**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 70 (1979)

**Heft:** 24

**Artikel:** Centrales chaleur-force ; types et applications

**Autor:** Suter, P.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-905458

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 16.07.2025

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

ordnung liegen Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Dampf- oder Gasturbinen. Wesentlich höher dagegen ist die Luftverschmutzung bei Totalenergieanlagen mit Gas- oder Dieselmotoren.

Es stellt sich also letztlich die Frage, ob ein alter Ölheizkessel mit schlechtem Nutzungsgrad ersetzt werden soll durch eine moderne Totalenergieanlage mit Dieselmotor mit nicht viel besserem Nutzungsgrad oder durch einen modernen, gut isolierten, auf das Kamin abgestimmten Heizkessel mit hohem Nutzungsgrad; wobei auch hier durch Abgas-Wärmetauscher, andere Lösungen für die Warmwasserbereitung im Sommer usw. noch erhebliche Nutzungsgradverbesserungen möglich sind.

Die Fig. 7 zeigt die Verhältnisse in bezug auf den Einsatz der Primärenergie bei Deckung eines Bedarfs von 66 Einheiten Wärme und 34 Einheiten Strom mittels Energieboxen und der konventionellen Lösung. Daraus geht hervor, dass nicht allein auf die eingesetzte Primärenergie abgestellt werden darf, sondern auch eine Bewertung der Energie notwendig ist. So benötigt die Lösung mit Heizölkessel und Strom ab thermischem Kraftwerk nur rund halb soviel an hochwertigem Brennstoff wie eine Totalenergieanlage (Energiebox).

### 3. Schlussfolgerung

Als Fazit kann gesagt werden, dass die Wärme-Kraft-Kopplung einen Beitrag zur Verminderung der Ölabhängigkeit leisten kann: einerseits in bestehenden thermischen Kraftwerken, bei denen die thermische Komponente genutzt wird, und anderseits in neuen Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, die ohne hochwertiges Heizöl auskommen.

**Adresse des Autors**
*W. Kälin*, Kreischef der Centralschweizerischen Kraftwerke, Hirschengraben 33, 6002 Luzern.

# Centrales chaleur-force; types et applications

Par P. Suter

*Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen unterscheiden sich bezüglich System und Anwendungszweck. Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale werden erläutert und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme aufgelistet.*

*Les installations de production combinée de chaleur et d'électricité diffèrent selon leur système et leur but d'utilisation. Leurs principales caractéristiques sont expliquées ci-après avec indication des avantages et inconvénients respectifs.*

### 1. Critères d'application de centrales chaleur-force

Avant de considérer les différents types, il est utile de mentionner les critères qui peuvent mener à l'application de l'un ou de l'autre. Ce sont:

- le rapport électricité/chaleur
- la variabilité du rapport électricité/chaleur
- la variabilité de la charge
- la variabilité du combustible
- le niveau de température requis
- l'économie énergétique et l'exergétique totale

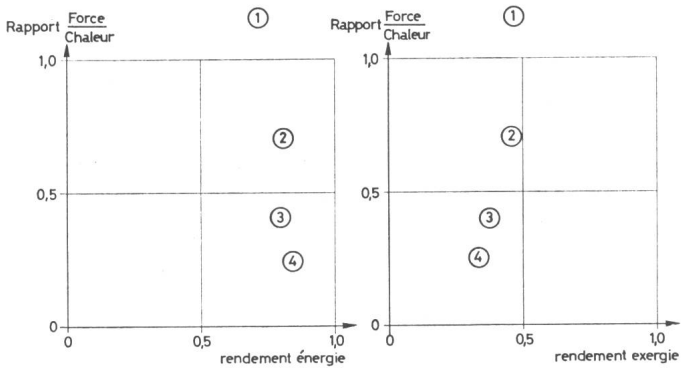



**Fig. 1 Rapport force/chaleur**
① Diesel et récupération
② Turbine à gaz/turbine à vapeur
③ Turbine à vapeur: condensation
④ Turbine à vapeur: contre-pression

#### *1.1 Rapport entre la puissance électrique et la puissance calorifique*

Le rapport demandé diffère fortement selon le type d'utilisation, c'est-à-dire du réseau: Quartier urbain, complexe d'hôpitaux, usine de papier, de soda, de pétrochimie.

