 0,495 (326,6 - \\ &\quad - 251,2) = 5,35 \text{ kW} \end{aligned}$$

d'où

$$\eta_{xb} = \frac{15,1 + 5,35}{55,97} = 0,37$$

Les deux méthodes de calcul sont donc bien équivalentes.

Pour la production d'énergie électrique seule, nous aurions

$$\eta_x = \frac{15,1}{55,97} = 0,27$$

La production combinée d'électricité et de chaleur permet donc d'augmenter le rendement exergetique de 0,27 à 0,37,

soit une augmentation en valeur relative de 37%.

Si la chaleur avait pu être fournie à une température plus élevée, par exemple entre 200°C et 218°C au lieu de 60°C et 78°C, nous aurions:

$$\dot{E}_w^- = \dot{E}_q^+ = 15,86 \text{ kW}$$

et le rendement exergetique aurait été le suivant:

$$\eta_x = \frac{15,1 + 15,86}{55,97} = 0,55$$

Ce calcul montre bien l'influence sur le rendement exergetique du niveau de température à laquelle la chaleur est livrée.

4. Domaines d'application et résultats d'exploitation

Le domaine d'emploi du TOTEM ou d'autres minicentrales électricité-chaaleur est très vaste. Ces minicentrales peuvent être utilisées en particulier:

- en remplacement de chaudières pour le chauffage d'immeubles avec alimentation en gaz naturel
- pour l'utilisation du biogaz
 - dans les fermes ou plus généralement dans toutes les exploitations agricoles même sans unités de gros bétail, les stations d'élevage de porcs et les stations avicoles,
 - dans les stations d'épuration des eaux usées.

Exploitation d'un TOTEM dans une ferme [5]

Propriétaire exploitant: M. Manfred Steiner, La Vignette à Montherod (Vaud).

Valeurs moyennes:

Production de lisier	env. 1,35 m ³ /j
Production de gaz	env. 50 m ³ /j
Production d'électricité	env. 86 kWh/j
Production de chaleur	env. 215 kWh/j

Une partie de l'électricité produite est utilisée sur place, le solde est envoyé sur le réseau électrique à basse tension. La production excédentaire est rachetée par la Société électrique des forces de l'Aubonne à raison de 5,5 ct/kWh de 6 h. à 24 h. En moyenne, la couverture annuelle des besoins en électricité est de 65%. La chaleur produite est utilisée d'une part pour le chauffage et la production d'eau chaude de la ferme, d'autre part pour le séchage des récoltes et le chauffage du digesteur.

M. Jean-Pierre Brun, directeur de la Société électrique des forces de l'Aubonne, après trois ans d'expériences d'exploitation sur cette installation, conclut dans un article publié à l'occasion des Journées de l'Office d'électricité de la Suisse romande:

« En conclusion, j'affirmerai que le caractère expérimental de l'installation est une réussite totale. Cette installation a montré les limites *in situ* d'une telle formule d'exploitation. L'agriculteur a pu

