

## TD: convection lors de la condensation et l'ébullition

### **EXO-1 :** Casserole (ébullition nucléée)

Une casserole en cuivre, de 150 mm de diamètre, est utilisée pour faire bouillir de l'eau. Le fond de la casserole est maintenu à une température de  $T_w=115^\circ\text{C}$ .

- Déterminer la densité de flux à la paroi  
puissance disponible pour faire bouillir l'eau.
- Quelle est la quantité d'eau évaporée chaque minute ?
- Quelle est la valeur du rapport du flux réel au flux critique?

Données:  $\rho_L=957.9\text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_V=0.5955\text{ kg/m}^3$ ;  $\mu_L=2.79\cdot 10^{-4}\text{ Pa.s}$ ,  $g=9.81\text{ m/s}^2$   
 $\Delta h_{LV}=2.257\cdot 10^6\text{ J/kg}$ = chaleur latente de vaporisation.  
 $\sigma=58.9\cdot 10^{-3}\text{ N/m}$ ;  $Pr_L=1.76$ ;  $C_{PL}=4217\text{ J/kg}$   
 $C_{SF}=0.013$  et  $n=1$

### **EXO-2 :** Tubes

Des tubes de cuivre de 25 mm de diamètre et de 0.75 m de longueur sont utilisés pour l'ébullition en piscine sous 1 atm. Sachant que les tubes opèrent à 75% du flux critique (utilisée la valeur de  $1.26\text{ MW/m}^2$  trouvée à l'exercice 1), combien de tubes sont nécessaires pour permettre une vitesse d'évaporation de  $750\text{ kg/h}$  ? Quelle est la température à la surface des tubes ?

Données:  $\rho_L=957.9\text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_V=0.5955\text{ kg/m}^3$ ;  $\mu_L=2.79\cdot 10^{-4}\text{ Pa.s}$ ,  $g=9.81\text{ m/s}^2$   
 $\Delta h_{LV}=2.257\cdot 10^6\text{ J/kg}$ = chaleur latente de vaporisation.  
 $\sigma=58.9\cdot 10^{-3}\text{ N/m}$ ;  $Pr_L=1.76$ ;  $C_{PL}=4217\text{ J/kg}$   
 $C_{SF}=0.013$  et  $n=1$

### **EXO-3 :** Condensation en film laminaire sur un cylindre vertical

La paroi extérieure d'un cylindre vertical de 80 mm de diamètre et de 1 m de longueur est maintenue à  $50^\circ\text{C}$  grâce un fluide circulant à l'intérieur du cylindre. Ce cylindre est environné d'une vapeur d'eau saturée sous une pression de 1 atm. Déterminer le coefficient moyen de transfert de chaleur sur la surface, la quantité totale de chaleur transférée ainsi que la masse de vapeur se condensant sur le cylindre.

Données:  $\rho_V=0.596\text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_L=975\text{ kg/m}^3$ ;  $\mu_L=375\cdot 10^{-6}\text{ Pa.s}$ ,  $g=9.81\text{ m/s}^2$   
 $k_L=0.668\text{ w/m}$ ;  $T_{SAT}=100^\circ\text{C}$ ;  $\Delta h_{LV}=2.257\cdot 10^6\text{ J/kg}$ = chaleur latente  
 $C_{PL}=4193\text{ J/kg}$

### **EXO-4 :** Condensation en film laminaire sur un cylindre horizontal

Un cylindre horizontal de 50 mm de diamètre dont la température de la surface est de  $34^\circ\text{C}$ , est exposé à une vapeur sous 0.2 bar. Calculer la masse de vapeur,  $M_V$ , qui se condense sur le tube et la chaleur échangée,  $Q$ , par m de longueur de tube.

Données:  $\rho_V=0.129\text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_L=989\text{ kg/m}^3$ ;  $\mu_L=577\cdot 10^{-6}\text{ Pa.s}$ ,  $g=9.81\text{ m/s}^2$   
 $k_L=0.640\text{ w/m}$ ;  $T_{SAT}=333\text{K}$ ,  $\Delta h_{LV}=2358\text{ KJ/kg}$ = chaleur latente  
 $C_{PL}=4180\text{ J/kg}$

### Solution de l'EXO-1:

a) La corrélation de Rohsenow donne la valeur du flux transféré :

$$q_s'' = \mu_L \Delta h_{LV} \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_V)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[ \frac{C_{P,L}(T_S - T_{SAT})}{C_{sf} \Delta h_{LV} Pr_L^n} \right]^3$$

$$q_s'' = 2.79 \cdot 10^{-4} \cdot 2.257 \cdot 10^6 \left[ \frac{9.81(957.9 - 0.5955)}{0.0589} \right]^{1/2} \left[ \frac{4217(115 - 100)}{0.013 \cdot 2.257 \cdot 10^6 \cdot 1.76^1} \right]^3$$

$$q_s'' = 462254 \text{ W/m}^2 \approx 4.622 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$$

