

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 4

**Artikel:** Chaudières électriques industrielles pour la production de vapeur et d'eau chaude

**Autor:** Bose, D.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904360>

### **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:** 06.10.2024

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

2.21 ✓  
2.23 ✓  
2.24 ✓

# Chaudières électriques industrielles pour la production de vapeur et d'eau chaude

D. Bose

L'énergie électrique est essentiellement produite en Suisse par des centrales hydroélectriques et nucléaires. L'énergie excédentaire produite en été pourrait être fournie aux industries pour la production biénergie de vapeur ou d'eau chaude.

Le prix unitaire de l'énergie électrique varie selon que les risques représentés par les investissements supplémentaires pour les chaudières électriques et par les prix des combustibles fossiles sont supportés par les entreprises d'électricité ou par les utilisateurs de vapeur. Le nombre d'heures de fonctionnement des chaudières électriques est le facteur essentiel de calcul du prix.

*In der Schweiz wird die elektrische Energie im wesentlichen in Wasserkraftwerken und Kernkraftwerken produziert. Die im Sommer erzeugte Überschussenergie könnte zur Erzeugung von Dampf oder Heisswasser in bivalenten Anlagen an die Industrie abgegeben werden.*

*Der Preis der elektrischen Energie hängt davon ab, ob die durch die zusätzlichen Investitionen für die Elektrokessel und die Preise der fossilen Brennstoffe bedingten Risiken vom Elektrizitätswerk oder vom Benutzer des Dampfes getragen werden. Der wichtigste Faktor für die Berechnung des Preises ist die Benutzungsstundenzahl.*

## 1. Introduction

Les chaudières électriques industrielles sont apparues en Suisse dès 1920. Au cours de la Seconde Guerre mondiale, la pénurie de charbon importé a conduit à une utilisation plus large de ces chaudières. La consommation totale des chaudières électriques s'élevait encore à 1000 GWh environ au cours de l'année hydrologique 1950/1951. La consommation est tombée à 120 GWh en 1980/1981, car la chaudière à fuel plus économique a progressivement éliminé la chaudière électrique du marché au cours de la décennie 60. La figure 1 illustre très clairement cette évolution.

Le Comité Suisse d'Electrothermie a créé un groupe de travail pour étudier la possibilité d'une nouvelle utilisation économique de chaudières électriques pour la production de vapeur et d'eau chaude industrielles. Le présent rapport est établi à partir des résultats de ce groupe.

## 2. Disponibilité de l'énergie électrique pour alimenter des chaudières électriques industrielles

Deux tiers environ de l'énergie électrique sont produits en Suisse par des

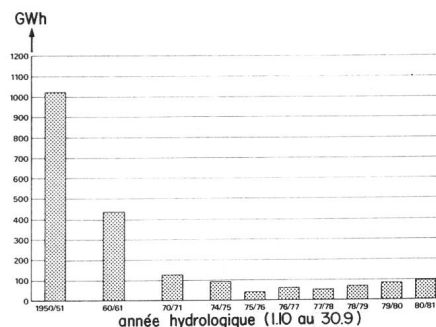


Fig. 1 Consommation annuelle des chaudières électriques industrielles

centrales hydroélectriques et un tiers par des centrales nucléaires. Il en résulte une capacité de production relativement élevée, mais une disponibilité fluctuante de l'énergie. Même avec des centrales à accumulation saisonnière et par pompage, les fluctuations de la production et de la demande d'énergie électrique conduisent souvent à un surplus d'énergie qui doit être distribué pendant les heures, jours ou mois de faible demande.

