

# La production combinée de chaleur et d'électricité – comparaison des différents types de centrales

**Pour la production combinée de chaleur et d'électricité – appelée également couplage chaleur-électricité – on peut mettre en œuvre des turbines à vapeur, des turbines à gaz ou la combinaison de celles-ci. Chaque variante offre des avantages particuliers, selon les combustibles utilisés, les frais de production de l'énergie électrique et de la chaleur, le type de centrale ainsi que la gamme de puissance. La comparaison de la rentabilité, de l'efficacité de la production d'énergie et des caractéristiques de régulation montre que la centrale à cycle combiné constitue le plus souvent la solution la plus économique et la plus avantageuse. Ci-après, nous décrivons des installations correspondantes avec des puissances supérieures à 25 MW, telles qu'elles sont utilisées par l'industrie et les entreprises d'électricité et de fourniture de chaleur à distance.**

**E**n comparaison de la production séparée de chaleur et d'énergie électrique, le grand avantage de la production combinée réside dans une meilleure utilisation du combustible, c'est-à-dire que les frais de combustible deviennent sensiblement plus bas. Cette amélioration de l'utilisation du combustible provient essentiellement de la récupération de la chaleur de condensation de la vapeur qui est perdue dans une centrale conventionnelle.

Les avantages de la production combinée de chaleur et d'électricité sont connus depuis longtemps. On en tire profit depuis des décennies dans l'industrie et dans les fournitures publiques d'énergie.

Deux possibilités s'offrent pour la production simultanée d'énergie et de chaleur. Dans la première, on utilise la vapeur à sa température maximale pour la production de courant électrique. **1** montre un exemple avec une turbine à vapeur à contre-pression.

Avec la seconde possibilité, on utilise la chaleur d'expansion d'un procédé à haute température pour la production d'électricité.

La production d'énergie électrique s'effectue à partir de la chaleur résiduelle à basse température et donc avec un rendement bas. Cette méthode est rarement économique. Dans la plupart des cas, il est plus avantageux d'utiliser la chaleur de perte sous forme de chaleur industrielle.

Cet exposé se limite aux centrales de chauffage, resp. à cycle combiné du premier type, vu qu'elles seules sont intéressantes du point de vue thermodynamique et les seules qui permettent une véritable économie d'énergie, c'est-à-dire une exploitation économique.

Les avantages de la production combinée de chaleur et d'électricité résultent de la meilleure utilisation de la chaleur de condensation

de la vapeur. Les générateurs de chaleur de chauffage relativement grands atteignent à vrai dire une utilisation du combustible au moins aussi bonne que celle des centrales de chauffage pures. Ces dernières offrent pourtant l'avantage qu'elles produisent l'énergie électrique avec une température de vapeur élevée et la chaleur à basse température. Du point de vue thermodynamique, en cas de production combinée de chaleur et d'électricité, la chaleur provient donc d'une énergie de basse qualité.

**2** montre le rapport d'utilisation du combustible lors de la production combinée de chaleur et d'électricité, avec différents rapports chaleur/électricité, en comparaison de la production séparée de chaleur et d'énergie électrique. Le point 1 représente un générateur de vapeur qui ne produit que de la vapeur avec un rendement de 90%. Par contre, le point 2 se rapporte à la production pure d'électricité d'une centrale à vapeur avec un rendement de 45%. La droite qui relie ces deux points fournit la relation entre l'utilisation du combustible et le rapport  $P/(P+H)$  pour des centrales correspondantes avec production de chaleur et d'électricité. La ligne supérieure montre la même relation pour le couplage chaleur-électricité. L'utilisation considérablement meilleure du combustible est évidente. Cet avantage est représenté par la surface bleue entre les deux lignes (1... 2).

D'autre part, les frais d'investissement des centrales à soutirage de chaleur sont généralement plus élevés que ceux des installations à production séparée de chaleur et d'électricité. Par la suite, on comparera les types de centrales suivants:

- A Centrale à vapeur chauffée au gaz ou au fuel, avec une turbine à vapeur à contre-pression **1**
- B Centrale à vapeur chauffée au gaz ou au fuel, avec une turbine à vapeur à soutirage **3**
- C Centrale à cycle combiné avec turbine à gaz, chauffée au gaz naturel ou au fuel, avec générateur de vapeur à récupération de chaleur **4**
- D Centrale à cycle combiné chauffée au gaz naturel ou au fuel, avec une turbine à vapeur à contre-pression **5**
- E Centrale à cycle combiné chauffée au gaz naturel ou au fuel, avec une turbine à vapeur à soutirage **6**

**Anton Rohrer**

ABB Production d'énergie SA

On ne considère pas ici les centrales chauffées au charbon, vu que dans le cas d'installations relativement petites, les économies en combustible ne compensent guère les frais d'investissement et d'exploitation plus élevés. S'y ajoute le fait que par suite des prescriptions concernant les émissions de plus en plus sévères, le seuil de rentabilité des centrales chauffées au charbon s'élève constamment. Malgré tout, une amélioration selon **2** peut aussi être atteinte pour une centrale au charbon selon **1**.

**Puissance et gamme d'exploitation**

**7** montre les gammes d'exploitation de la production de chaleur et d'électricité en fonction de l'utilisation du combustible pour les types de centrales A à E. Il en résulte que seule la turbine à vapeur à soutirage permet de répondre exactement aux demandes de chaleur

et d'électricité de tous les cas d'exploitation. Pour tous les autres types de centrales, cela n'est possible que dans une zone limitée.

Si dans une production combinée de chaleur et d'électricité le besoin d'énergie électrique est bas par rapport à celui de chaleur, la turbine à vapeur à contre-pression offre des avantages. Dans le cas contraire, lorsque le rapport électricité/chaleur est élevé, une centrale à cycle combiné avec une turbine à vapeur à soutirage est plus favorable. Les turbines à gaz avec générateurs à récupération de chaleur (type C) se situent entre ces deux types.

Une station de dérivation de vapeur peut agrandir la gamme d'exploitation de la production de chaleur des turbines à contre-pression et à soutirage. Pour les types de centrales C, D et E, une possibilité pour déplacer le rapport chaleur/électricité en direction de la chaleur réside dans l'incorporation

d'un chauffage d'appoint dans le générateur de vapeur à récupération de chaleur.