Des valeurs entre 0 (chauffage pur) et $\infty$ (centrale électrique pure) sont possibles.

Dans le domaine de la centrale combinée chaleur-force proprement dite, des valeurs entre 0,2 (installation à vapeur à contre-pression) et 1,4 (Diesel) sont à mentionner, voir aussi la figure 1.

#### *1.2 Variabilité du rapport force/chaleur*

S'il existe des complexes industriels où ce rapport est assez fixe, il varie fortement dans d'autres cas. Ceci est d'autant plus vrai pour les applications de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude; pour un quartier d'habitation on peut compter avec des rapports de besoins variant de 1 à 8 entre l'été et l'hiver. Donc cet aspect est des plus importants.

#### *1.3 Variabilité de la charge*

Il est évident que très rarement l'on ait affaire à une demande tout ou rien. Donc au contraire le besoin de chauffage ou de chaleur industrielle varie fortement. La variation de la charge de la centrale a d'ailleurs deux aspects:

- La variation est-elle possible?
- Peut-on réduire la charge sans baisser trop l'efficacité?

### *1.4 Variabilité du combustible*

Déjà pour des raisons économiques il peut être avantageux de pouvoir varier le combustible. Ceci devient d'autant plus impératif dans des époques où la législation écologique et la situation d'approvisionnement sont dans une évolution rapide, voire galoppante. Nous allons considérer les sources d'énergie suivantes: bois; charbon; ordures; pétrole brut / mazout léger; mazout lourd; gaz naturel ou synthétique; fission nucléaire; soleil.

### *1.5 Rendement ou utilisation totale*

On a évidemment un intérêt d'avoir une efficacité aussi grande que possible. Toujours si l'on a deux produits, la définition

$$\text{Rendement} = \frac{\text{valeur du produit}}{\text{valeur de l'énergie consommée}}$$

pose quelques problèmes, voir tableau I. Une première définition met simplement le total de l'énergie calorifique et électrique (sortie centrale) au numérateur. Le dénominateur avec le pouvoir calorifique des combustibles pose moins de problèmes. De cette façon on arrive au rendement énergétique qui aura 35 % pour une centrale force pure et 88 % pour une centrale chaleur pure. Il paraît donc que les constructeurs de ces dernières connaissent beaucoup mieux leur métier.

*Rendement, efficacité (définitions)* — Tableau I

$$\text{Rendement} = \frac{\text{valeur produit}}{\text{valeur input}}$$

$$\text{Rendement énergétique} = \frac{\text{énergie électrique} + \text{énergie chaleur}}{\text{énergie du combustible}}$$

$$\text{Rendement exergétique} = \frac{\text{exergie électrique} + \text{exergie chaleur}}{\text{exergie du combustible}}$$

$$\approx \frac{\text{énergie électrique} + \text{facteur} \times \text{énergie chaleur}}{\text{énergie du combustible}}$$

*Echelle thermodynamique pour exprimer la valeur de l'énergie* — Tableau II

| | Facteur |
|---|---|
| Travail mécanique | 1,0 |
| Electricité | ~ 1,0 |
| Rayonnement solaire | 0,95 |
| Pouvoir calorifique de charbon, bois, gaz, mazout | ~ 1,0 |
| Chaleur échangée à température $T$ | $(1 - T_0/T)$ |
| Chaleur d'un fluide entre les températures $T_\alpha$ et $T_\omega$ | $\frac{1}{h_\omega - h_\alpha} \int_\alpha^\omega dh\,(1 - T_0/T)$ |

Tableau III

| Exemple pour $T_0 = 10\,^0$C | Température | Facteur |
|---|---|---|
| Entrée turbine à gaz | 1000 °C | 0,57 |
| Entrée turbine à vapeur | 550 °C | 0,50 |
| Vapeur saturée | 120 °C | 0,40 |
| Eau | 120 °C | 0,16 |
| Eau | 80 °C | 0,11 |
| Eau | 40 °C | 0,06 |
| Eau | 10 °C | 0,0 |