La figure 2 illustre la diminution des réserves de fourniture quand la demande augmente, ce qui réduit la sécurité de fourniture en hiver. Le pourcentage d'énergie excédentaire en été a toutefois été relativement augmenté au

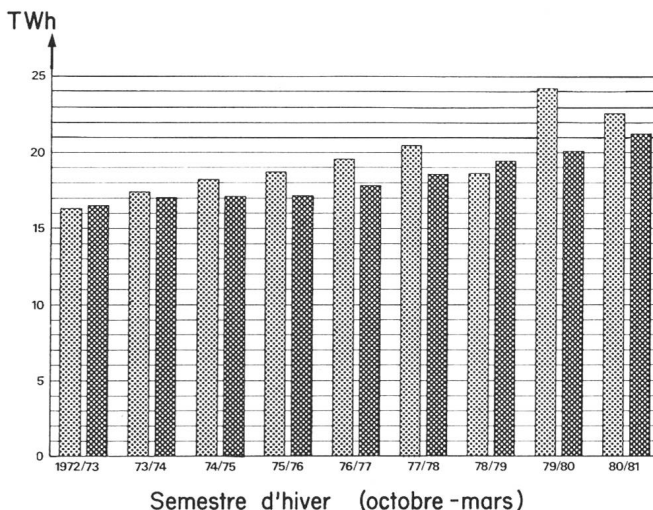


Fig. 2 Production et consommation d'énergie électrique pendant le semestre d'hiver en Suisse

### Adresse de l'auteur

D. Bose, Nordostschweizerische Kraftwerke AG (NOK), 5401 Baden

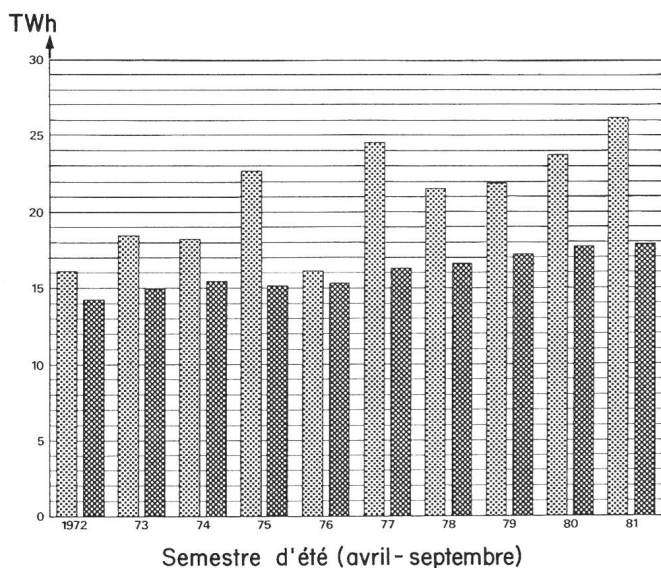


Fig. 3  
Production et consommation d'énergie électrique pendant le semestre d'été en Suisse

Production  
Consommation

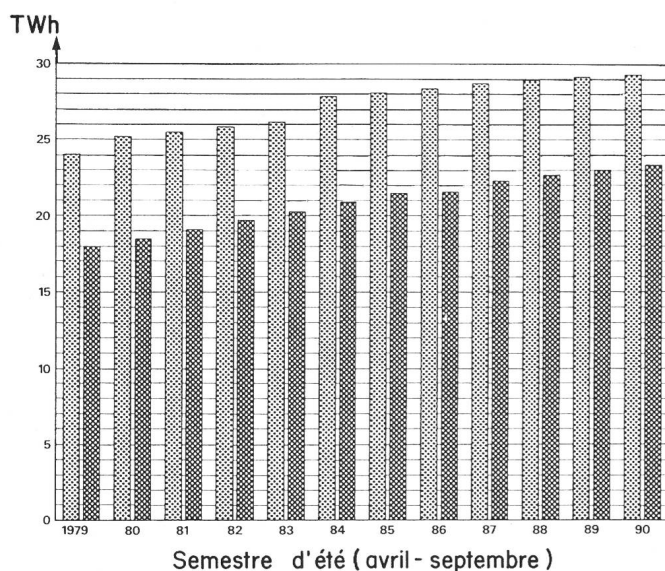


Fig. 4  
Capacité de production moyenne et demande prévue d'énergie électrique pendant le semestre d'été en Suisse

Capacité de production  
Demande

cours des dernières années, comme le montre la figure 3. La puissance disponible a également été supérieure à la puissance effective demandée. La figure 4 représente une prévision de la capacité de production et de la demande pendant les mois d'été, jusqu'en 1990.