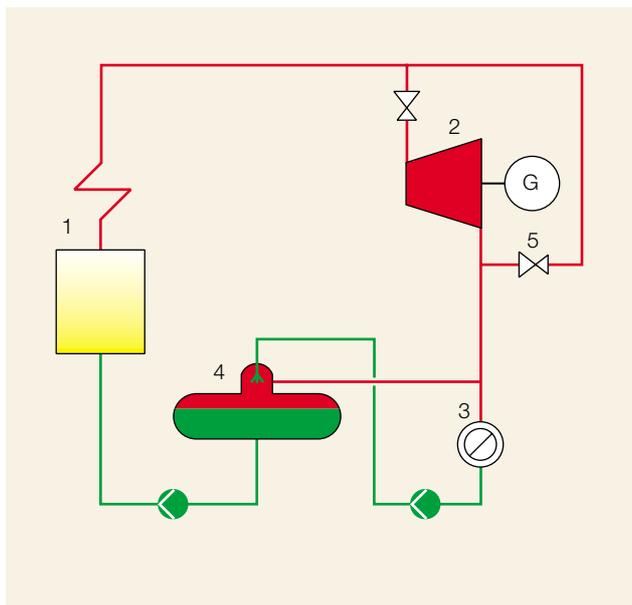
**Aptitudes de régulation et rendement en charge partielle**

Dans une centrale de chauffage ou à cycle combiné, la mission de la régulation consiste à adapter la production de vapeur industrielle ou de chaleur à la demande (voir exploitation à pleine charge d'un générateur de vapeur, resp. d'une turbine à gaz dans **7**).

Pour les types de centrales A à E, la régulation de l'exploitation ne pose pas de problème. Les difficultés se présentent pourtant lorsque la puissance électrique doit être réglée en même temps, par exemple lorsque la centrale travaille en îlot (c'est-à-dire en dehors d'un réseau interconnecté). Dans un tel cas, la turbine à vapeur à soutirage convient le mieux. Elle permet une régulation très indépendante des deux variables de sor-

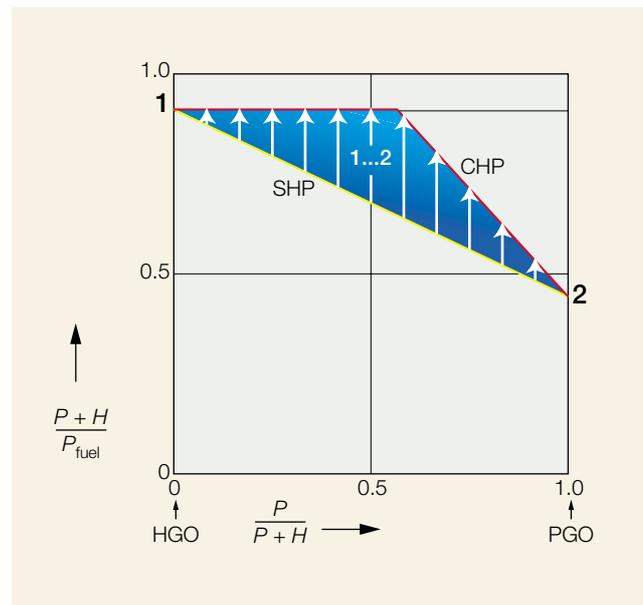
**Centrale thermique du type A: centrale à vapeur avec turbine à vapeur à contre-pression (principe)**

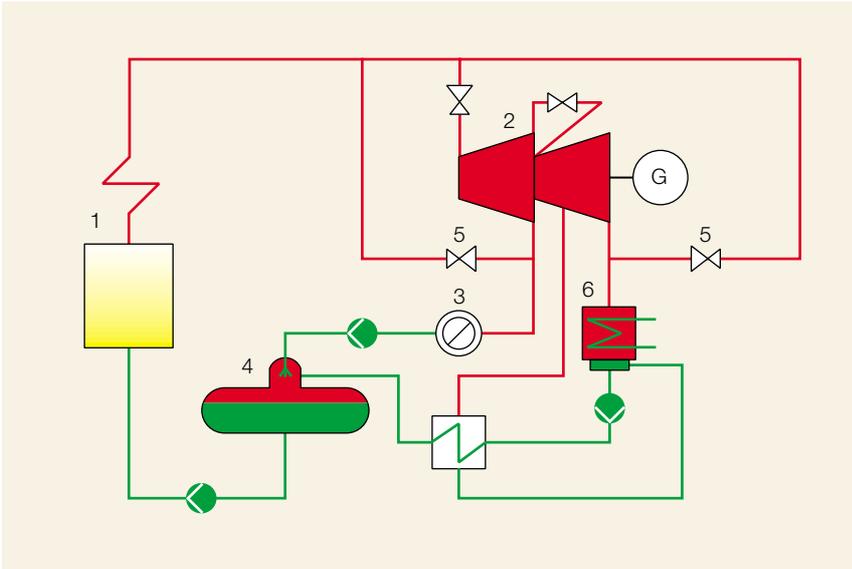
- 1 Générateur de vapeur
- 2 Turbine à vapeur à contre-pression
- 3 Consommateur de vapeur (resp. d'eau chaude)
- 4 Bâche alimentaire, dégazeur
- 5 Dérivation de la vapeur



**1 Utilisation du combustible lors de la production combinée de chaleur et d'électricité en comparaison de la production séparée de chaleur et d'électricité 2**

- CHP Production combinée de chaleur et d'électricité
- SHP Production séparée de chaleur et d'électricité
- HGO Production pure de chaleur
- PGO Production pure d'électricité
- $\frac{P + H}{P_{\text{fuel}}}$  Rapport d'utilisation du combustible
- $\frac{P}{P + H}$  Rapport électricité / électricité + chaleur
- P Puissance électrique produite (MW)
- H Puissance thermique produite (MW)
- $P_{\text{fuel}}$  Puissance calorifique du combustible (MW)
- 1...2 Meilleure utilisation de l'énergie primaire par les installations à couplage force-chaleur





**Centrale thermique du type B: centrale à vapeur avec turbine à vapeur à soutirage**

3

- 1 Générateur de vapeur
- 2 Turbine à vapeur à soutirage
- 3 Consommateur de vapeur (resp. d'eau chaude)
- 4 Bâche alimentaire, dégazeur
- 5 Dérivation de la vapeur
- 6 Condenseur

Sans chauffage d'appoint dans le générateur de vapeur à récupération de chaleur, la gamme de régulation de la vapeur industrielle reste limitée vers le haut, étant donné que la production maximale de vapeur dépend de la charge de la turbine à gaz.

tie, à savoir la quantité de chaleur et la puissance électrique, sans détériorer la rentabilité.