Toutefois, il convient de dire que énergie n'est pas sans autre équivalent à énergie. L'énergie de l'air ambiante est énorme, mais ne vaut pratiquement rien; toute énergie a donc sa valeur, c'est-à-dire il faut la pondérer. La valeur pondérée s'appelle exergie, si cette pondération est faite de manière thermodynamique, en disant: Qu'est-ce que je pourrais en faire dans un cas idéal, ou qu'est-ce que j'aurais dû y consacrer dans un procédé idéal? Le coefficient de pondération est indiqué dans les tableaux II et III. On voit que l'électricité vaut environ six fois plus que la chaleur au niveau de 120 °C. Notons que pour identifier l'exergie d'un fluide, tel que l'eau chaude, il est important de donner aussi la température au niveau inférieur d'utilisation, parce qu'il cède sa chaleur en se refroidissant jusqu'à cette valeur. Il convient aussi de noter la différence entre l'exergie de la vapeur et celle de l'eau à la même température, parce que dans l'utilisation de la vapeur, une grande partie de la chaleur est cédée à haute température pendant la liquéfaction, sans que la température baisse (chaleur latente de condensation).

Si l'on veut établir le rendement dit exergétique, on mettra

$$\eta_x = \frac{\text{exergie électrique} + \text{exergie chaleur}}{\text{exergie combustible}}$$

et maintenant à cause du coefficient de pondération, la chaleur compte seulement pour un sixième, et la centrale de chaleur pure ($\eta_x = 16\,\%$) est moins bonne que la centrale de force.

Laquelle des deux notions est juste?

– Si les besoins en chaleur et force sont donnés et indiscutables, le rendement énergétique exprime très clairement la situation: Plus il est haut, plus la consommation de combustible est basse.

– Si par contre c'est le besoin final (chauffage p.ex) seulement qui est identifié et si la politique et la conception du réseau est encore ouverte, la considération exergétique est plus significative.

## 2. Types de centrales chaleur-force

### *2.1 Installation avec turbine à contre-pression* (fig. 2)

C'est l'installation la plus simple: on chauffe la vapeur à une pression et une température élevée, pour l'utiliser pour la production de la force au-dessus du niveau de température et pression demandé par la distribution de la chaleur.

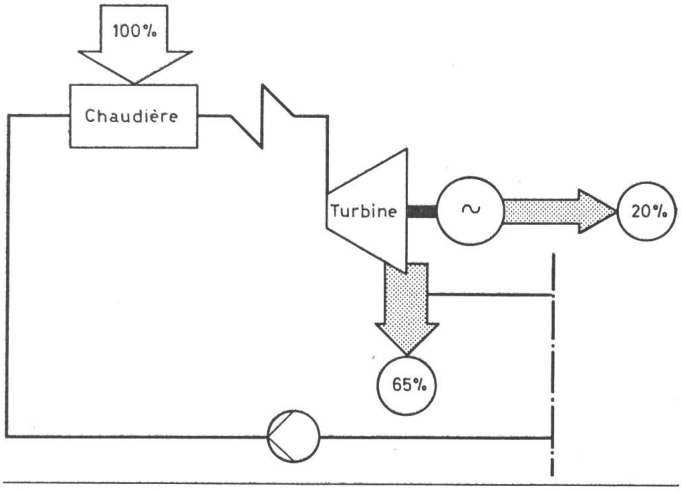



**Fig. 2 Turbine à contre-pression**

*Avantages:*

- Simplicité
- Bon rendement énergétique
- Pas de rejet thermique
- Charge variable dans un grand domaine par variation du débit admis
- Tous les combustibles, sauf nucléaire

*Inconvénients:*

- Rapport force/chaleur limité. Si en théorie ou pourrait l'influencer par le choix de l'état de la vapeur vive, cette liberté est en réalité fortement restreinte (matériaux, coût), voir fig. 3.
- Rapport chaleur/force pratiquement fixe à conditions d'admission données (tout ce qui passe par la turbine est ensuite utilisé pour la chaleur).