La puissance disponible est donc  $q = q_s'' A_s = 4.622 \cdot 10^5 \left( \pi \frac{0.15^2}{4} \right) = 8168.7 \text{ W} = 8.169 \text{ kW}$

b) à chaque minute, l'énergie fournie permet l'évaporation d'une masse d'eau m telle que :

$$q \Delta t = m \Delta h_{LV} \Rightarrow m = \frac{q \Delta t}{\Delta h_{LV}}$$

$$m = \frac{8.169 \cdot 60}{2.257 \cdot 10^6} = 0.217 \text{ kg/min}$$

c) Le flux critique est donné par :

$$q_C'' = 0.149 \Delta h_{LV} \rho_V \left[ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_V)}{\rho_V^2} \right]^{1/4}$$

$$q_C'' = 0.149 \cdot 2.257 \cdot 10^6 \cdot 0.5955 \left[ \frac{0.0589 \cdot 9.81 \cdot (957.9 - 0.5955)}{0.5955^2} \right]^{1/4}$$

$$q_C'' = 1258540.8$$

$$\frac{q_s''}{q_C''} = \frac{462254}{1258540} = 0.3673$$

### Solution de l'EXO-2:

a)

$$q_s'' = 0.75 \times q_C'' = 0.75 \times 1.26 \times 10^6 = 9.45 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

$$q_{totale} = n_t \times \pi DL \times q_s'' = m_{\text{évaporée}} \times \Delta h_{LV} \Rightarrow n_t = \frac{m_{\text{évaporée}} \times \Delta h_{LV}}{\pi DL \times q_s''}$$

$$n_t = \frac{\frac{750}{3600} \times 2.257 \times 10^6}{\pi \times 0.025 \times 0.75 \times 9.45 \times 10^5} = 8.45$$

b)

$$q_s'' = \mu_L \Delta h_{LV} \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_V)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[ \frac{C_{P,L}(T_S - T_{SAT})}{C_{sf} \Delta h_{LV} Pr_L^n} \right]^3$$

$$\Rightarrow T_s = T_{SAT} + \frac{C_{sf} \Delta h_{LV} Pr_L^n}{C_{p,L}} \left[ \frac{q_s''}{\mu_L \Delta h_{LV} \left[ \frac{g (\rho_L - \rho_V)}{\sigma} \right]^{1/2}} \right]^{1/3}$$

$$T_s = 100 + \frac{0.013 \times 2.257 \times 10^6 \times 1.76^1}{4217} \times \left[ \frac{9.45 \times 10^5}{2.79 \times 10^{-4} \times 2.257 \times 10^6 \left[ \frac{9.81 \times (957.9 - 0.5955)}{58.9 \times 10^{-3}} \right]^{1/2}} \right]^{1/3}$$

$$T_s = 100 + 11.304 \times \left[ \frac{9.45 \times 10^5}{251442} \right]^{1/3} = 117.57^\circ C$$

### Solution de l'EXO-3:

a) Le cylindre étant vertical, on néglige la courbure et on utilise la corrélation pour un plan vertical :

$$Nu = \frac{\overline{h_L} L}{k_L} = 0.943 \left[ \frac{\rho_L g (\rho_L - \rho_V) \Delta h'_{LV} L^3}{\mu_L k_L (T_{SAT} - T_s)} \right]^{1/4}$$

$$\Delta h'_{LV} = \Delta h_{LV} + 0.68 C_p (T_{SAT} - T_s) = 2.257 \cdot 10^6 + 0.68 \cdot 4193 (100 - 50) = 2399562$$

$$\Delta h'_{LV} = 2399562 = 2.399 \cdot 10^6$$

$$Nu = 0.943 \left[ \frac{975 \cdot 9.81 \cdot (975 - 0.596) \cdot 2.399 \cdot 10^6 \cdot 1^3}{375 \cdot 10^{-6} \cdot 0.668 \cdot (100 - 50)} \right]^{1/4} = 6128$$

$$\overline{h_L} = \frac{Nu k_L}{L} = \frac{6128 \cdot 0.668}{1} = 4094 \text{ W/m}^2\text{C}$$

b) la quantité totale de chaleur échangée s'exprime par :

$$q = \overline{h_L} A (T_{SAT} - T_s) = 4094 (\pi \cdot 0.080 \cdot 1) (100 - 50) = 51446 \text{ W}$$

c)

$$q = m \Delta h'_{LV}$$

$$m = \frac{q}{\Delta h'_{LV}} = \frac{51446}{2.399 \cdot 10^6} = 0.0214 \text{ kg/s} = 21.4 \text{ g/s}$$

**Solution de l'EXO-4:**

$$\overline{h_D} = 0.729 \left[ \frac{\rho_L g (\rho_L - \rho_V) \Delta h'_{LV} k_L^3}{\mu_L D (T_{SAT} - T_S)} \right]^{1/4}$$

$$\Delta h'_{LV} = \Delta h_{LV} + 0.68 C_{PL} (T_{SAT} - T_S) = 2358 \times 10^3 + 0.68 \times 4180 \times [333 - (273 + 34)] = 2.4319 \times 10^6$$

$$\overline{h_D} = 0.729 \left[ \frac{989 \times 9.81 \times (989 - 0.129) \times 2.4319 \times 10^3 \times 0.64^3}{577 \times 10^{-6} \times 0.05 \times [333 - (273 + 34)]} \right]^{1/4} = 6927.4 \text{ W / m}^2 \text{ C}$$

$$M_V = \frac{q}{\Delta h'_{LV}} = \frac{\pi D L \overline{h_D} (T_{SAT} - T_S)}{\Delta h'_{LV}} = \frac{\pi \times 0.05 \times 1 \times 6927.4 \times [333 - (273 + 34)]}{2.4319 \times 10^3}$$

$$M_V = 0.0116 \text{ kg / s.m} = 11.6 \text{ g / s.m}$$

$$q = \pi D L \overline{h_D} (T_{SAT} - T_S) = M_V \times \Delta h'_{LV} = 0.0116 \times 2.4319 \times 10^3 = 28291 \approx 28.3 \text{ kW / m de tube}$$