

## **Transfert de chaleur : convection**

### **EXAMEN Durée 2h**

*Les exercices sont indépendant peuvent être traités dans l'ordre que vous souhaitez. Les 2 parties de l'exercice 2 peuvent être traités indépendamment.*

#### **Questions de cours :**

- 1) On examine les couches limites dynamique et thermique pour un écoulement d'eau en convection forcée le long d'une plaque plane. Quelle sera la couche limite la plus épaisse : dynamique ou thermique ? Justifier votre réponse.
- 2) Quel le principe physique de la convection naturelle ? Comment s'établi l'écoulement ?
- 3) Quel est l'ordre de grandeur d'un coefficient d'échange de chaleur lors d'un échange par ébullition dans de l'eau ?

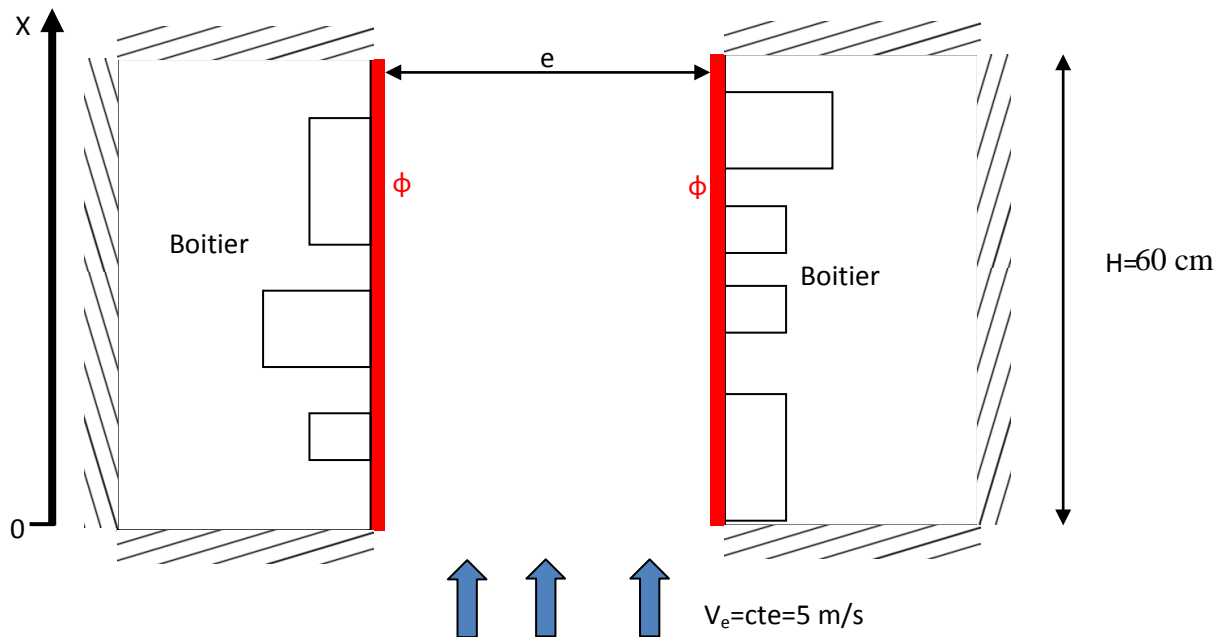
#### **Exercice 1**

Un radiateur peut être assimilé à une plaque verticale de 50 cm de hauteur et de 1 m de largeur. Quelle doit être sa température pour dissiper 200 W avec une ambiance à 20°C par convection naturelle dans l'air ?

#### **Exercice 2 : Refroidissement de l'électronique**

On cherche à refroidir 2 ensembles électroniques (cf. schéma ci-dessus). Chacun de ces 2 ensembles est enfermé dans un boîtier. Pour chacun des 2 boîtiers, les parois peuvent être considérées comme adiabatiques sauf l'une d'entre elles. Par celle-ci passe tout le flux de chaleur. On peut considérer la densité de ce flux uniforme et valant  $\Phi=400 \text{ W/m}^2$ . La hauteur des boîtiers est de  $H=60 \text{ cm}$ . La profondeur  $P=20 \text{ cm}$ .

