Chapitre V. Calcul des échangeurs

V.1. Introduction

Rappelons que les échangeurs de chaleur sont des appareils où le transfert de chaleur à **basses et moyennes températures** se fait **sans changement de phase**. Des méthodes de calcul plus ou moins élaborées existent pour les échangeurs à faisceau et calandre. Les calculs reposent en partie sur les calculs élémentaires que l'on peut effectuer sur les échangeurs double-tube. L'utilisation des échangeurs à plaques étant plus récente, il n'existe pas de normes précises. En outre, par suite de leur très grande variété, il est difficile de proposer des théories et des corrélations générales.

V.2. Etude du transfert de chaleur

Quelque soit le type d'échangeur, si on ne tient compte que des conditions d'entrée et de sortie des deux fluides, le débit de chaleur transféré du fluide 1 (fluide chaud) au fluide 2 (fluide froid : moins chaud), en régime stationnaire et en l'absence de source de chaleur interne, s'écrit :

$$Q = \dot{m}_1 \,.\, cp_1(T_{1E} - T_{1S}) = \dot{m}_2 \,.\, cp_2(T_{2S} - T_{2E})$$

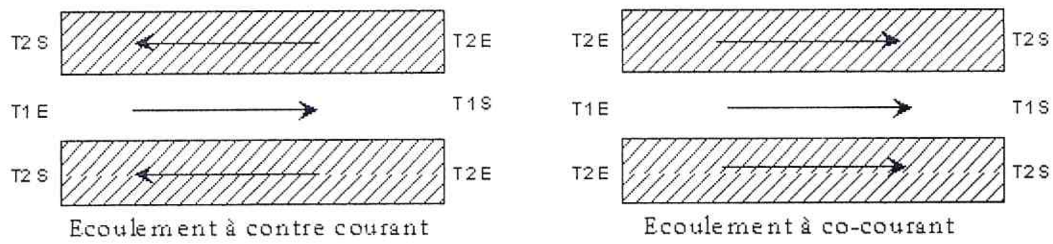
$\dot{m}$ et Cp représentent le débit massique et la capacité calorifique massique des fluides. Les indices E et S sont relatifs à l'entrée et à la sortie de chacun des fluides.
Exprimons le débit transféré en fonction d'une force motrice (différence de température ΔT_m= DTML : moyenne logarithmique des différences de température) :

$$Q = \mu .\Omega .\Delta TML$$

Ω est la surface d'échange de l'appareil et U la conductance globale de transfert. Pour un échangeur de géométrie donnée, Ω est connu, mais les valeurs de U et ΔT_m dépendent des caractéristiques de fonctionnement de l'appareil.

a. Différence de température moyenne ΔT_m

La différence de température moyenne dépend de la nature, du débit des deux fluides, mais également du sens d'écoulement des deux fluides (les écoulements des fluides peuvent être soit à cocourant, soit à contrecourant).



En supposant constant le coefficient de transfert global U entre les deux extrémités de l'échangeur, un bilan thermique dans l'échangeur permet de montrer que :

$$\Phi = U.\ \Omega.\ (\Delta TML)$$

$$\Delta TML = \frac{(\Delta T)_0 - (\Delta T)_L}{\ln \frac{(\Delta T)_0}{(\Delta T)_L}}$$

Echangeur à contre-courant

$(\Delta T)_0 = T_{1E} - T_{2S}$

$(\Delta T)_L = T_{1S} - T_{2E}$

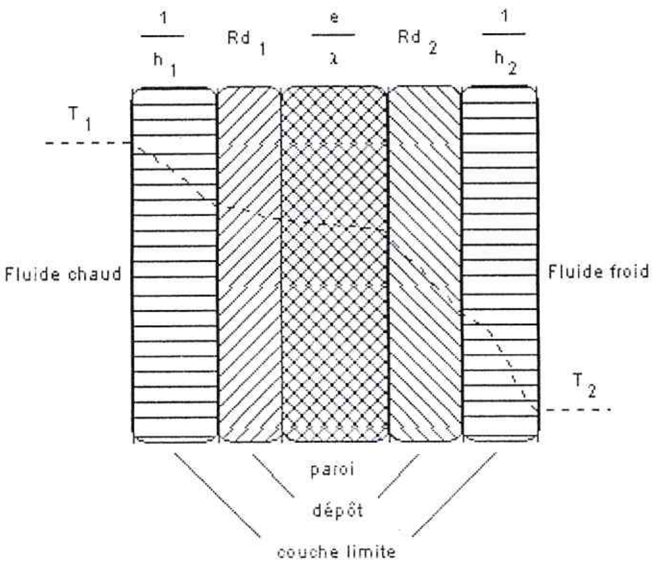
Echangeur à co-courant

$(\Delta T)_0 = T_{1E} - T_{2E}$

$(\Delta T)_L = T_{1S} - T_{2S}$

b. Coefficient de transfert global U

L'étude du transfert de chaleur entre le fluide chaud et le fluide froid (moins chaud) au travers de la paroi fait apparaître dans le cas le plus général les 05 résistances de transfert indiquées sur la figure.



