

EMD1 Master II, Echangeur de chaleur, option Energétique

**Question de cours : (04 points)**

Expliquer la désignation des termes suivants : compacité, fluide encrassant, pas triangulaire, écoulement radial.

**Exercice N° 1 : (06 points)**

Soit un échangeur de chaleur co-axial d'une surface d'échange égale à 50 m<sup>2</sup> est soumis aux conditions de fonctionnement suivantes :

	Fluide chaud	Fluide froid
Produit m.Cp	4000	2500
Température d'entrée	70	25
Température de sortie	?	54

- 1- Déduire le mode d'écoulement de l'échangeur.
- 2- Calculer l'efficacité de l'échangeur.

**Exercice N° 2 : (10 points)**

Un échangeur de chaleur à contre courant dont le coefficient correctif  $F = 0,94$ , est utilisé pour chauffer de l'eau de 25 °C jusqu'à 77 °C, avec un débit massique de 8,5 Kg/s. Comme fluide chaud on utilise l'eau chaude entrant à une température de 165 °C avec un débit de 6,5 kg/s.

Sachant qu'il s'agit d'un échangeur à calandre et à faisceau tubulaire rectiligne, le fluide chaud circule à l'intérieur des tubes en une seule passe de diamètre  $D_{int}/D_{ext} = 18/24$  mm, dont l'épaisseur de la paroi de séparation est de 3 mm. Le faisceau tubulaire est constitué de 160 tubes en acier doux de conductivité thermique  $\lambda_{tube} = 50$  W/m.°K. Le diamètre de la calandre est  $D_{cal} = 380$  mm.

Sont données les propriétés thermophysiques :

$$\begin{aligned} \rho_{eau} &= 935 \text{ Kg/m}^3 \text{ à } 165 \text{ °C} & \rho_{eau} &= 972 \text{ Kg/m}^3 \text{ à } 77 \text{ °C.} \\ C_{p \text{ eau}} &= 4184 \text{ J/Kg.°K} & \mu_{eau} &= 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s} \\ \lambda_{eau} &= 0,607 \text{ W/m.°K} & & \end{aligned}$$

Déterminer :

1. la surface d'échange totale.
2. la longueur des tubes.

On admet que l'échange dans le faisceau tubulaire obéit à la corrélation de Nusselt  $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,33}$ , par contre du côté calandre (à l'extérieur des tubes) les échanges convectifs sont décrits par la relation  $Nu = 0,33 Re^{0,6} Pr^{0,33}$

**Bon courage**

## Réponse question de cours : (04 points)

### Réponse 02 :

- **Compacité** : la compacité d'un échangeur est un indicateur de classement des échangeurs de chaleur exprimé par le rapport de la surface d'échange au volume de l'échangeur. Un échangeur de chaleur est dit compact si sa compacité est supérieure à  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . (01 pt)
- **Fluide encrassant** : c'est un fluide qui durant son écoulement se manifeste par des dépôts de substances solides sur les parois d'échange, comme la rouille de corrosion et l'entartrage, qui dépend des conditions de fonctionnement : température, temps de séjours, vitesse, état de surface des parois. (01 pt)
- **Pas triangulaire** : une disposition des tubes constituant le faisceau tubulaire en forme d'un triangle rectangle qui permis d'améliorer la surface d'échange mise en jeu entre deux fluides caloporteurs (01 pt)
- **Écoulement radiale** : un écoulement dans le sens transversale perpendiculaire par rapport à une section de passage diamétrale, cas d'un écoulement dans un échangeur à tubes et calandre à l'extérieur des tubes délimité par deux chicanes (01 pt)

### Solution de l'exercice N° 01 : (06 pts)

- 1- **Mode d'écoulement de l'échangeur** : pour connaître le mode d'écoulement, calculons la température de sortie du fluide chaud : compte tenu le principe de la conservation d'énergie :

$$\left. \begin{aligned} \phi_{ch} &= \dot{m}_c C_{pc} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) \\ \phi_{fr} &= \dot{m}_f C_{pf} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \end{aligned} \right\} \text{ Avec } \phi_{ch} = \phi_{fr}$$

Par conséquent on aura l'expression :

$$T_{sc} = T_{ec} - \frac{\dot{m}_f C_{pf}}{\dot{m}_c C_{pc}} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = 70 - \frac{2500}{4000} (54 - 25) = 51,75 \text{ }^\circ\text{C} \quad (01 \text{ pt})$$

La comparaison entre les températures de sorties des deux fluides chaud et froid, montre que  $T_{sc}$  est inférieure à celle du fluide froid  $T_{sf}$ , **le mode d'écoulement est contre courant ( $T_{sc} < T_{sf}$ )** (02 pt)

- 2- **Efficacité de l'échangeur** : à savoir que c'est le fluide froid qui à le débit de capacité minimale (01 pt) (voir conditions de fonctionnement), par conséquent l'efficacité aurait pour expression :

$$\varepsilon = \frac{(T_{sf} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})} = \frac{(54 - 25)}{(70 - 25)} = 0,64 \quad (02 \text{ pt})$$

### Solution de l'exercice N° 02 : (10 pts)

- 1.1. Calculons la vitesse d'écoulement du fluide chaud à l'intérieur des tubes : sachant qu'il s'agit de 160 tubes de diamètre interne  $D_i = 18 \text{ mm}$ .

