

BREVET de TECHNICIEN SUPÉRIEUR

**CONTRÔLE INDUSTRIEL et
RÉGULATION AUTOMATIQUE**

E-3 SCIENCES PHYSIQUES

U-31 CHIMIE-PHYSIQUE INDUSTRIELLES

*Durée : 2 heures**Coefficient : 2,5*

	Durée conseillée
Chimie industrielle	45 minutes
Physique industrielle	1 h 15

Avant de composer, assurez-vous que l'exemplaire qui vous a été remis est bien complet. Ce sujet comporte 8 pages numérotées de 1/8 à 8/8.

- **Chimie industrielle** : **page 2 à page 3**
- **Physique industrielle** : **page 4 à page 8**

ATTENTION :

L'ANNEXE 2 (pages 7/8 et 8/8) est fourni en double exemplaire, un exemplaire étant à remettre avec la copie ; l'autre servant de brouillon éventuel.

^v^v^v^v^v^v^v^v^v^v

***Aucun document autorisé.
Calculatrice réglementaire autorisée.
Tout autre matériel est interdit.***

^v^v^v^v^v^v^v^v^v^v

CHIMIE INDUSTRIELLE

EXERCICE n° 1 : combustion, calcul d'un pouvoir calorifique inférieur PCI (9 points)

Données :

Enthalpies standards de formation $\Delta_f H^\circ$ à 298 K d'espèces chimiques gazeuses en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$:

CO : -110,4 O₂ : 0 CO₂ : -393,1 CH₄ : -74,80 H₂O : -241,6

Volume molaire à 298 K : $V_m = 24,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$.

On désire calculer le PCI du mélange CO, CH₄ combustible utilisé pour le chauffage d'une chaudière utilisée pour chauffer et transformer de l'eau liquide en vapeur destinée aux turbosoufflantes alimentant en air un haut-fourneau.

I. Le monoxyde de carbone CO

1. Écrire l'équation de la réaction n°1 entre le monoxyde de carbone CO et le dioxygène de l'air O₂ sachant qu'il se forme du dioxyde de carbone CO₂.
2. Calculer l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^\circ(1)$ à 298 K associée à cette réaction pour une mole de monoxyde de carbone CO.
3. Après avoir rappelé la définition du PCI, calculer le PCI pour la combustion de CO en $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$

II. Le méthane CH₄

1. Écrire l'équation de la réaction n° 2 entre le méthane CH₄ et le dioxygène O₂, sachant qu'il se forme cette fois du dioxyde de carbone CO₂ et de l'eau vapeur H₂O.
2. En déduire l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^\circ(2)$ pour une mole de méthane CH₄.
3. Calculer son PCI en $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

III. Étude du mélange

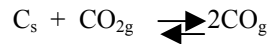
Sachant que le mélange contient, en volume, 60 % de CO et 40 % de CH₄, calculer le PCI d'un mètre cube de ce mélange.

EXERCICE n° 2 : équilibre de BOUDOUARD (11 points)

CAE3CI

Lors de la combustion incomplète du carbone, il se forme du monoxyde de carbone CO. C'est un gaz toxique, mais néanmoins très utile, par son caractère réducteur, pour réagir avec les oxydes de fer dans un haut-fourneau et obtenir de la fonte.

1. Écrire l'équation de combustion complète du carbone avec le dioxygène de l'air O_2 , sachant qu'il se forme du dioxyde de carbone CO_2 .
2. Quel problème environnemental important pose actuellement le dioxyde de carbone ?
3. Dans un haut-fourneau, par défaut de dioxygène, le carbone réagit à haute température avec le dioxyde de carbone, selon l'équilibre de BOUDOUARD :



- a. Exprimer la constante d'équilibre K en fonction des pressions partielles des gaz présents à l'équilibre (seuls les gaz interviennent dans l'expression de K).
 - b. Soit un mélange initial composé d'une mole de carbone C solide et d'une mole de dioxyde de carbone CO_2 gazeux. L'équilibre étant établi à une température donnée, dresser un tableau d'avancement de la réaction.
En déduire le nombre total de moles de gaz en fonction de l'avancement x .
 - c. Exprimer les pressions partielles de ces gaz en fonction de l'avancement x de la réaction et de la pression totale P_T .
 - d. En déduire l'expression de K en fonction de l'avancement x et de la pression totale P_T . Montrer que
$$K = \frac{4x^2}{1-x^2} P_T$$
 - e. Calculer la valeur de l'avancement x , sachant qu'à la température de 1 000 K et pour la pression $P_T = 1,0$ bar, la constante d'équilibre vaut $K = 1,9$.
4. Sachant que la réaction de formation du monoxyde de carbone CO est endothermique, indiquer dans quel sens il faut faire varier la température T pour augmenter la quantité de monoxyde de carbone CO, nécessaire à la réduction des oxydes de fer.