L'étude de toutes ces figures permet de conclure qu'une quantité notable de puissance et d'énergie électriques pourrait être fournie pour la production de vapeur industrielle pendant l'été, mais très peu en hiver.

Un rapide examen des statistiques disponibles montre que les chaudières à combustible fossile installées dans les usines suisses représentent une production d'environ 6000 t/h de vapeur,

ce qui correspond à environ 4000 MW de capacité installée. De nombreuses installations de production de vapeur et d'eau chaude pourraient recevoir des chaudières électriques supplémentaires, à condition que l'énergie électrique soit disponible pendant les heures de faible demande, à un prix justifiant leur fonctionnement en bi-énergie.

Le prix de l'énergie électrique excédentaire varie selon l'heure du jour, les jours de la semaine et la saison, en fonction de la production et de la demande prévues. Une des deux installations du système bi-énergie doit donc fonctionner, en fonction du prix du combustible et d'autres coûts.

### 3. Caractéristiques des chaudières électriques industrielles

#### 3.1 Quelques caractéristiques de fonctionnement importantes

La figure 5 représente le schéma général de fonctionnement pour la production de vapeur saturée. Il est possible de produire uniquement de l'eau chaude ou de l'eau chaude et de la vapeur saturée.

Dans le cadre d'une installation bi-énergie, il est facile de connecter la chaudière électrique au système et de la couper. Il convient de noter ici que, selon la construction de la chaudière à combustible fossile, le passage de la chaudière électrique à l'autre peut durer jusqu'à quelques heures.

La préparation de l'eau alimentant des chaudières est importante par suite des différences de conductivité exigée pour les divers types de chaudière. La figure 5 illustre les principes de commande et de surveillance. Dans certains réseaux, la surveillance des défauts à la terre peut soulever certains problèmes, selon le système de mise à la terre du réseau.

#### 3.2 Utilisation de chaudières électriques

Une chaudière électrique peut être montée dans des installations industrielles où de la vapeur, de l'eau chaude ou les deux sont nécessaires. Quelques industries sont énumérées ci-dessous, à titre d'information générale:

- industrie chimique
- brasseries
- industries alimentaires
- industrie du papier et de la cellulose
- industrie textile
- hôpitaux
- piscines
- blanchisseries
- hôtels
- réseau régional de distribution d'eau chaude

### 4. Analyse économique

#### 4.1 Objectif

L'analyse vise à déterminer si, dans les conditions du marché suisse, le fonctionnement en bi-énergie d'une chaudière électrique industrielle, en liaison avec des chaudières à fuel, gaz ou charbon, peut être économique.