En revanche, en raison de sa flexibilité restreinte, la turbine à contre-pression convient le moins à cette double fonction. La vapeur industrielle en excédent doit être lâchée par une vanne. Si une telle vanne doit être utilisée fréquemment, la vapeur d'échappement devrait être menée dans un condenseur auxiliaire pour récupérer le condensat.

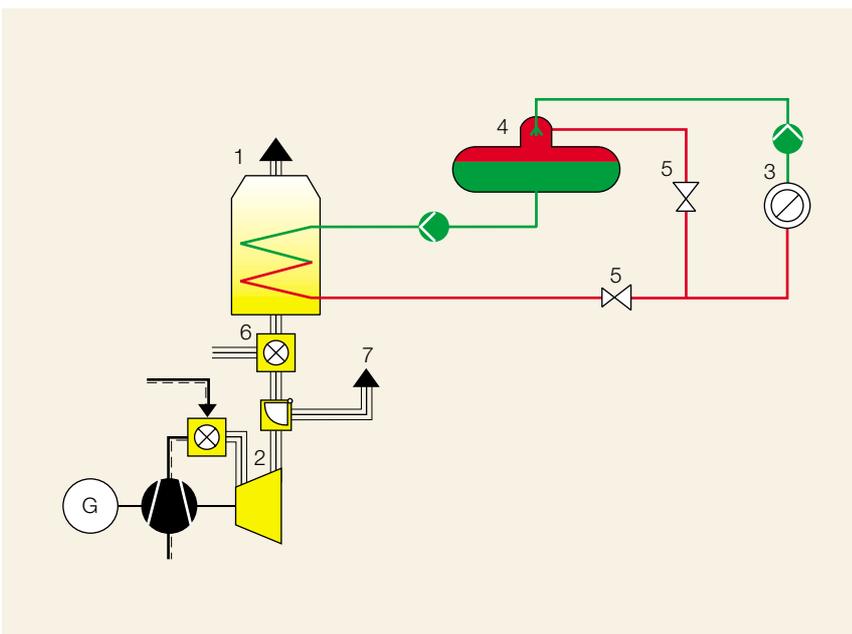
En ce qui concerne la régulation et l'exploitation en charge partielle, la centrale à cycle combiné et la turbine à gaz avec générateur

de vapeur à récupération de chaleur se situent entre ces deux cas limites. Surtout avec un chauffage d'appoint dans le générateur de vapeur à récupération de chaleur, la centrale à cycle combiné atteint des valeurs comparables à celles d'une turbine à vapeur à soutirage. Dans tous les cas, la rentabilité dépend fortement de la charge de la turbine à gaz, étant donné que la consommation de combustible est relativement élevée, également en cas de charge partielle. Les turbines à gaz modernes équipées d'un réglage efficace des aubes directrices arrivent pourtant aussi à résoudre ce problème.

**Comparaison de la rentabilité de différentes centrales industrielles**

En général, dans le domaine des centrales de chauffage, des analyses de rentabilité comparables ne se trouvent que difficilement, parce que toutes ces installations complexes sont adaptées à des exigences spécifiques. Un point est pourtant commun à la plupart des centrales industrielles: elles produisent principalement de la chaleur (eau chaude ou vapeur). L'énergie électrique s'obtient presque toujours auprès de l'entreprise d'électricité, mais non pas de la vapeur. Pour la mise à disposition de la vapeur industrielle dans une centrale industrielle, on a donc besoin au minimum de la quantité de combustible nécessitée par un générateur de vapeur simple. Le besoin supplémentaire de combustible correspond à la différence entre la consommation de combustible de la centrale thermique et celle du générateur de vapeur. Par conséquent, le rendement de la production d'énergie peut être définie comme suit:

$$\eta_p = \frac{P}{P_{\text{fuel}} - \frac{H}{\eta_{\text{HP}}}} \quad (1)$$



**Centrale thermique du type C: centrale à cycle combiné avec turbine à gaz et générateur de vapeur à chaleur de récupération**

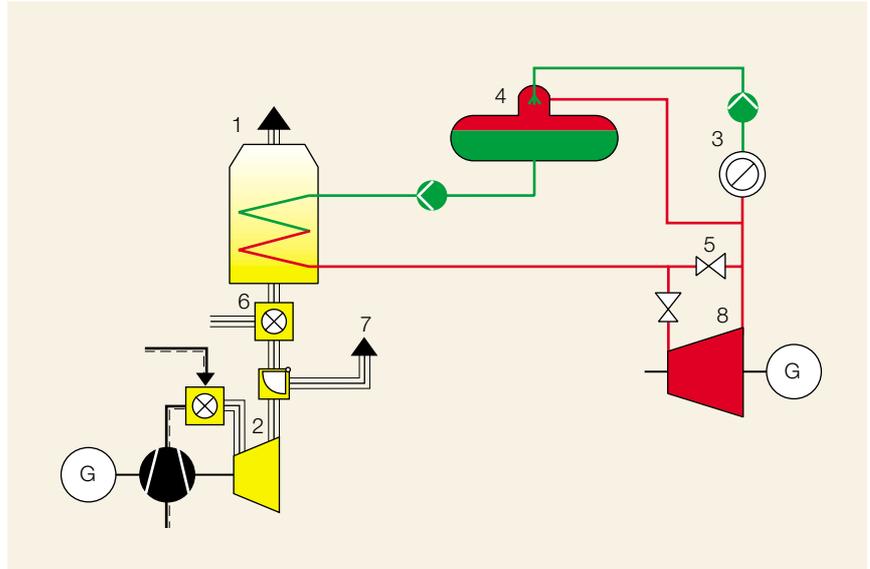
4

- 1 Générateur de vapeur à récupération de chaleur
- 2 Turbine à gaz
- 3 Consommateur de vapeur (resp. d'eau chaude)
- 4 Bâche alimentaire, dégazeur
- 5 Station de réduction de pression de la vapeur
- 6 Combustion d'appoint (option)
- 7 Dérivation vers la cheminée (option)

**Centrale thermique du type D: centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à contre-pression** 5

- 1 Générateur de vapeur à récupération de chaleur
- 2 Turbine à gaz
- 3 Consommateur de vapeur (resp. d'eau chaude)
- 4 Bâche alimentaire, dégazeur
- 5 Dérivation de la vapeur
- 6 Combustion d'appoint (option)
- 7 Dérivation vers la cheminée (option)
- 8 Turbine à vapeur à contre-pression