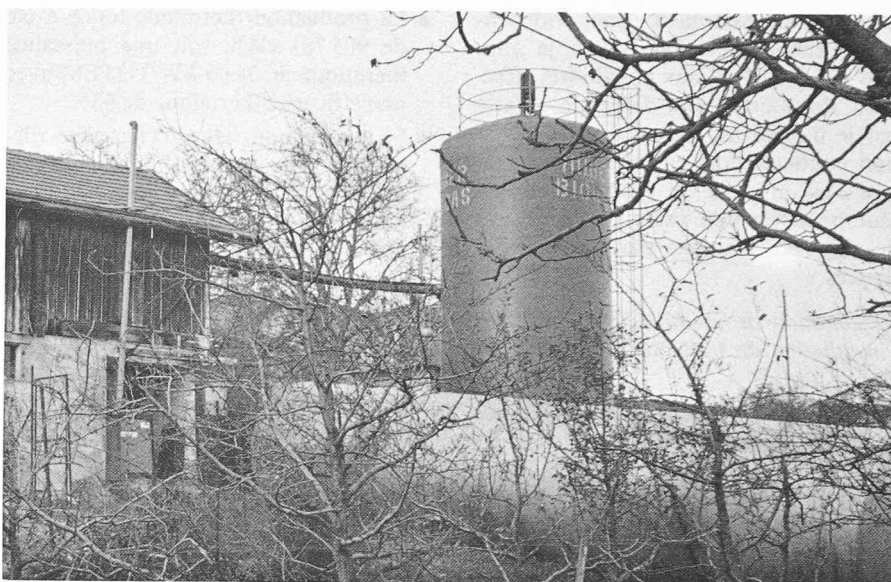


Fig. 9. — Photographie de l'installation de Montherod
— à gauche, dans le bâtiment: module TOTEM
— au premier plan, horizontal: réservoir de biogaz
— au fond, vertical: digesteur.

(Photo J.-C. Rochat)

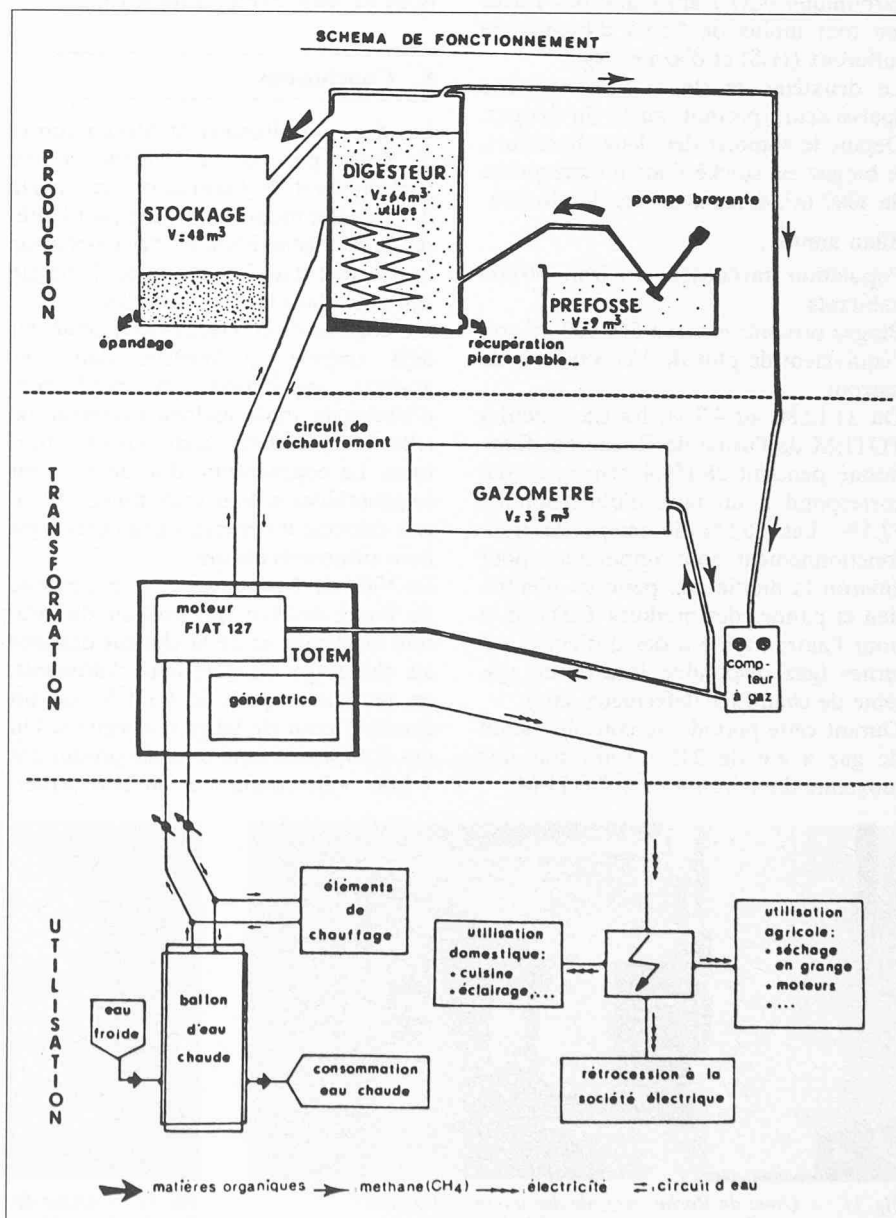


Fig. 10. — Schéma de l'installation de Montherod.