#### 4.2 Méthode

L'analyse est effectuée sur la base d'un exemple avec des prix donnés du

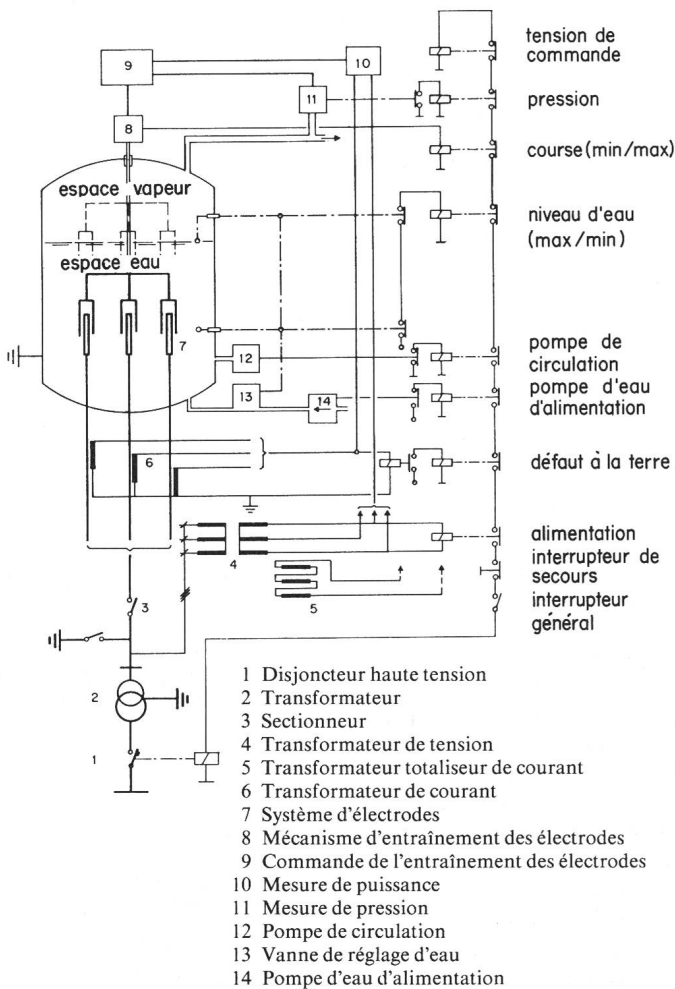


Fig. 5  
Schéma de chaudière électrique industrielle

tonne de vapeur, sera pris en compte et rendu égal à la somme du coût en capital  $C_s$  de la chaudière électrique par tonne de vapeur et du coût  $C_E$  de l'énergie électrique.

$$C_f = C_s + C_E \dots \quad (2)$$

#### 4.4 Données connues

Caractéristiques nominales de la chaudière électrique:

20 kV, 17 MW, 25 t/h, 13 bars

Investissement	FS 1 210 000.-
Taux d'intérêt réel	4%
Annuité	FS 89 056.-
Utilisation de l'installation	7000 h/an
Utilisation de la chaudière électrique	250-7000 h/an
Température d'utilisation de l'eau	105 °C

#### 4.5 Calculs

Enthalpie de l'eau à 105 °C  
= 440,2 kJ/kg

Enthalpie de la vapeur saturée à 13 bars = 2785,4 kJ/kg

Chaleur requise/kg de vapeur = 2345,2 kJ. Le tableau I indique la quantité de combustible nécessaire pour 1 tonne de vapeur et les coûts de combustible/tonne de vapeur. La dernière rangée de chiffres indique les prix équivalents  $P_f$  d'une unité d'énergie électrique, compte tenu qu'il faudrait 658 kWh dans une chaudière électrique pour produire 1 tonne de vapeur saturée, soit:

$$P_f = \frac{C_f}{658}$$

En divisant tous les termes de l'équation (2) par 658, on obtient de même:

$$P_f = C_c + P_B \dots \quad (3)$$

$C_c$  étant le coût en capital et  $P_B$  le seuil de rentabilité par kWh d'énergie électrique.

$C_c$  peut se déterminer comme suit:

Coût en capital de la vapeur/tonne

$$C_s = \frac{\text{annuité } A}{25 \times \text{nombre d'heures de fonctionnement/an}}$$

$$C_e = \frac{C_s}{658}$$

fuel, du gaz et du charbon à pouvoir calorifique donné, un prix de la chaudière électrique et un taux d'intérêt donné. La consommation et la production des deux chaudières seront considérées comme égales. Les courbes du seuil de rentabilité sont calculées par unité d'énergie électrique, en fonction du nombre d'heures de fonctionnement. L'influence du prix du combustible fossile, du taux d'intérêt et de la capacité de la chaudière électrique sur les courbes du seuil de rentabilité sera ensuite analysée.