- $\eta_P$  Rendement de la production d'électricité
- P Puissance électrique fournie (MW)
- $P_{fuel}$  Puissance calorifique du combustible (MW, MJ/s)
- H Puissance thermique fournie (MW, MJ/s)
- $\eta_{HP}$  Rendement du générateur de vapeur



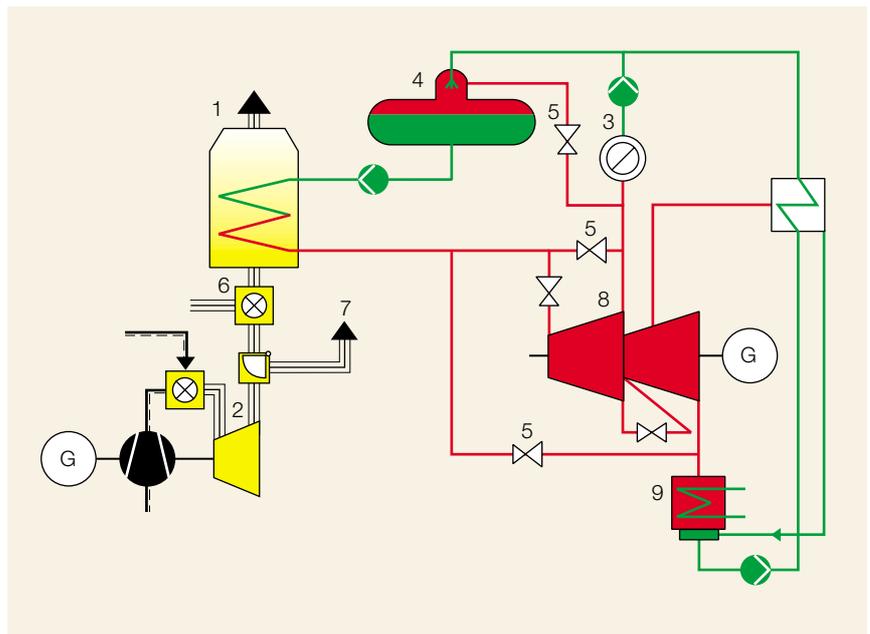
Les frais de production de courant peuvent être calculés à l'aide de la formule ci-après, afin de pouvoir les comparer avec les frais d'investissement et d'exploitation d'une centrale de chauffage, resp. d'une centrale thermique:

$$Y_P = \frac{(I_{CHPP} - I_{HP}) \Psi}{EN \cdot P} + \frac{Y_{fuel}}{\eta_P} + \frac{U_{CHPP} - U_{HP}}{EN \cdot P} + u'_{CHPP} - u'_{HP} \quad (2)$$

- $Y_P$  Frais de production d'électricité (unité monétaire/kWh)
- $Y_{fuel}$  Frais de combustible (unité monétaire/kWh)
- I Frais d'investissement, y compris impôts et assurance (unité monétaire)
- EN Durée d'exploitation annuelle équivalente (h/a)
- $u'$  Frais d'exploitation variables (unité monétaire/kWh)
- U Frais d'exploitation fixes et de personnel (unité monétaire/a)
- $\Psi$  Amortissements annuels (1/a)
- $\eta_P$  Rendement de la production d'électricité

**Centrale thermique du type E: centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à soutirage** 6

- 1 Générateur de vapeur à récupération de chaleur
- 2 Turbine à gaz
- 3 Consommateur de vapeur (resp. d'eau chaude)
- 4 Bâche alimentaire, dégazeur
- 5 Dérivation de la vapeur
- 6 Combustion d'appoint (option)
- 7 Dérivation vers la cheminée (option)
- 8 Turbine à vapeur à soutirage
- 9 Condenseur



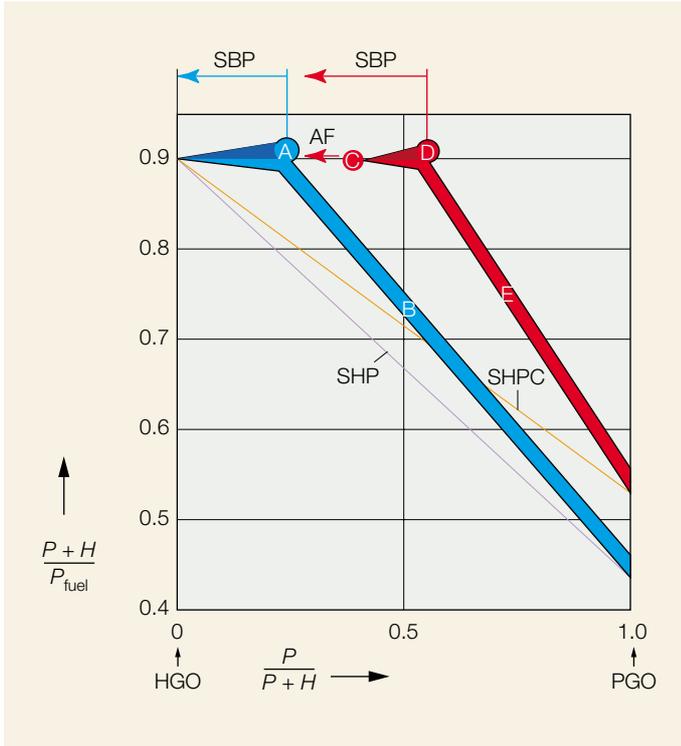
Indices:

- CHPP Production combinée de chaleur et d'électricité
- HP Installation de production de chaleur, resp. de vapeur

L'équation (2) permet d'apprécier s'il est plus économique de produire de l'électricité dans sa propre entreprise ou de couvrir tous les besoins auprès de l'entreprise d'électricité, c'est-à-dire de décider si l'usine propre ne doit fournir que de la vapeur ou que de l'eau chaude, ou aussi du courant électrique.

La rentabilité des types de centrales A à E se compare le plus facilement à l'aide d'un exemple: le *tableau 1* montre les frais du courant d'une papeterie accusant un besoin de 45 MW d'énergie électrique.

