

PHYSIQUE INDUSTRIELLE

Étude d'une chaudière : Cycle de HIRN (30 points)

La partie III est indépendante.

Les gaz sortant d'un haut-fourneau sont récupérés et réutilisés grâce à leur combustion, pour le chauffage des chaudières.

Celles-ci ont pour but de chauffer de l'eau liquide et de la vaporiser afin d'obtenir de la vapeur sous pression, destinée à alimenter des turbosoufflantes. Ces dernières doivent ensuite envoyer l'air nécessaire à la réduction des oxydes de fer, dans le haut-fourneau, selon le schéma simplifié de l'annexe n° 1, figure n° 1, page 6/8.

La chaudière comporte trois parties : - un économiseur – un ballon vaporisateur – un surchauffeur représentés sur la figure n° 2 de l'annexe n° 1, page 6/8.

L'eau qui alimente la chaudière se vaporise en décrivant un cycle de **HIRN**.

Ce cycle peut être résumé par les transformations décrites ci-dessous.

Au point de départ en A : l'eau liquide se trouve à l'état saturant : pression initiale $P_A = 0,3$ bar
température $t_A = 70$ °C.

- **AB** : compression adiabatique réversible du liquide saturant grâce à une pompe, jusqu'à la pression $P_B = 30$ bar, sans changement notable de température : $t_B = t_A = 70$ °C.
- **BC** : en B, le liquide n'est plus saturant, on l'échauffe à la pression constante de 30 bar dans l'économiseur, jusqu'à la température $t_C = 236$ °C. Le point C appartient à la courbe de saturation.
- **CD'** : l'eau saturante se vaporise totalement dans le ballon, sous pression et température constantes $P_C = P_{D'} = 30$ bar et $t_C = t_{D'} = 236$ °C.
- **D'D** : la vapeur saturante sèche est alors surchauffée, toujours sous la pression constante de 30 bar, jusqu'au point D de température $t_D = 400$ °C.
- **DE** : l'eau est admise dans la turbine sous forme de vapeur surchauffée et subit une détente adiabatique réversible jusqu'à la pression $P_E = P_A = 0,3$ bar.
- **EA** : l'eau est totalement condensée à la pression de départ $P_A = 0,3$ bar.

I - Calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser 1 kg d'eau liquide en vapeur surchauffée

1. Exprimer puis calculer la quantité de chaleur Q_{BC} nécessaire à chauffer 1 kg d'eau dans l'économiseur.
On donne la chaleur massique de l'eau : $c = 4\,180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
2. Exprimer puis calculer la quantité de chaleur $Q_{CD'}$ nécessaire à vaporiser totalement 1 kg d'eau liquide dans le ballon.
On donne la chaleur latente de vaporisation de l'eau $L_v = 1\,800 \text{ kJ.kg}^{-1}$ à 236 °C.

3. Soit $Q_{D'D}$ la quantité de chaleur nécessaire à surchauffer 1 kg de vapeur d'eau saturante. Le diagramme de Mollier est donné à l'*annexe n° 2, pages 7/8 et 8/8*.
 - 3.1 Placer le point D' sur le diagramme de Mollier, relever la valeur $H_{D'}$ de l'enthalpie massique correspondante.
 - 3.2 Placer le point D sur le diagramme de Mollier, relever la valeur de H_D .
 - 3.3 En déduire la valeur de $Q_{D'D}$.
4. Déduire enfin la quantité de chaleur totale Q_T nécessaire à la vaporisation de 1 kg d'eau liquide en vapeur surchauffée sachant que l'on part du point B.
5. Sachant que les gaz récupérés à la sortie du haut-fourneau sont complétés par du gaz naturel et forment un mélange possédant un pouvoir calorifique inférieur PCI égal à $20\,000\text{ kJ.m}^{-3}$, déduire le débit volumique $q_{v(\text{mélange})}$ du mélange gazeux nécessaire pour vaporiser un débit massique d'eau $q_{m(\text{eau})} = 20\,000\text{ kg.h}^{-1}$.

II - Étude de la turbine

1. Sur le diagramme de Mollier, placer le point E de la sortie de la turbine et représenter la transformation DE en justifiant. En déduire l'enthalpie H_E .
Quel est l'état physique de l'eau en E ? Indiquer le pourcentage d'eau vapeur.
2. Calculer le travail W_{DE} échangé par 1 kg de vapeur avec la turbine.
3. En déduire la puissance totale échangée, pour un débit massique d'eau :
 $q_{m(\text{eau})} = 20\,000\text{ kg.h}^{-1}$.

III - Étude de l'économiseur

L'économiseur est un échangeur à tubes fonctionnant à co-courant et permettant de récupérer de la chaleur provenant des fumées de la chaudière. Cette chaleur permet de chauffer l'eau liquide de 70 °C à 236 °C .

Les fumées sortent de la cheminée de la chaudière à une température moyenne de 300 °C qui reste constante pendant le transit dans l'échangeur, grâce à un débit important.