$R_1 = 1/h_1$: est la résistance de transfert par convection côté fluide chaud.

Rd_1 : est la résistance de transfert par conduction dans le dépôt d'encrassement côté fluide chaud.

$Rp = e/\lambda$: est la résistance de transfert par conduction dans la paroi métallique.

Rd_2 : est la résistance de transfert par conduction dans le dépôt d'encrassement côté fluide froid (moins chaude).

$R_2 = 1/h_2$: est la résistance de transfert par convection côté fluide froid (moins chaud).

Dans les échangeurs, le fluide chaud circule à l'intérieur du tube et le fluide froid circule à l'extérieur.

La résistance globale est alors donnée par la relation :

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{R_1} + Rd_1 + \frac{e}{\lambda} + Rd_2 + \frac{1}{R_2}$$

$Rd_1, Rd_2, \frac{e}{\lambda}$ sont négligeables devant les autres donc :

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}$$

Connaissant h_1 et h_2, il est possible de trouver la valeur de coefficient de transfert globalμ.

V.3. perte de charge (notion générale)

Les pertes de charge ou bien les pertes d'énergie spécifique dépendent de la forme, des dimensions, de la rugosité de la conduite, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du fluide. L'expérience a montré que les pertes de charge sont
proportionnelle au carré de la vitesse et à la longueur de la conduite. En général il existe deux types de perte de charge :

- Perte de charge linéaire.
- Perte de charge singulière.

a. Pertes de charge linéaire (pertes de charge réparties)

La perte de charge linéaire est donnée par la formule empirique :

$$\Delta H_l = \frac{\lambda . L . V^2}{2 . d . g}$$ **Formule de Darcy**

Avec : λ coeficient de perte de charge linéaire, (coefficient de frottement dans la conduite).

L: longueur de la conduite (m).

d: diamètre de la conduite (m).

v: vitesse d'écoulement dans la conduite (m/*s*).

Détermination de la valeur de λ :

- Régime laminaire : $\lambda = \frac{64}{Re}$ pour $R_e < 2200$
- Régime turbulent : pour $R_e > 2200$ on a deux cas :

* $R_e < 10^5$, la conduite est dite lisse.

$$\lambda = \frac{0.316}{R_e^{0.25}}$$ **Formule de Blasius**

* $R_e > 10^5$, la conduite est dite conduite rugueuse.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \ In \ (R_e\sqrt{\lambda} - 0.8)$$ **Formule de Karman**

Remarque : Des abaques et des tableaux ont étaient élaborés afin de déterminer la valeur de λ. Généralement on utilise les tableaux ou abaques de **Colebrook** pour déterminer la valeur de λ

b/ Pertes de charges singulières (perte de charges locales).

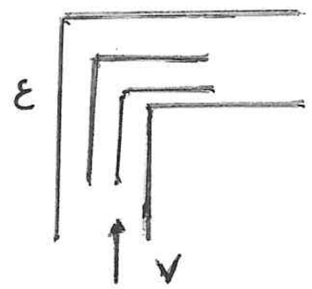
La perte de charge singulière est donnée par la formule empirique :

$$\Delta H_S = \varepsilon \frac{V^2}{2g} \qquad \textbf{Formule de Weisbach}$$

Les pertes de charges singulières sont dues à une modification du contour du courant de fluide. ε : est appelé coefficient de perte de charge singulière, c'est un coefficient sans dimension ne dépendant que de la forme de l'obstacle comme les coudes, l'élargissement brusque, le rétrécissement brusque, les vannes, etc. Les valeurs de ε pour les divers organes sont données par des formulaires et des catalogues de constructeurs, ces valeurs sont approximatives.

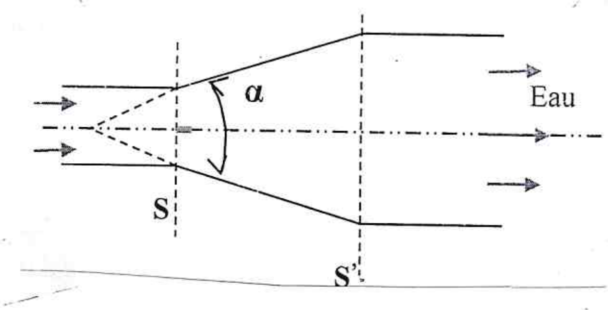
Quelques valeurs de ε

- Coude brusque à angle droit : $\varepsilon = 1$



- Elargissement progressive de la section

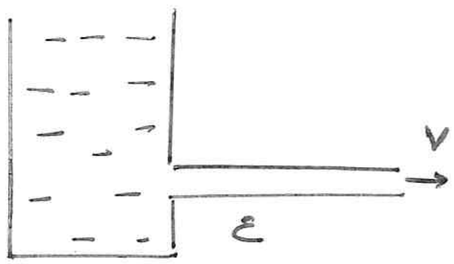
$$\epsilon = \left(1 - \frac{s}{s'}\right)^2 \sin\alpha$$