A l'aide du *tableau 1*, on peut constater qu'une centrale à cycle combiné avec turbine à gaz et un générateur de vapeur à récupération de chaleur (type C) fournit le courant électrique le meilleur marché. Elle ne couvre pourtant pas tout le besoin. La différence doit être achetée auprès de l'entreprise d'électricité. La solution suivante du point de vue des coûts



**Gammes d'exploitation des centrales des types A à E**

- A Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à contre-pression
- B Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à soutirage
- C Centrale à cycle combiné avec turbine à gaz et générateur de vapeur à récupération de chaleur
- D Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à contre-pression
- E Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à soutirage

- SHP Production séparée de chaleur et d'électricité dans des centrales à vapeur
- SHPC Production séparée de chaleur et d'électricité dans des centrales à cycle combiné
- HGO Production pure de chaleur
- PGO Production pure d'électricité
- SBP Exploitation avec dérivation de vapeur
- AF Extension par une combustion d'appoint dans le générateur de vapeur à récupération de chaleur (option)

$\frac{P+H}{P_{\text{fuel}}}$  Rapport d'utilisation du combustible

$\frac{P}{P+H}$  Rapport électricité / électricité + chaleur

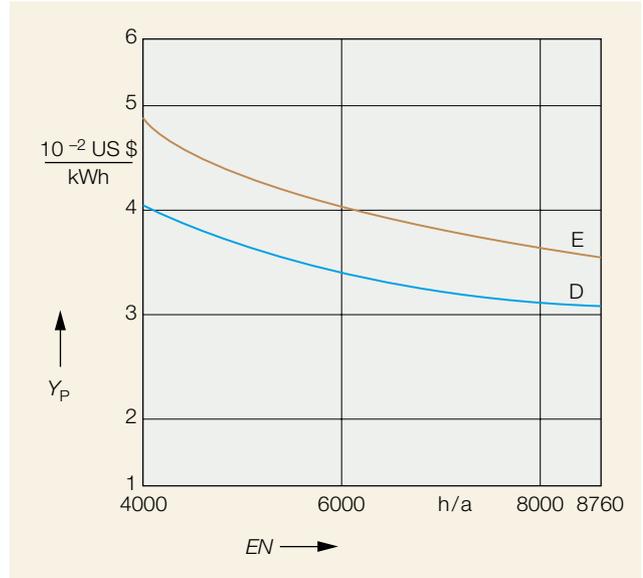
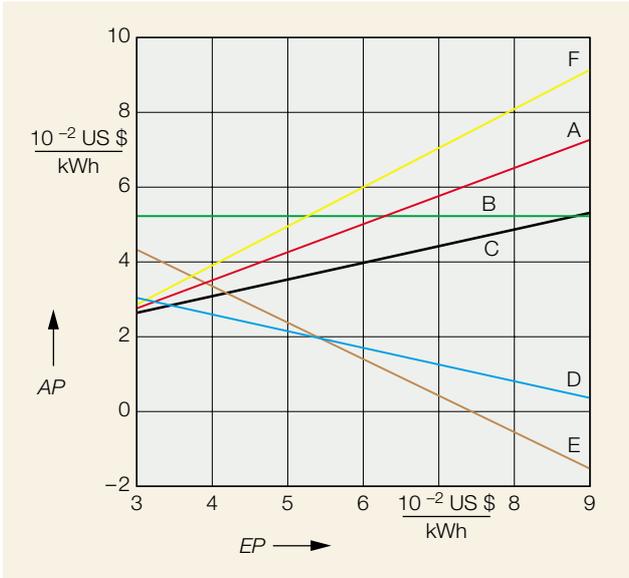
- P Puissance électrique produite (MW)
- H Puissance thermique produite (MW)
- $P_{\text{fuel}}$  Puissance calorifique du combustible (MW)

**Tableau 1: Comparaison de différents types de centrales industrielles pour une papeterie présentant un besoin d'énergie électrique de 45 MW<sub>e1</sub>**

Type de centrale		A	B	C	D	E
		Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à contre-pression	Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à soutirage	Centrale à cycle combiné avec turbine à gaz et générateur de vapeur à récupération de chaleur	Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à contre-pression	Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à soutirage
Puissance électrique nette	MW	15	45	26	65	90
Rendement de la production d'électricité $\eta_P$ (voir eq. 1)	%	81,3	43,1	95	76	75
Investissement supplémentaire par rapport au générateur de vapeur	10 <sup>6</sup> \$US	11,5	34,6	13,8	38,5	69,2
Frais de capitaux*	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh	1,54	1,54	1,06	1,18	1,54
Frais de combustible*	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh	1,55	2,92	1,32	1,66	1,68
Frais d'exploitation*	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh	0,3	0,7	0,23	0,38	0,46
Frais de production d'électricité*	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh	3,39	5,16	2,61	3,22	3,68

- Conditions cadres:
- Débit de la vapeur industrielle 25 kg/s (90 t/h)
  - Etat de la vapeur industrielle 3,5 bar / 190 °C
  - Besoin d'énergie électrique 45 MW
  - Durée d'exploitation équivalente 7000 h/a
  - Amortissement annuel 14,0% (10 années, intérêt 8%)
  - Prix du combustible (sujet à fluctuations) 3,5 \$US/GJ (gaz naturel)

\* Différence par rapport à la production simple de vapeur



**Coûts moyens du courant électrique en production propre avec vente, resp. achat de courant**

3

**Coûts de production d'électricité avec des durées d'exploitation annuelles équivalentes**

9

A...E Types de centrales  
 F Installation avec production de chaleur, mais sans production propre d'électricité  
 AP Coûts moyens du courant électrique en production propre avec vente, resp. achat de courant  
 EP Prix du courant à la vente, resp. à l'achat

D, E Types de centrales  
 Y<sub>p</sub> Coûts de la production d'électricité  
 EN Durée d'exploitation annuelle équivalente