*Possibilités d'amélioration de la flexibilité:*

Une flexibilité peut s'introduire par exemple en renonçant à une partie de la vapeur finale (condenseur auxiliaire), mais évidemment au détriment du rendement, ou en stockant la vapeur excessive, ce qui demande de grands accumulateurs (seulement pour 1–2 jours discutables) (fig. 4).

*2.2 Installation à vapeur: condensation/soutirage* (fig. 5)

*Avantages:*

- Rapport élevé force/chaleur possible
- Large gamme de rapports force/chaleur possibles
- Large variabilité du rapport par une réduction de la chaleur en dirigeant un plus grand débit vers le condenseur. Limites par les aubages de la turbine et par le condenseur, qui doit avaler la vapeur détendue
- Tous les combustibles

*Inconvénients:*

- Rejet thermique
- Rendement énergétique moins bon
- Pertes dans les régimes réglés par les vannes semi-ouvertes

*Possibilités d'amélioration de la flexibilité:*

- Amélioration par soutirage multiple
- Amélioration du rendement et de la flexibilité par branchement en parallèle de deux turbines à contre-pression/condensation, voir fig. 6. Cette dernière exécution est appropriée pour les grandes installations, notamment les centrales atomi-

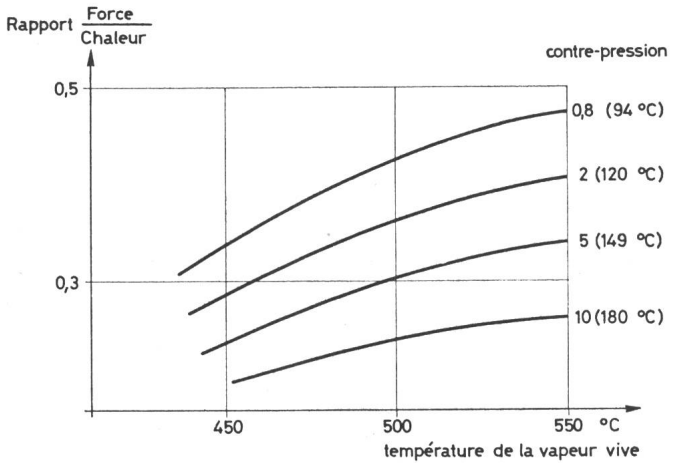
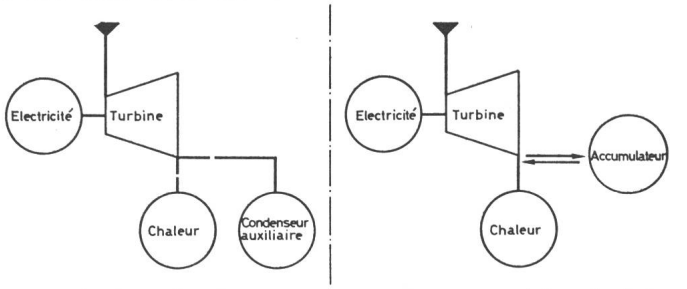



**Fig. 3 Rapport force/chaleur en fonction de la température de la vapeur vive**




Bypass du réseau dans le condenseur auxiliaire (mauvais rendement!)