acquérir partiellement une indépendance énergétique. Par contre, je serai plus réservé quant aux possibilités effectives de substitution d'énergie offerte par le biogaz, au niveau de la production nationale, tout en restant conscient que c'est grâce à de tels essais qu'un jour peut-être une petite partie de nos besoins sera couverte par des énergies douces.»

Exploitation de modules TOTEM dans l'installation de traitement des boues de Roche [4], [6]

L'usine de Roche est dimensionnée pour traiter les boues en provenance des stations d'épuration des eaux de Vevey et de Montreux (population raccordée prévue 100 000 habitants, actuellement 50 000).

L'opération de digestion est réalisée dans deux réacteurs de 2700 m³ chacun. Le premier réacteur travaille en fermentation anaérobie à une température de 35°C (procédé mésophile), le biogaz produit contient environ 65% en volume de méthane (CH₄) et 35% de gaz carbonique (CO₂) ainsi que des traces (en tout moins de 0,5%) d'hydrogène sulfureux (H₂S) et d'azote (N₂).

Le deuxième réacteur, utilisé comme épaisseur, produit aussi du biogaz. Depuis le sommet des deux digesteurs, le biogaz est stocké dans un gazomètre de 4000 m³, après avoir été désulfuré.

Bilan annuel:

Population raccordée: environ 50 000 habitants.

Biogaz produit: environ 550 000 m³ soit l'équivalent de plus de 365 000 litres de mazout.

Du 31.12.80 au 4.9.81, les six modules TOTEM de l'usine de Roche ont fonctionné pendant 26 159,4 heures, ce qui correspond à un taux d'utilisation de 73,5%. Les 26,5% de temps de non-fonctionnement sont imputables pour environ la moitié aux périodes d'entretien et pannes des modules TOTEM et pour l'autre moitié à des difficultés externes (gaz disponible insuffisant, système de chauffage défectueux, etc.).

Durant cette période, la consommation de gaz a été de 235 615 m³, soit une moyenne d'environ 9 m³/h TOTEM:

- La production thermique totale a été de 905 781 kWh, soit une puissance thermique de 34,66 kW/TOTEM avec une efficacité thermique de 63%.
- La production nette d'électricité (déduction faite des auxiliaires) a été de 288 540 kWh utilisée entièrement sur place (environ 55% des besoins en électricité), soit une puissance électrique de 12 kW/TOTEM avec une efficacité électrique de 21,8%.

L'efficacité totale est donc en moyenne de 84,8%.

L'amortissement de l'installation a été obtenu sur une période de trois ans environ.

Remarque: Les chiffres indiqués ci-dessus concernent 6 modules TOTEM. Depuis, 2 nouveaux modules ont été ajoutés à l'installation.

La section «Combustion et machines alternatives» du Laboratoire de thermodynamique a participé dès le début au contrôle du fonctionnement des modules TOTEM, en particulier pour les analyses de gaz, dans les deux installations de Montherod et de Roche.

5. Conclusions

Les deux installations de Montherod et de Roche prouvent à l'évidence, d'une part, l'intérêt de l'utilisation du biogaz dans de tels modules, d'autre part l'intérêt de la cogénération électricité-chaleur qui permet d'utiliser au mieux l'énergie contenue dans les combustibles.

La cogénération électricité-chaleur est déjà utilisée quelquefois dans les grandes installations de production d'électricité mais malheureusement de telles installations sont encore trop rares. La cogénération doit absolument se généraliser si l'on veut utiliser de façon correcte les énergies primaires dont nous disposons encore.