#### 4.3 Considérations de coûts

1. Le coût en capital de la seule chaudière électrique sera pris en considération, car la chaudière existante à combustible fossile pourra souvent être mise en service sans aucune modification.
2. Le coût et la température de l'eau d'alimentation des deux chaudières sont considérés comme égaux.
3. Bien que les coûts de fonctionnement et d'entretien d'une chaudière électrique uniénergie soient très in-

férieurs à ceux d'une chaudière à gaz, fuel ou charbon uniénergie, aucune économie due au fonctionnement de la chaudière électrique ne sera prise en considération, car les deux installations doivent fonctionner et être entretenues alternativement.

4. Le taux d'intérêt nominal doit être ajusté en fonction de l'inflation, afin d'obtenir le taux d'intérêt réel.
5. La durée de vie de la chaudière électrique est fixée à 20 ans et l'annuité calculée comme suit:

$$A = C \frac{(1+i)^{20} \cdot i}{(1+i)^{20} - 1} \dots \quad (1)$$

avec: A = annuité

C = capital investi pour la chaudière électrique et

i = taux d'intérêt.

6. Les coûts des services auxiliaires et équipement des deux chaudières sont considérés comme égaux.

Avec les hypothèses précitées, seul le coût du combustible fossile,  $C_f$  par

Coût du combustible de divers types de chaudières pour la production de 1 t de vapeur saturée  
Chaleur requise = 2 345 200 kJ

Tableau I

	Fuel lourd	Gaz	Charbon	Electricité
Pouvoir calorifique en kJ	40 190/kg	33 490/m <sup>3</sup> 1)	29 310/kg	3 600/kWh
Rendement de la chaudière	87%	89%	80%	99%
Combustible nécessaire pour 1 t de vapeur saturée	67,1 kg	78,7 m <sup>3</sup>	100 kg	658 kWh
Prix du combustible en FS	0,42/kg	0,6/m <sup>3</sup>	0,4/kg	
Coût C <sub>f</sub> du combustible par tonne de vapeur saturée en FS	28,2	47,2	40	
Prix équivalent P <sub>f</sub> du combustible par kWh d'énergie électrique, en centimes	4,29	7,17	6,08	

1) Sous une pression de 1 bar et à une température de 20 °C.

Coûts en capital d'une chaudière électrique industrielle en fonction du nombre d'heures de fonctionnement

Tableau II

Heures de fonctionnement	Coût en capital C <sub>s</sub> par tonne de vapeur, en FS	Coût en capital C <sub>e</sub> par kWh d'énergie électrique, en centimes suisses
250	14,25	2,17
500	7,12	1,08
750	4,75	0,72
1000	3,56	0,54
1500	2,37	0,36
2000	1,78	0,27
2500	1,42	0,216
3000	1,19	0,181
3500	1,02	0,155
4000	0,89	0,135
4500	0,79	0,12
5000	0,71	0,108
6000	0,59	0,09
7000	0,51	0,078

Le tableau II présente les coûts en capital de la chaudière électrique en fonction du nombre d'heures de fonctionnement. La figure 6 représente C<sub>e</sub>. La figure 7 représente les droites de prix équivalent de combustible fossile, ainsi que les courbes du seuil de rentabilité calculées à l'aide de l'équation (3). Ces courbes indiquent le prix maximal, qui est égal au seuil de rentabilité d'une unité d'énergie électrique, en fonction du nombre d'heures de fonctionnement. Il est facile d'ajouter ou de soustraire aux coûts en capital les coûts non pris en considération ici, afin d'obtenir le cas échéant une courbe plus précise du seuil de rentabilité. Les effets d'une variation de la capacité de la chaudière électrique et du prix des combustibles fossiles ont été calcu-