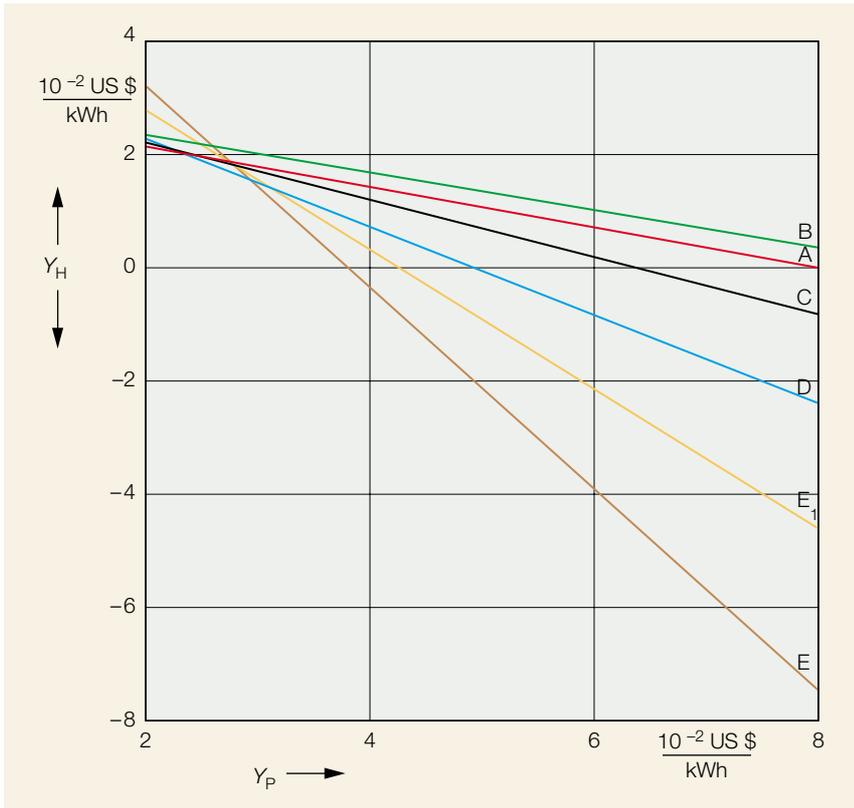
est celle d'une centrale à cycle combiné équipée d'une turbine à contre-pression. Elle produit pourtant davantage d'électricité que nécessaire pour l'usine. Dans ce cas, l'excédent

peut être vendu à l'entreprise d'électricité, ce qui contribue à diminuer les frais d'exploitation. La puissance de la centrale à turbine à soutirage correspond exactement au besoin,

mais son prix par kWh est le plus élevé. 3 montre les frais moyens du courant électrique produit par les différents types de centrales en cas de production propre avec

**Tableau 2: Comparaison de différents types de centrales de chauffage avec un besoin d'énergie thermique de 60 MW**

Type de centrale		A	B	C	D	E	E1
		Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à contre-pression	Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à soutirage	Centrale à cycle combiné avec turbine à gaz et générateur de vapeur à récupération de chaleur	Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à contre-pression	Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à soutirage	Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à soutirage
Puissance thermique	MW	60,9	60,9	76,0	60,9	60,5	60,5
Puissance électrique	MW	22,0	21,4	34,9	48,1	107,6	74
Puissance cal. du combust.	MW	94,0	95,5	129,6	125,3	211	156
Utilisation du combustible	%	88,2	86,2	85,5	87	79,7	86
Frais de capitaux	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh*)	0,56	0,69	0,57	0,81	1,84	1,6
Frais de combustible	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh*)	1,95	1,96	2,15	2,6	4,4	3,25
Frais d'exploitation	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh*)	0,28	0,28	0,28	0,37	0,38	0,38
Bénéfice par la vente d'électricité	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh*)	-1,70	-1,65	-2,15	-3,71	-8,36	-5,75
Frais de production de la chaleur	10 <sup>-2</sup> \$US/kWh*)	1,09	1,28	0,9	-0,07	-1,74	-0,52
Conditions cadres:		- Puissance thermique		approx. 60 MW			
		- Température d'aller du chauffage		95 °C			
		- Température de retour du chauffage		60 °C			
		- Amortissement annuel		10,2% (20 années, intérêt 8%)			
		- Prix du combustible (sujet à fluctuations)		3,5 \$US/GJ (gaz naturel)			
		- Prix de l'électricité (recettes)		4,7 × 10 <sup>-2</sup> \$US/kWh			
*) kWh de chaleur		- Durée d'exploitation équivalente		5000 h/a			



**Influence du prix de l'électricité sur les frais de production de chaleur dans les différents types de centrales de chauffage**

10

A...E Types de centrales  
 Y<sub>H</sub> Coûts de la production de chaleur  
 Y<sub>P</sub> Bénéfice de la vente d'électricité

vente ou achat (AP) de la différence par rapport au besoin effectif.

Selon le prix du courant électrique, dans presque tous les cas, la production combinée de chaleur et d'électricité est plus avantageuse que les solutions dans lesquelles toute l'électricité est achetée auprès de l'entreprise d'électricité. Selon le prix obtenable et la politique de l'entreprise d'électricité concernée, la vente au réseau public peut constituer une solution très avantageuse.

Dans une centrale à cycle combiné, le rapport électricité/chaleur est généralement élevé, de sorte que de l'électricité peut être livrée au réseau. La centrale à cycle combiné équipée d'une turbine à vapeur à soutirage se distingue par sa flexibilité élevée en ce qui concerne la production de chaleur. En raison de sa grandeur, elle offre la possibilité de vendre de l'électricité. Avec sa grande souplesse d'exploitation, elle représente le plus souvent la solution la plus économique. Les bénéfices de la vente de courant électrique dépendent bien entendu des conditions commerciales.

9 montre l'influence de la durée d'exploitation équivalente sur les frais de production d'électricité pour les centrales des types D et E.

**Tableau 3: Avantages et inconvénients des types de centrales A à E**

Type de centrale	Avantages	Inconvénients
A Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à contre-pression	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation poussée du combustible</li> <li>- Configuration simple</li> <li>- Utilisation de combustibles de basse qualité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité limitée en conception et en exploitation</li> </ul>
B Centrale à vapeur avec turbine à vapeur à soutirage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité élevée en conception et exploitation</li> <li>- Utilisation de combustibles de basse qualité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frais d'installation élevés</li> <li>- Besoin élevé d'eau de refroidissement</li> </ul>
C Centrale à cycle combiné avec turbine à gaz et générateur de vapeur à récupération de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation poussée du combustible</li> <li>- Configuration simple</li> <li>- Durée de livraison courte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement moyen en charge partielle</li> <li>- Moins appropriée pour des combustibles de basse qualité</li> </ul>
D Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à contre-pression	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation poussée du combustible</li> <li>- Frais d'investissement relativement bas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement moyen en charge partielle</li> <li>- Moins appropriée pour des combustibles de basse qualité</li> </ul>
E Centrale à cycle combiné avec turbine à vapeur à soutirage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne flexibilité en conception et exploitation</li> <li>- Investissements moyens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins appropriée pour des combustibles de basse qualité</li> <li>- Besoin moyen d'eau de refroidissement</li> </ul>

**Comparaison de la rentabilité de différentes centrales de chauffage**

Dans les centrales de chauffage, la situation initiale diffère de celle des centrales industrielles. La solution la plus économique est celle qui présente les frais de production de chaleur les plus bas.