$$V_1 = \frac{m_1}{\rho \cdot N_t \cdot S_t} = \frac{m_1}{\rho \cdot N_t \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2} = \frac{6,5}{935 \cdot 160 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{18}{2}\right)^2 \cdot 10^{-6}} = 0,171 \text{ [m/s]} \quad (01 \text{ pt})$$

- 1.2. Calcul du nombre de Reynolds pour le fluide chaud :

$$Re_1 = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} = \frac{935 \cdot 0,171 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{8,9 \cdot 10^{-4}} = 3233,62 \quad (0,5 \text{ pt})$$

Il s'agit donc d'un écoulement turbulent, le nombre de Nusselt est exprimé par la corrélation suivante

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$$

Pour le fluide chaud (l'eau) le nombre de Prandtl est :  $Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda_{eau}} = \frac{8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 4184}{0,607} = 6,13$

Pae conséquent l'expression de Nusselt est :

$$Nu = 0,023(3233,62)^{0,8} (6,13)^{0,33} = 26,87 \quad (0,5 \text{ pt})$$

1.3. Calcul du coefficient d'échange par convection du côté du fluide chaud :

$$h_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_{eau}}{d_{int}} = \frac{26,87 \cdot 0,607}{18 \cdot 10^{-3}} = 906,12 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (0,5 \text{ pt})$$

2.1. Calcul de la vitesse du fluide froid circulant dans la calandre à l'extérieur du faisceau tubulaire, sachant qu'il s'agit d'un écoulement axial en une seule passe.

$$V_2 = \frac{m_2}{\rho_2 \cdot S_{passage}} = \frac{m_2}{\rho_2 \cdot \frac{\pi}{4} (D_c^2 - N_t \cdot d_{ext}^2)} = \frac{8,5}{972 \cdot \frac{3,14}{4} (0,38^2 - 160 \cdot (24 \cdot 10^{-3})^2)} = 0,213 \quad [m/s] \quad (01 \text{ pt})$$

2.2. Calcul du diamètre hydraulique équivalent de la section de passage du fluide froid circulant entre la calandre et le faisceau de 160 tubes .

$$D_h = \frac{4 \cdot S_{passage}}{P_{mouillé}} = \frac{4 \cdot \frac{\pi}{4} (D_c^2 - N_t d_{ext}^2)}{\pi (D_c + N_t d_{ext})} = \frac{(D_c^2 - N_t d_{ext}^2)}{D_c + N_t d_{ext}} = \frac{0,38^2 - 160 \cdot (24 \cdot 10^{-3})^2}{0,38 + 160 \cdot (24 \cdot 10^{-3})} = 0,012 \quad [m] \quad (01 \text{ pt})$$

2.3. Calcul du nombre de Reynolds pour le fluide froid :

$$Re_2 = \frac{\rho_2 \cdot V_2 \cdot D_h}{\mu_{eau}} = \frac{972 \cdot 0,213 \cdot 0,012}{8,9 \cdot 10^{-4}} = 2791,5 \quad (0,5 \text{ pt})$$

2.4. Calcul du nombre de Nusselt pour le fluide froid :

$$Nu = 0,33 Re^{0,6} Pr^{0,33} = 0,33(2791,5)^{0,6} (6,13)^{0,33} = 70,13 \quad (0,5 \text{ pt})$$

2.5. Calcul du coefficient de transfert par convection du côté du fluide froid

$$h_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_{eau}}{d_{ext}} = \frac{70,13 \cdot 0,607}{24 \cdot 10^{-3}} = 1773,7 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (0,5 \text{ pt})$$

2.6. Calcul du coefficient global d'échange :

$$K = R^{-1} = \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{906,12} + \frac{1}{1773,7} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{50} \right]^{-1} = 578,9 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (01 \text{ pt})$$

3.1. Calcul de la température de sortie du fluide chaud :

$$T_{cs} = T_{ce} - \frac{\dot{m}_f C_{pf}}{\dot{m}_c C_{pc}} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = 165 - \frac{8,5 \cdot 4184}{6,5 \cdot 4180} (77 - 25) = 97 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (0,5 \text{ pt})$$

3.2. Calcul de différence de température de mélange logarithmique :

$$\Delta T_{ML} = \frac{(165 - 77) - (97 - 25)}{\ln \frac{(165 - 77)}{(97 - 25)}} = 79,73^\circ C \quad (0,5 \text{ pt})$$

4.1 Calcul de la surface d'échange totale :

$$S_t = \frac{\phi}{F \cdot K \cdot \Delta T_{ML}} = \frac{8,5 \cdot 4184 \cdot (77 - 25)}{0,94 \cdot 578,9 \cdot 79,73} = 42,62 \text{ m}^2 \quad (01 \text{ pt})$$

4.2 La longueur des tubes constituant le faisceau tubulaire

$$L_{tube} = \frac{S_{totale}}{N_{tube} \cdot P_{thermique}} = \frac{S_t}{N_{tub} \cdot \pi \cdot d_{ext}} = \frac{42,62}{160 \cdot 3,14 \cdot 24 \cdot 10^{-3}} = 3,53 \text{ m.} \quad (01 \text{ pt})$$