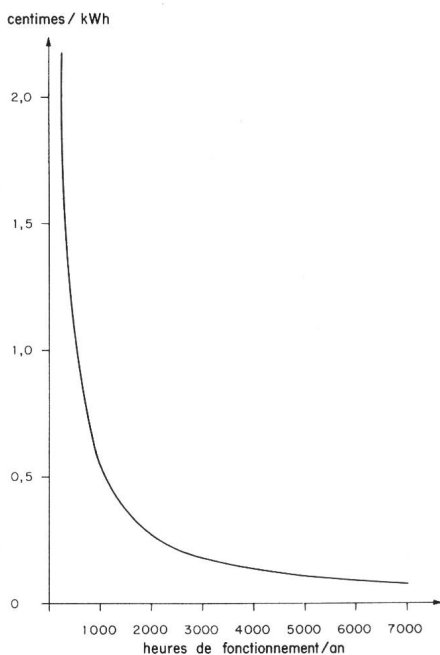


Fig. 6 Coût en capital C<sub>e</sub> d'une chaudière électrique de 25 t/h par kWh d'énergie électrique

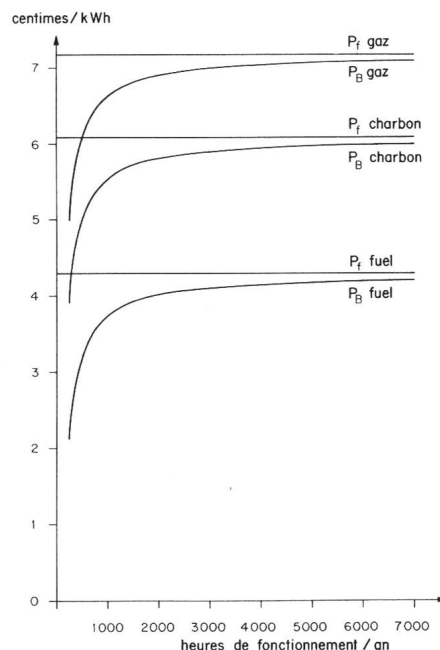


Fig. 7 Seuil de rentabilité P<sub>B</sub> et prix équivalent P<sub>f</sub> du combustible fossile par kWh d'énergie électrique

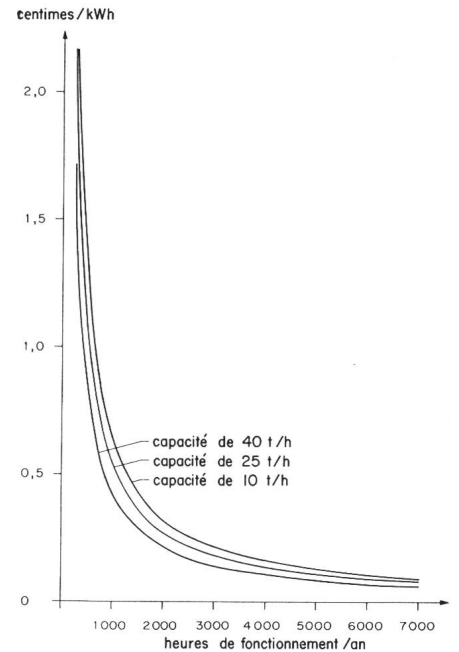


Fig. 8 Coût en Capital C<sub>e</sub> par kWh d'énergie électrique pour diverses capacités de la chaudière électrique

lés de la même façon et représentés sur les figures 8 et 9.

#### 4.6 Discussion des résultats

La figure 7 montre que toutes les courbes du seuil de rentabilité (P<sub>B</sub>) tendent asymptotiquement vers les droites du prix équivalent du combustible fossile (P<sub>f</sub>). Les coûts en capital ne sont plus un facteur important après 1000 heures de fonctionnement par an.