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 : $c = 4\,180$ J.kg⁻¹.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 $L_v = 1\,800$ 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.

CAE3CI

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

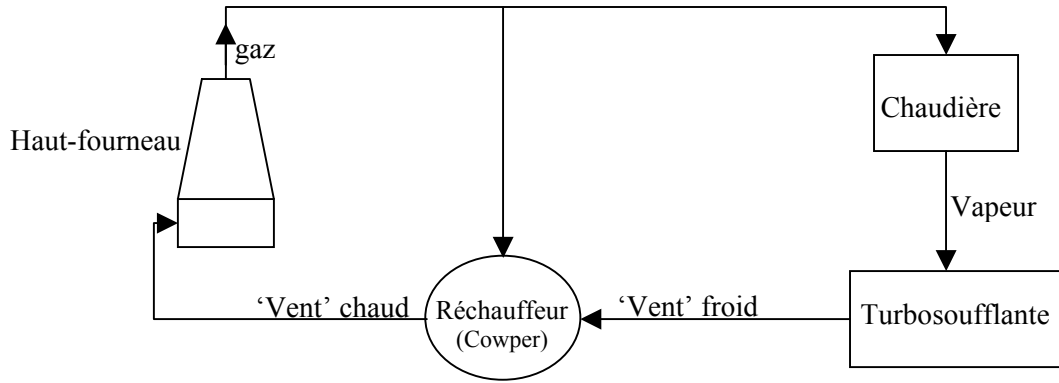


Figure n° 1

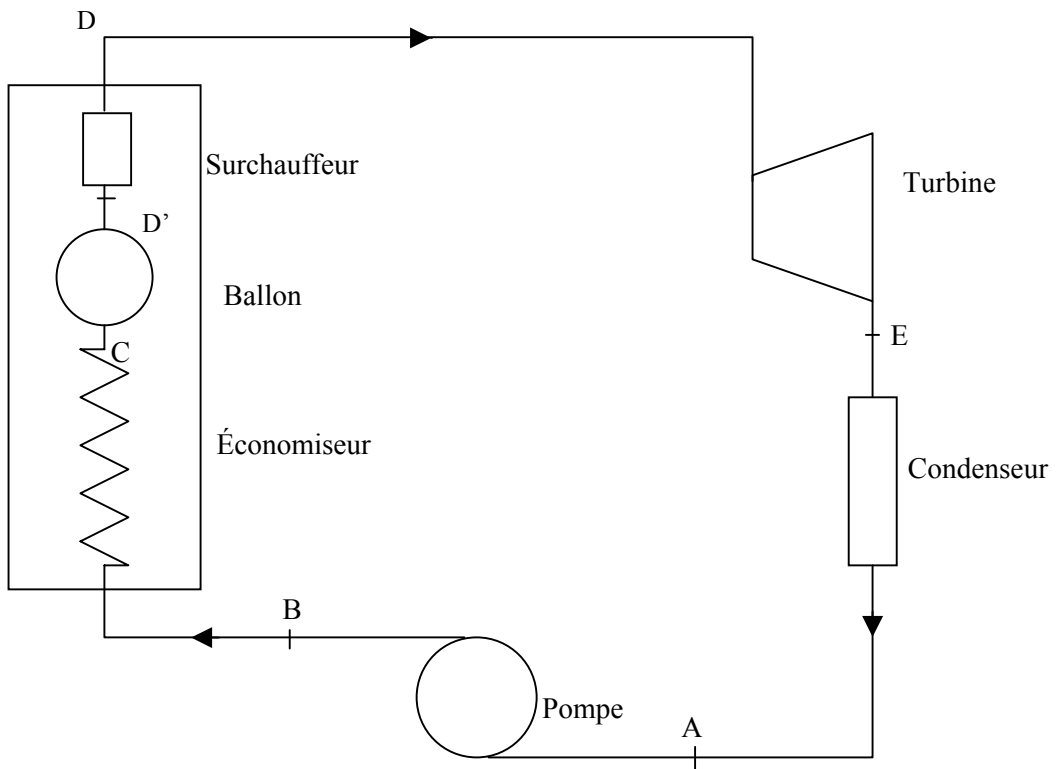
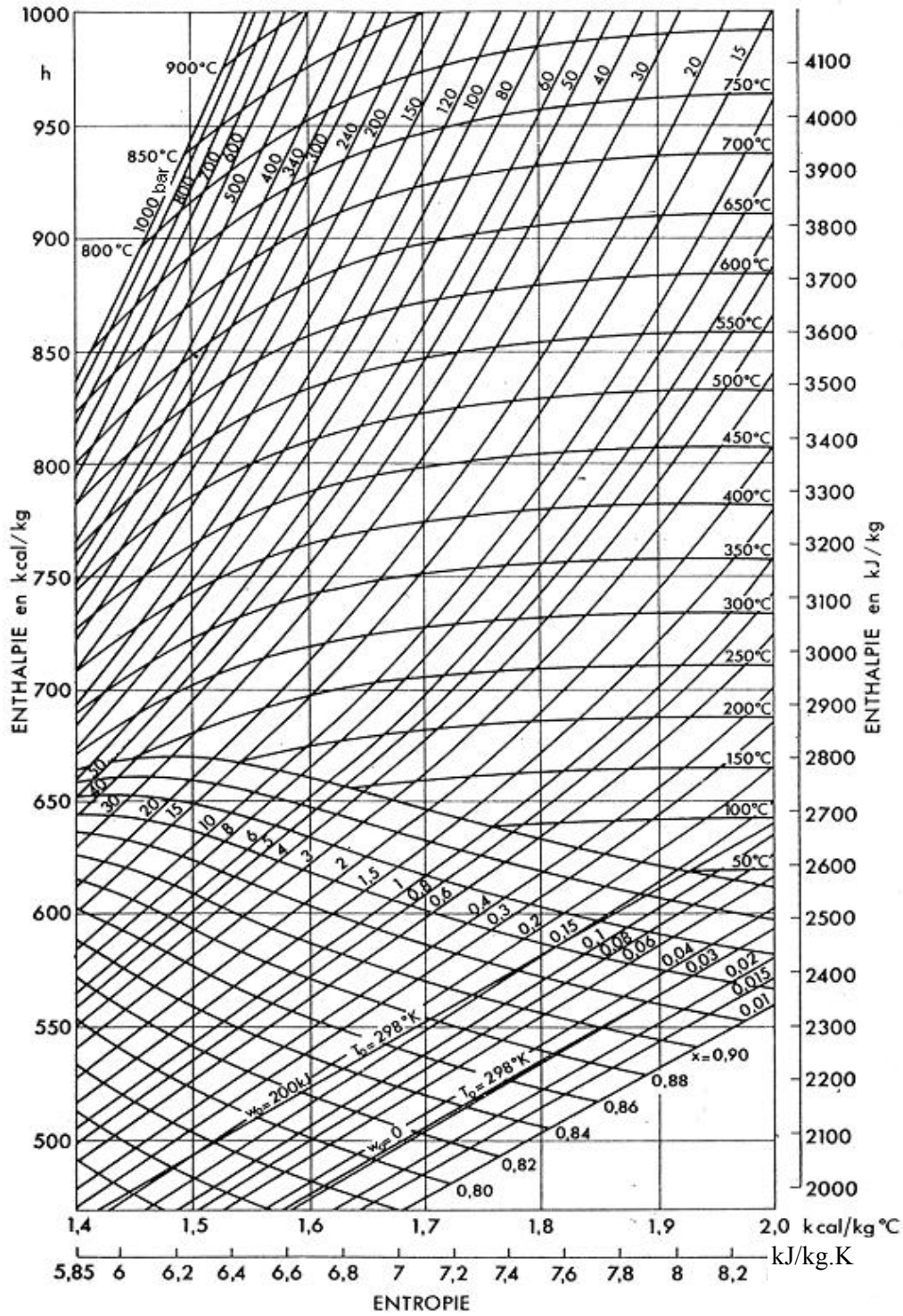


Figure n° 2

ANNEXE 2

Diagramme de Mollier de la vapeur d'eau



ANNEXE 2

Diagramme de Mollier de la vapeur d'eau