Avec accumulateur de chaleur

**Fig. 4 Amélioration de la flexibilité d'une centrale à contre-pression**

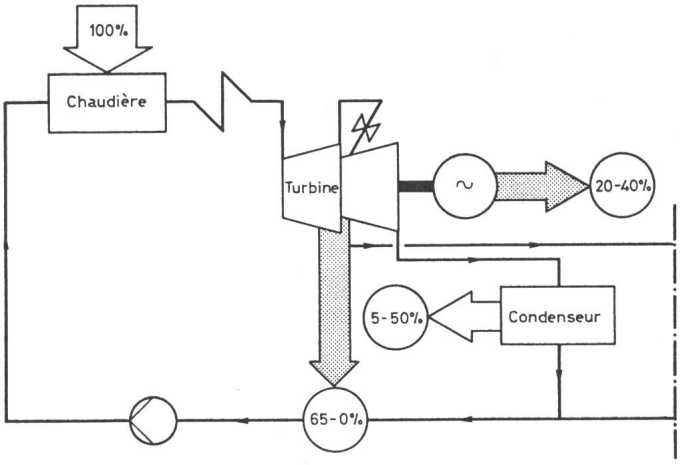



**Fig. 5 Installation à vapeur: condensation avec soutirage**

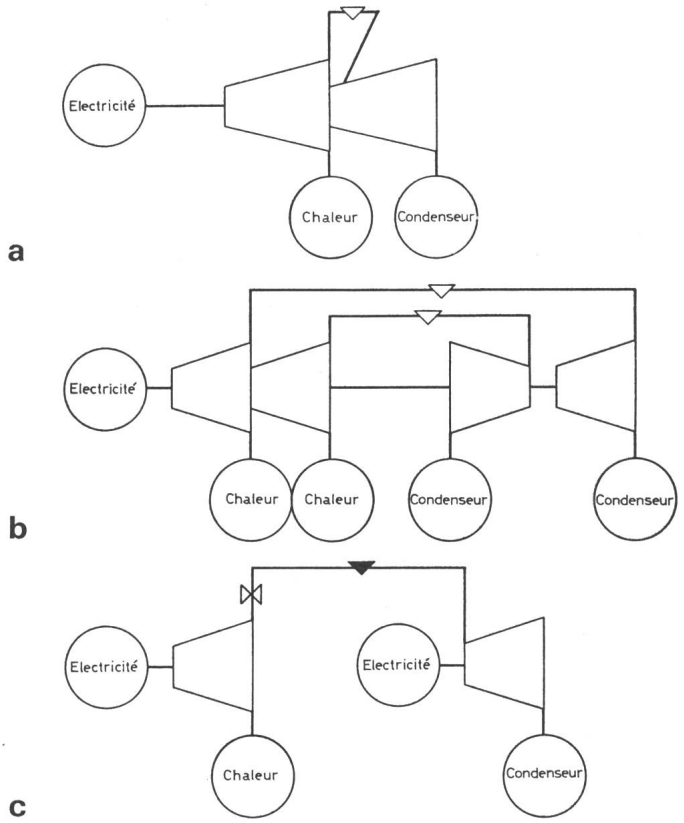



**Fig. 6 Amélioration de la flexibilité d'une centrale à condensation avec soutirage**

a Soutirage multiple à différents niveaux
b Soutirage multiple, plusieurs corps
c Combinaison contre-pression/condensation en parallèle

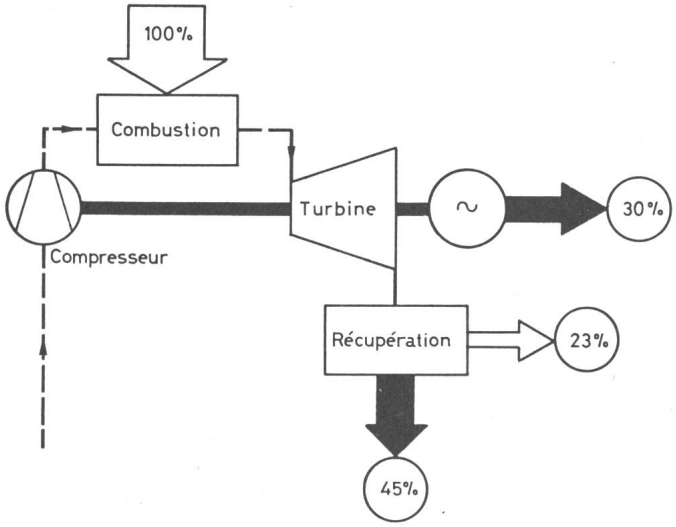



**Fig. 7 Turbine à gaz à cycle ouvert avec chaudière de récupération**

ques. La perte en puissance électrique est de l'ordre de 20 à 30% de la puissance calorifique prélevée.

Le rendement énergétique monte, tandis que le rendement exergétique ne varie que légèrement.