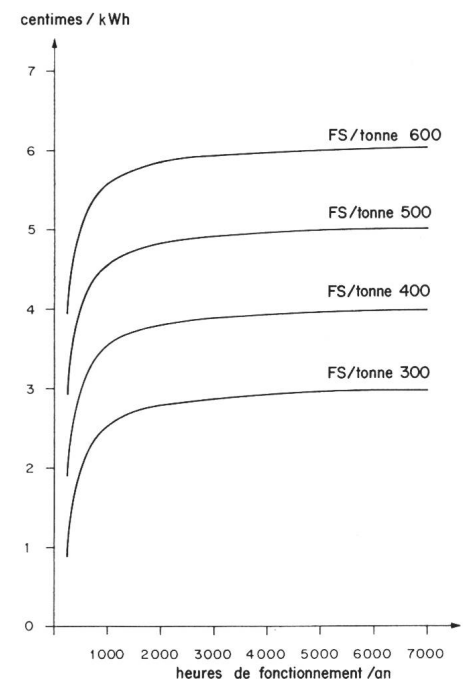


Fig. 9 Effet de la variation du prix du fuel sur le seuil de rentabilité P<sub>B</sub> par kWh d'énergie électrique

Le seuil de rentabilité de l'unité d'électricité augmente avec la capacité de la chaudière électrique. Ce résultat peut être déduit de la figure 8, qui représente les coûts en capital/kWh pour diverses capacités.

Les considérations précédentes montrent que les perspectives pour une chaudière électrique s'améliorent quand il est possible d'augmenter le nombre annuel d'heures de fonctionnement. Il va de soi par ailleurs que le prix de l'énergie électrique est également déterminé par la loi de l'offre et de la demande sur un marché libre. Il en résulte que l'électricité ne peut pas être fournie à un faible prix unitaire pendant des heures à forte demande. Cela limite le nombre d'heures de fonctionnement de la chaudière électrique.

## 5. Conclusions

1. Une énergie électrique suffisante est disponible en Suisse pendant les mois d'été, et notamment pendant les heures de faible demande du jour et des week-ends, pour alimen-

ter des chaudières électriques industrielles et compléter des combustibles fossiles par un fonctionnement biénergie.

2. Un prix souple de l'énergie électrique pour l'alimentation de chaudières électriques peut être calculé en fonction des éléments suivants: prix du combustible fossile, capacité de l'installation, coûts de fonctionnement et d'entretien, investissements pour la chaudière électrique, taux d'intérêt et nombre d'heures de fonctionnement de la chaudière électrique.
3. Les entreprises d'électricité peuvent accepter le risque du prix du combustible fossile, installer les chaudières électriques à leurs propres frais et fournir l'énergie chaque fois que cela convient, à un prix calculé uniquement sur la base du pouvoir calorifique et du prix ( $P_f$ ) du combustible fossile, comme précédemment indiqué.
4. L'utilisateur de vapeur et/ou eau chaude peut aussi prendre le risque d'installer la chaudière électrique à ses frais avec une garantie de four-

niture pendant un certain nombre d'heures par an, pendant toute la durée de vie de la chaudière et à un prix ne dépassant pas le seuil de rentabilité ( $P_B$ ) pour ce nombre d'heures.

5. La programmation de l'énergie et les détails techniques doivent être précisés en commun par l'utilisateur de vapeur et d'eau chaude d'une part, et les entreprises d'électricité d'autre part.
6. La méthode précédemment décrite pourrait être appliquée dans d'autres pays présentant une structure similaire de production d'énergie électrique et de demande de vapeur ou d'eau chaude pour l'industrie.

## Références

- [1] Elektrokessel. Bericht Nr. 25 der Schweizerischen Kommission für Elektrowärme SK EW, Zürich 1983.
- [2] ASE/UCS, statistique suisse de l'électricité 1981, Bulletin 73(1982), p. 331.
- [3] SEV/VSE, Vorschau auf die Elektrizitätsversorgung der Schweiz 1979 bis 1990, Bulletin 70(1979), 982.