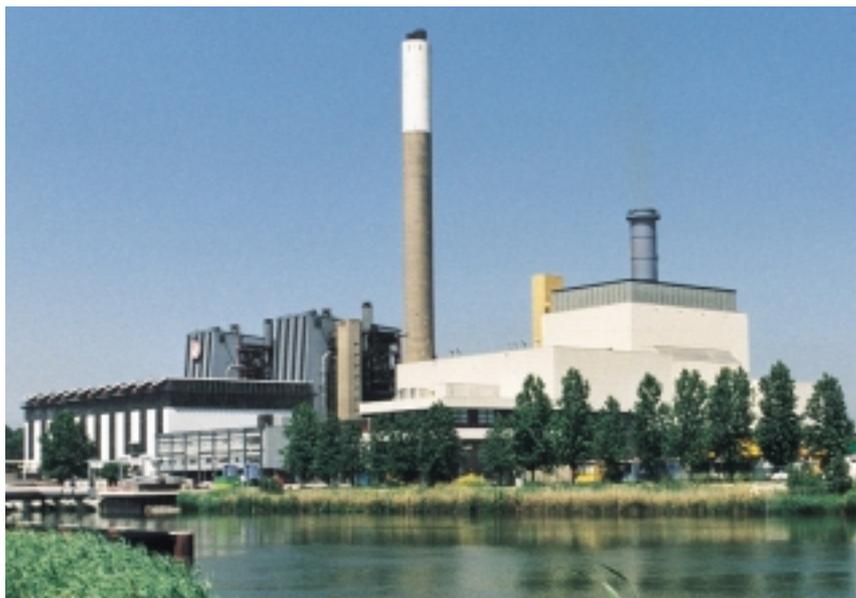
Dans ce cas, lors du calcul des coûts, l'énergie électrique est considérée comme un produit accessoire qui fournit certains bénéfices qui peuvent être déduits des frais d'exploitation. Les frais de production effectifs de la chaleur peuvent être calculés à l'aide de la formule ci-après:

$$Y_H = \frac{I \cdot \Psi}{H \cdot EN} + \frac{Q_{\text{fuel}} \cdot Y_{\text{fuel}}}{H} + \frac{U}{H \cdot EN} - \frac{P \cdot Y_P}{H} \tag{3}$$

- $Y_H$  Frais de production de la chaleur (unité monétaire/kWh)
- $Y_P$  Prix de vente du courant électrique (unité monétaire/kWh)
- $Y_{\text{fuel}}$  Frais de combustible (unité monétaire/kWh)
- $I$  Frais d'investissement, y compris impôts et assurance (unité monétaire)
- $EN$  Durée d'exploitation annuelle équivalente (h/a)
- $\Psi$  Amortissements annuels (1/a)
- $H$  Puissance thermique fournie (kW)
- $Q_{\text{fuel}}$  Quantité de chaleur fournie par le combustible (kWh)
- $U$  Frais d'exploitation (unité monétaire/a)
- $P$  Puissance électrique fournie (kW)

Dans le *tableau 2*, on compare différents types de centrales de chauffage avec un besoin de chaleur d'env. 60 MW et une durée de service équivalente de 5000 h/année. Généralement, une centrale de chauffage de ce type ne couvre que la charge de base d'un réseau de chauffage.

En revanche, une turbine à vapeur à soutirage d'une centrale à cycle combiné ou d'une centrale à vapeur conventionnelle suit le besoin de chaleur et reste donc en service pendant plus de 5000 h/année. Elle fournit en même de l'énergie électrique comme produit accessoire et constitue une source de bénéfice importante. En raison du rapport électricité/chaleur plus élevé en comparaison d'autres types de centrales, les bénéfices réalisés par le courant électrique sont les plus élevés. Sa rentabilité dépend donc des fluctuations du prix de l'électricité. En cas de prix élevé, la centrale à cycle combiné est plus économique, sinon les autres sont meilleures.



**Centrale à cycle combiné Diemen 33 aux Pays-Bas, une centrale de chauffage du type E**

11

**10** montre l'influence du prix de l'électricité sur les frais de production de chaleur. Si le prix du courant est supérieur à 0,03 \$/kWh, la centrale à cycle combiné de cet exemple est plus économique. Dans ce cas, la centrale à cycle combiné équipée d'une turbine à vapeur à soutirage détient la première place. A cause de sa flexibilité en production de chaleur, l'énergie électrique est produite pendant toute l'année à titre de sous-produit.

**Conclusions**

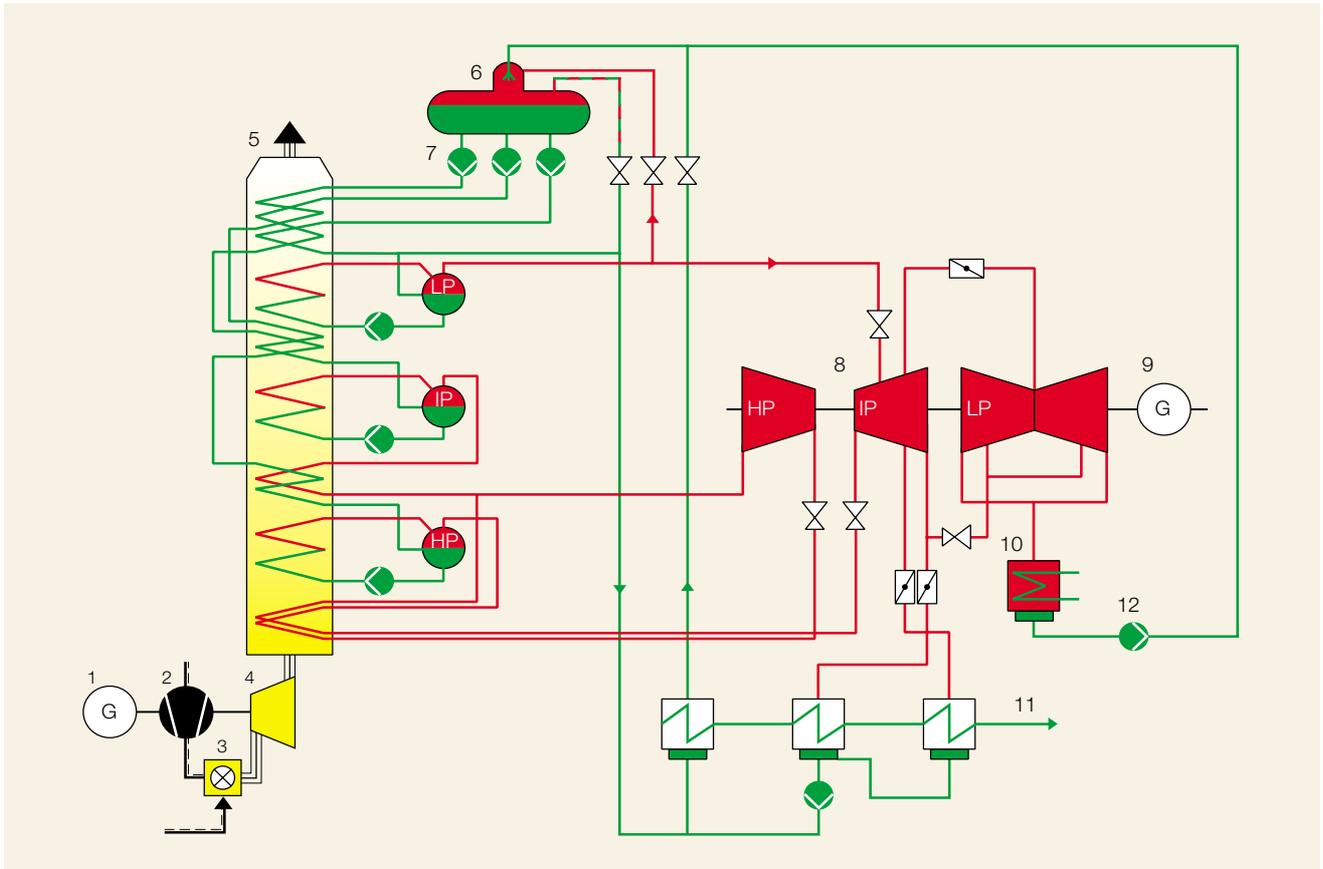
Le *tableau 3* fournit une vue d'ensemble des