*2.3 Turbine à gaz à cycle ouvert avec chaudière de récupération* (fig. 7)

La haute température des gaz à la sortie de la turbine permettent une récupération considérable, limitée seulement par la corrosion éventuelle dans la chaudière (s'il y a du soufre dans le combustible). (Le rendement est bon en dépit de ce haut rejet à cause de la température d'admission très élevée (actuellement 1000–1200 °C).

*Avantages:*

- Rapport force/chaleur haut
- Rapport force/chaleur variable
- Charge variable
- Démarrage rapide
- Rendement élevé
- Aucun besoin d'eau

*Inconvénients:*

- Limitation de combustible (gaz, pétrole brut ou distillé)

*2.4 Turbine à gaz à cycle fermé* (fig. 8)

Le gaz fait un cycle fermé; le niveau de pression est largement variable sans changer les autres données (rapport de pression, température); seulement les puissances fournies et consommées changent proportionnellement à ce niveau. Il en ressort donc les avantages suivants:

- haut rapport force/chaleur
- charge variable à rendement constant
- tous les combustibles
- bon rendement énergétique

*Inconvénients:*

- Variabilité limitée du rapport force/chaleur (il faut sortir toute la chaleur, à moins qu'on installe un refroidisseur auxiliaire)
- Assez cher (chambre de combustion avec échauffement du fluide du cycle par échangeur, avec mauvais transfert (gaz!)
- Limitation de la température maximale (750–800°), rendement exergétique moins bon.

*2.5 Combinaison turbine à gaz/turbine à vapeur* (fig. 9)

Ces installations ont les plus hauts rendements connus aujourd'hui pour la production de la force (47% vendus!). Aussi pour la combinaison chaleur/force le rendement est bon, parce qu'on réunit les avantages de la haute température d'admission de la turbine à gaz et la basse température des rejets du cycle à vapeur. Sans combustion supplémentaire, la turbine à gaz produit environ $^2/_3$ de l'énergie électrique; avec combustion supplémentaire, le rapport force/chaleur tombe, et la répartition force/chaleur est plutôt $^1/_2 : ^1/_2$ ou $^1/_3 : ^2/_3$.

*Avantages:*

- Charge très variable
- Bon rendement
- Démarrage turbine à gaz rapide
- Rapport élevé force/chaleur (jusqu'à 1,1)
- Installation successive possible
- Large gamme de rapports possibles (par combustion supplémentaire)

*Inconvénients:*

- Limitation du combustible pour la turbine à gaz

*2.6 Diesel avec chaudière de récupération*

Dans les gaz d'échappement et dans l'eau de refroidissement des moteurs, on peut récupérer environ 30% de la chaleur. Avec le bon rendement électrique du moteur (40 à 42%), on arrive à un rendement global d'environ 70%.