- Entrée des tuyauteries (rétrécissement brusque)

$\varepsilon = \frac{1}{2}$ (pour un simple orifice)

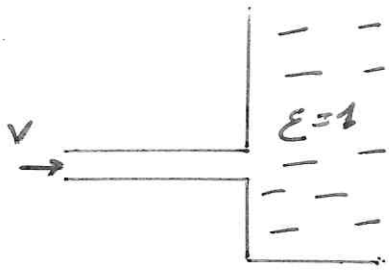
$\varepsilon = 0$ (pour orifice à bords arrondis et poli)



- sortie des tuyauteries (élargissement brusque)

$\varepsilon = 1$

(Pour une sortie brutale l'énergie cinétique est totalement perdu)



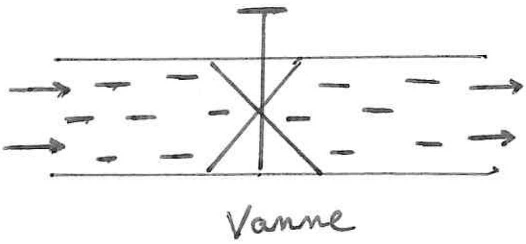
- Les vannes

Vanne ouverte : ε = 0.05 à 0.4 selon le type de vanne.

Quand on ferme la vanne progressivement ε varie

Progressivement de 0.4 à ∞.

Vanne fermé $\varepsilon = 0$



Exercice 1 : Du pétrole de viscosité μ = 0.11 Pa. ş et de densité 0.9 circule dans une conduite de longueur 1650 m et de diamètre 25 cm à un débit volumique 19.7 l/s.

- Déterminer la viscosité cinématique du pétrole
- Calculer la vitesse de l'écoulement et le débit massique
- Calculer le nombre de Reynolds et en déduire la nature de l'écoulement

- Déterminer le coefficient de perte de charge linéaire et calculer la perte de charge dans la conduite

Solution

- $V = \frac{\mu}{\rho}$ $\quad \mu = \frac{0.11}{900} = 1.22*10^{-4}\ m^2/s$

$$V = \frac{4*19.7*10^{-3}}{\pi(0.25)^2} = 0.40 \text{ m/s}$$

- $q_m = \rho * q_v = 0.9\ 10^3*19.7*10^{-3} = 17.73$ kg/s

- $R_e = \frac{V.D}{\mu} = \frac{0.4*0.25}{1.22*10^{-4}} = 820$

Puisque $R_e < R_{ec}$ (2200) donc le régime est laminaire et $\lambda = 64/R_e = 64/820 = 0.078$

- $\Delta H_l = \lambda \frac{LV^2}{2gd} = 0.078* \frac{1650*(0.40)^2}{2*9.81*0.25} = 4,2$ m

Exercice 2

Un jet d'eau est alimenté à parti d'un réservoir de grandes dimensions au moyen d'une pompe centrifuge de débit volumique de 2 litres par seconde, à travers une conduite de longueur 15 m et de diamètre intérieur de 3 cm. La conduite présente un coude de 90° ($\varepsilon = 0.3$), $\mu_{eau} = 10^{-3}$ Pa.s

- Calculer la vitesse de l'écoulement
- Calculer le nombre de Reynolds et préciser la nature de l'écoulement
- Calculer le coefficient de perte de charge
- Calculer la perte de charge totale dans le circuit

Solution

- Calcul de la vitesse (V)

$$V = \frac{4\ qv}{\pi.D^2} = \frac{4*2*10^{-3}}{\pi(0.03)^2} = 2.83\ m/s$$

- Calcul du nombre de Reynolds (R_e)

$$Re = \frac{V.D.\rho}{\mu} = \frac{2.83*0.03*10^3}{10^{-3}} = 84900$$

$2200 < Re < 10^5$: régime turbulent lisse.

- Coefficient de perte de charge : λ

Formule de Blasius : $\lambda = 0{,}316.\ (R_e)^{-1/4}$

$\lambda = 0{,}316.\ (84900)^{-1/4} = 0.018$

- Perte de charge

Perte de charge linéaire :

$$\Delta H_l = \lambda \frac{LV^2}{2Dg} = 0.018 \frac{15*(2.83)^2}{2*0.03*9.81} = 3{,}67 \text{ m}$$

Perte de charge singulière :

$$\Delta H_s = \varepsilon \frac{V^2}{2g} = 0.3 \frac{(2.83)^2}{2*9.81} = 0.12m$$

$$\Delta H_{total} = \Delta H_l + \Delta H_s$$

$$\Delta H_{total} = 3{,}67 + 0.12 = 3{,}78\ m$$