1. En admettant que la valeur de la chaleur massique nécessaire à chauffer l'eau est $q_{BC} = 700\text{ kJ.kg}^{-1}$, calculer la puissance thermique nécessaire au chauffage de l'eau pour un débit d'eau de $20\,000\text{ kg.h}^{-1}$.
2. La puissance thermique d'un échangeur a pour expression $P = K S \Delta T$, avec ΔT moyenne logarithmique de la température et S surface de l'échangeur. On rappelle l'expression de ΔT :

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\text{entrée}} - \Delta T_{\text{sortie}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{entrée}}}{\Delta T_{\text{sortie}}}}$$

Faire un schéma simplifié de l'échangeur fonctionnant à co-courant, en faisant apparaître les trois températures (70 °C , 236 °C et 300 °C). Calculer la valeur numérique de ΔT .

En déduire la surface S de cet échangeur sachant que $K = 560\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

3. En déduire le nombre de tubes de l'économiseur sachant qu'un tube a un diamètre $d = 10\text{ cm}$ et une longueur de $L = 10\text{ m}$.

ANNEXE 1

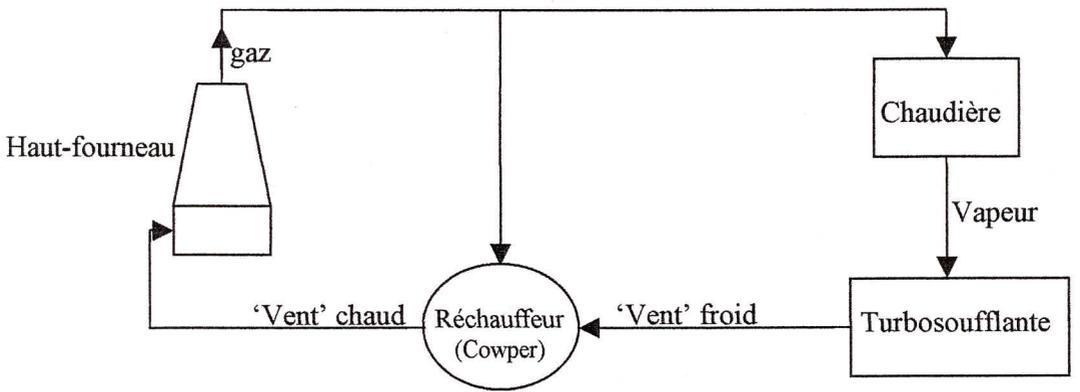


Figure n° 1

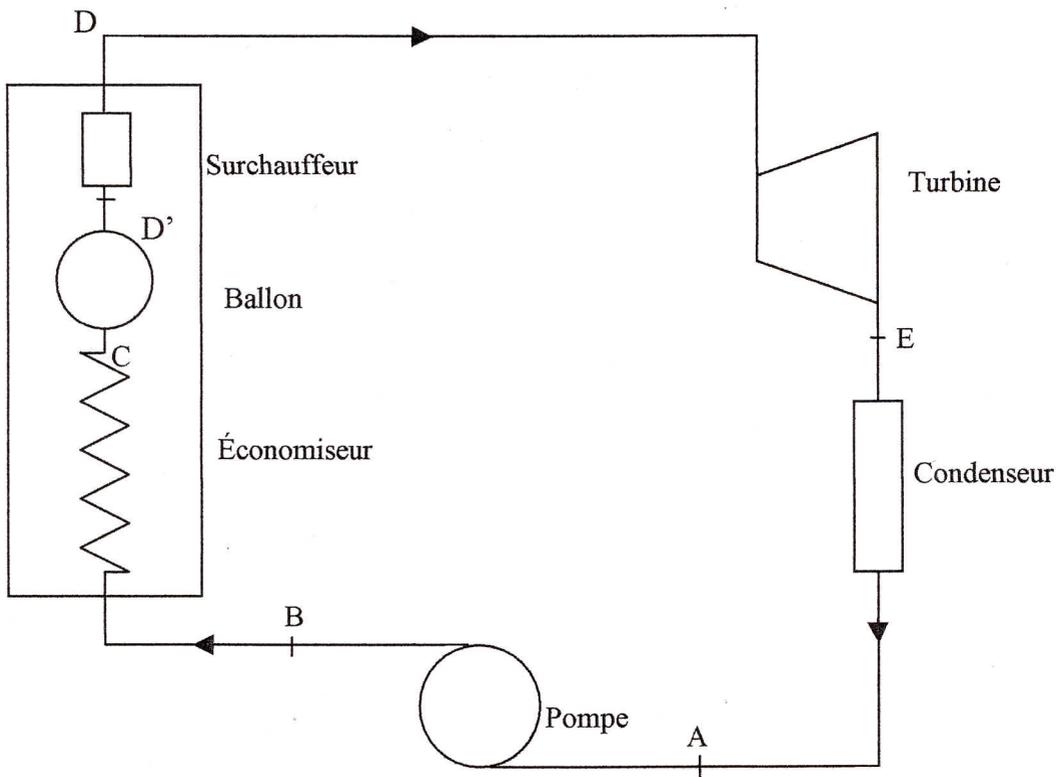


Figure n° 2

Diagramme de Mollier de la vapeur d'eau