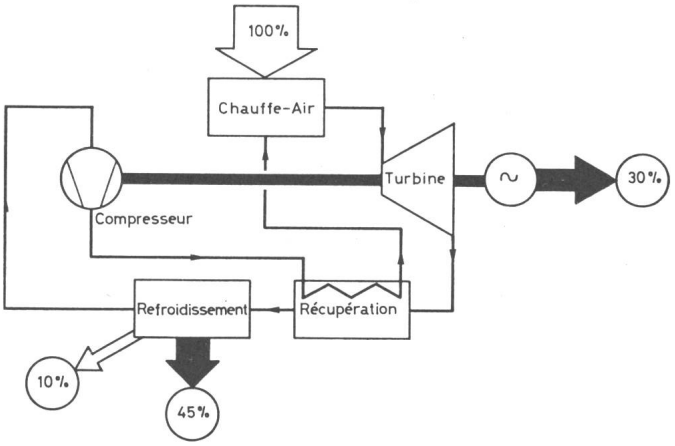



**Fig. 8 Turbine à gaz à cycle fermé**

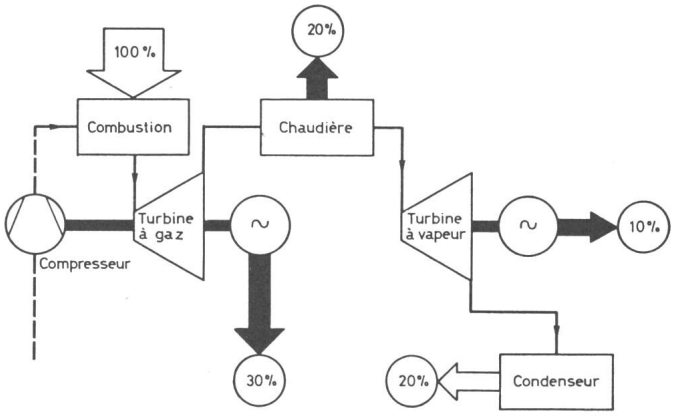



**Fig. 9 Combinaison turbine à gaz/turbine à vapeur**

*Avantages:*

- Très haut rapport force/chaleur (à 1,4)
- Démarrage très rapide
- Tous les combustibles liquides et gazeux
- Large et rapide variation de la charge

*Inconvénients:*

- Rendement énergétique total réduit
- Variabilité du rapport force/chaleur limité

### 3. Combustibles

Dans le tableau IV est montré l'applicabilité des différents combustibles.

Les installations à vapeur offrent le plus grand choix, les turbines à gaz à cycle ouvert le plus restreint. L'énergie solaire, une possibilité du futur, demande quelques explications. Les installations à vapeur peuvent se présenter dans la forme de

- collecte centrale d'énergie sur une tour, après réflexion du rayonnement par un champ de miroirs
- énergie collectée distribuée auprès de chaque miroir, par und fluide caloporteur.

Dans chaque cas, une capacité d'accumulation d'énergie suffisante doit couvrir les nuits et les passages des nuages.

Le reste de l'installation (après la chaudière) est conventionnelle.

A cause de son caractère aléatoire, l'énergie solaire ne se prête que pour des installations combinées avec d'autres sources d'énergie et pour le cas où un besoin en énergie suffisant se présente en été.

*Applicabilité de différents combustibles* Tableau IV

| Combustible | Vapeur condensée | Vapeur contrepression | Turbine à gaz cycle ouvert | Turbine à gaz cycle fermé | Installation combinée | Diesel |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bois | × | × | | × | | |
| Charbon | × | × | | × | | |
| Ordures | × | × | | × | | |
| Pétrole | × | × | × | × | × | × |
| Mazout | × | × | | × | | × |
| Gaz | × | × | × | × | × | × |
| Nucléaire | × | × | | (×) | | |
| Soleil | × | × | (×) | (×) | (×) | |

(×) Projets

### 4. Applications

Le choix du type dépend:

- des données: taille, réseau, refroidissement, site, prescriptions écologiques, aménagement déjà existant
- des critères selon chapitre 2
- des réflexions métaéconomiques (optimisation de l'ensemble du réseau en incorporant les coûts sociaux et en tenant compte des conditions politiques).

Evidemment ces aspects se posent différemment

- pour la chaleur/force «privé» ou industrielle
- pour la chaleur/force «publique» tout en admettant que les deux secteurs sont souvent interconnectés.

### 5. Remarques générales

Pour finir, on peut remarquer:

- A tout ingénieur, économiste ou écologiste honnête il est clair que le couplage chaleur-force est un outil précieux et prometteur pour contribuer à la solution du grave problème énergétique.

Son introduction présente deux problèmes majeurs dans une démocratie telle que la Suisse:

a) Les investissements importants demandent une certaine obligation de raccordement, donc un certain sacrifice de liberté personnelle

b) Les investissements doivent être votés bien avant la mise en exploitation même partielle

Il est donc extrêmement important de veiller à une *information du public*

- de bonne heure
- claire et compréhensible
- montrant les aspects positifs et négatifs
- en acceptant aussi le dialogue,

à laquelle doit s'associer une *tarification transparente*, tout ceci dans l'espoir de pouvoir éveiller chez le citoyen la conviction, que telle centrale, tel aménagement est sa centrale, son aménagement. La tâche est difficile, mais elle peut être accomplie.

**Adresse de l'auteur**

*P. Suter*, Prof. Dr, directeur de l'Institut de thermique appliquée, Ecole Polytechnique Fédérale, Halle de Mécanique Ecublens, 1015 Lausanne.