La Ville de Lausanne, avec la Centrale de Pierre-de-Plan qui produit du courant électrique et de la chaleur destinée au chauffage de nombreux bâtiments, en particulier pour le CHUV, est un exemple pour de telles réalisations. Un des groupes de cette centrale produisant 7 MW «électrique» et 40 MW «ther-

Bibliographie

- [1] L. BOREL, «Théorie générale de l'exergie et applications pratiques», Revue *Entropie*, nos 85, 86 et 87, 1979.
- [2] P. BREMER, «Le potentiel énergétique suisse du gaz de fumier». Etude effectuée en 1977 à la demande de la Commission fédérale de la conception globale de l'énergie.
- [3] FIAT, «TOTEM, Total Energy Module».
- [4] D. KRATZER, «Valorisation du biogaz dans une installation industrielle». Journée romande de l'électricité du 16.9.81. «Utilisation des moteurs TOTEM pour la valorisation du gaz de digestion», Association romande pour la protection des eaux et de l'air, octobre 1980.
- [5] M. STEINER, «Agriculture et énergie», 1981.
- [6] J.-F. KOETSCHET, «Bilan provisoire TOTEM 1981», SIEG-Vevey-Montreux, septembre 1981.
- [7] J.-P. BRUN, «Le biogaz dans l'exploitation agricole de Montherod», Journée de l'OFEL.

mique» a une efficacité totale de l'ordre de 80%.

Depuis plus d'un an, le Laboratoire de thermodynamique, en collaboration étroite avec le Laboratoire d'électronique industrielle de l'EPFL, a étudié le problème de l'adaptation automatique de l'avance à l'allumage en fonction des proportions de méthane et de gaz carbonique dans le biogaz afin d'obtenir un maximum de puissance électrique. Cette collaboration a conduit à la réalisation d'un dispositif dont le fonctionnement est tout à fait satisfaisant. La collaboration se poursuit actuellement en vue de réaliser un complément à ce dispositif, permettant d'adapter aussi automatiquement le rapport air/combustible à la composition du combustible.

Adresse de l'auteur:

André Tastavi
Ing. EPFL/SIA
Chargé de cours
Chef de la section combustion et machines alternatives
Département de mécanique
Laboratoire de thermodynamique
EPFL
1015 Lausanne

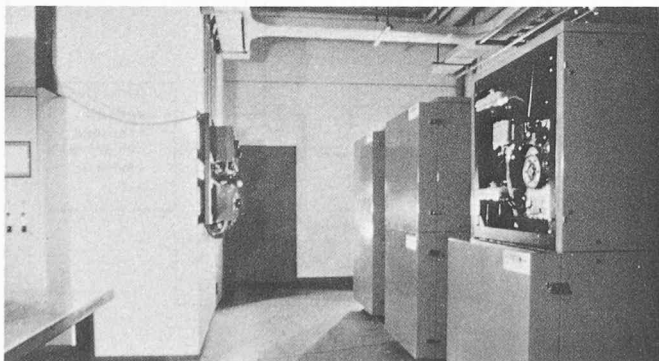


Fig. 11. — Usine de Roche, centrale des modules TOTEM — à droite: les 6 modules groupés par 2 l'un sur l'autre — sur le mur en face: armoires électriques de commande.

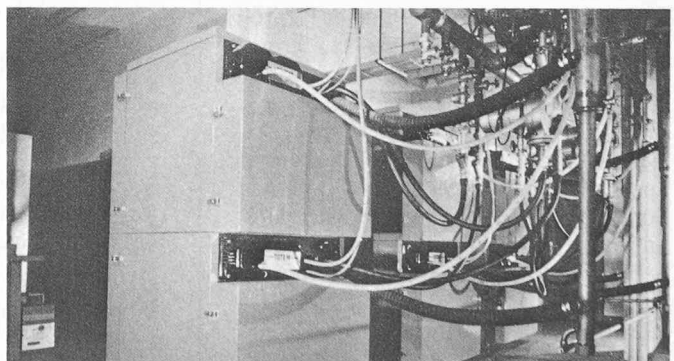


Fig. 12. — Usine de Roche, centrale des modules TOTEM vue depuis l'arrière des modules avec les alimentations en gaz et en air et les câbles électriques.