avantages et des inconvénients des différents concepts de la production combinée d'électricité et de chaleur. On peut constater que les centrales à cycle combiné conviennent le mieux dans la majorité des cas. En outre, leur exploitation est simple et économique, avec l'utilisation la plus poussée du combustible.

Un exemple d'une telle installation est donné par la centrale à cycle combiné de Diemen 33 aux Pays-Bas **11**. Elle remplacera cette année les deux blocs conventionnels chauffés au gaz, resp. au fuel 31 et 32, en assurant l'alimentation du réseau de chauffage à

**Tableau 4: Données techniques de la centrale à cycle combiné Diemen 33 aux Pays-Bas**

Données générales		
Exploitant:	Energieproduktiebedrijf UNA	
Type de centrale:	Centrale à cycle combiné, type E	
Mise en service:	1995	
Données des performances		
Mode d'exploitation	Production d'électricité en été	Production de chaleur en hiver
Série de centrale à cycle combiné (type de turbine à gaz)	1 x KA13E2-1 (GT13E2)	
Puissance totale (brute)	253 MW	228 MW
Production d'électricité de la turbine à gaz (brute)	162 MW	176 MW
de la turbine à vapeur (brute)	91 MW	52 MW
Production de chaleur	0 MW	193 MW
Rendement (brut)	55,5 %	48,4 %
Utilisation du combustible (nette)	54,7 %	88 %
Fréquence nominale	50 Hz	
Emissions de NO <sub>x</sub>	45 g/GJ Production de chaleur	



**Schéma thermique de la centrale à cycle combiné Diemen 33**

12

- |  |  |
|--|--|
| 1 Alternateur de la turbine à gaz                | 7 Pompes d'alimentation  |
| 2 Compresseur                                    | 8 Turbine à vapeur   |
| 3 Chambre de combustion                          | 9 Alternateur de la turbine à vapeur                           |
| 4 Turbine à gaz                                  | 10 Condenseur  |
| 5 Générateur de vapeur à récupération de chaleur | 11 Echangeur de chaleur pour le réseau de chauffage à distance |
| 6 Bûche alimentaire, dégazeur                    | 12 Pompe à condensat   |

- HP Partie haute pression  
 IP Partie moyenne pression  
 LP Partie basse pression

distance de la partie sud-est de la ville d'Amsterdam. L'avantage principal de la nouvelle installation réside dans son rendement net de 54,7%, qui se range parmi les plus élevés du monde. Le *tableau 4* fournit une vue d'ensemble des principales données techniques, tandis que **12** montre le schéma thermique de cette installation.

La technologie éprouvée des brûleurs EV «Dry low NOx» appliquée aux turbines à gaz assurent que les prescriptions hollandaises très sévères sur les émissions soient respectées sans problème, tout en maintenant le rendement élevé.

Les centrales électriques à vapeur ne sont plus intéressantes que les centrales à cycle combiné que si on doit utiliser des combustibles de basse qualité qui ne conviennent que mal aux turbines à gaz. D'autre part, les impé-

ratifs écologiques n'admettent souvent que des combustibles de haute qualité, de sorte que les centrales à cycle combiné restent néanmoins la meilleure solution.

**Bibliographie**

- [1] Schwarzenbach, A.: Réflexions fondamentales sur la production combinée de chaleur et d'électricité. *Revue Brown Boveri* 67 (1980) 3, 160-165.  
 [2] Kehlhofer, R.: Comparaison de centrales thermiques pour le couplage force-chaleur. *Revue Brown Boveri* 67 (1980) 8, 504-511.  
 [3] Schwarzenbach, A.; Wunsch, A. K.: Conception de systèmes de production d'électricité flexibles. *Revue ABB* 6/89, 19-26.  
 [4] Ziegler, D.; Lercher, G.: Pegus 12, the world's most efficient power station. *ASME publ.*, Oct. 1990, district heating CCPP.

[5] Plancherel, A.: Le principe du cycle combiné s'est instauré comme système de production d'énergie de l'avenir. *Revue ABB* 8/93, 5-12.

[6] Nielsen, H.; Warner, J.: Une procédure de sélection globale permet la conception optimale des centrales à cycle combiné. *Revue ABB* 8/93, 13-22.

[7] Frutschi, H.U.: Turbines à gaz à combustion séquentielle pour le couplage chaleur-électricité. *Revue ABB* 3/95, 4-9.

**Adresse de l'auteur**

Anton Rohrer  
 ABB Production d'énergie SA  
 Case postale  
 CH-5401 Baden  
 Téléfax: +41 (0) 56 205 6024