Pour les refroidir, on crée un écoulement d'air entre les 2 boîtiers (plus précisément entre leurs parois à densité de flux constante). La vitesse de l'air est considérée en entrée égale à  $V_e=5 \text{ m/s}$ . Sa température est uniforme et égale à  $T_e=80 \text{ °C}$ . On supposera que les propriétés de l'air sont uniformes et seront prises à la température d'entrée de l'air  $T_e$ . On suppose que l'on se trouve dans une configuration de convection forcée (effet de la convection naturelle négligeable).



### **Partie 1**

La distance séparant les boitiers est de  $e = 2.5 \text{ cm}$ .

- 1) En comparant les épaisseurs de couches limites à la distance séparant les boitiers, montrer que l'on est en situation de conduite et non de plaque plane.
- 2) A l'aide d'un bilan de flux local sur le fluide, déterminer la température de mélange de l'air entre les 2 boitiers en fonction de l'abscisse  $X$ .
- 3) En supposant le régime établi, déterminer la température de la paroi des boitiers en fonction de l'abscisse  $x$  :  $T_p(x)$ .

### **Partie 2**

On éloigne les 2 plaques :  $e = 20 \text{ cm}$ . Les autres données restent inchangées.

- 4) En comparant les épaisseurs de couche limite à la distance séparant les boitiers, peut-on considérer que l'on est en situation de plaque plane ?
- 5) Déterminer la température de la paroi à flux imposé d'un boitier :  $T_p(x)$ .

## Propriétés des fluides et corrélations :

Properties of saturated water

Temperature, $T^{\circ}\text{C}$	Saturation pressure, $P\text{ kPa}$	Density, $\rho\text{ kg/m}^3$		Enthalpy of vaporization, $h_{fg}\text{ kJ/kg}$	Specific heat, $C_p\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$		Thermal conductivity, $k\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$		Dynamic viscosity, $\mu\text{ kg/m}\cdot\text{s}$		Prandtl number, $Pr$	
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	$1.792 \times 10^{-3}$	$0.922 \times 10^{-5}$	13.5	1.00
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	$1.519 \times 10^{-3}$	$0.934 \times 10^{-5}$	11.2	1.00
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	$1.307 \times 10^{-3}$	$0.946 \times 10^{-5}$	9.45	1.00
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	$1.138 \times 10^{-3}$	$0.959 \times 10^{-5}$	8.09	1.00
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	$1.002 \times 10^{-3}$	$0.973 \times 10^{-5}$	7.01	1.00
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	$0.891 \times 10^{-3}$	$0.987 \times 10^{-5}$	6.14	1.00
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	$0.798 \times 10^{-3}$	$1.001 \times 10^{-5}$	5.42	1.00
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	$0.720 \times 10^{-3}$	$1.016 \times 10^{-5}$	4.83	1.00
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	$0.653 \times 10^{-3}$	$1.031 \times 10^{-5}$	4.32	1.00
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	$0.596 \times 10^{-3}$	$1.046 \times 10^{-5}$	3.91	1.00
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	$0.547 \times 10^{-3}$	$1.062 \times 10^{-5}$	3.55	1.00
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	$0.504 \times 10^{-3}$	$1.077 \times 10^{-5}$	3.25	1.00
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	$0.467 \times 10^{-3}$	$1.093 \times 10^{-5}$	2.99	1.00
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	$0.433 \times 10^{-3}$	$1.110 \times 10^{-5}$	2.75	1.00
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	$0.404 \times 10^{-3}$	$1.126 \times 10^{-5}$	2.55	1.00
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	$0.378 \times 10^{-3}$	$1.142 \times 10^{-5}$	2.38	1.00
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	$0.355 \times 10^{-3}$	$1.159 \times 10^{-5}$	2.22	1.00
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	$0.333 \times 10^{-3}$	$1.176 \times 10^{-5}$	2.08	1.00
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	$0.315 \times 10^{-3}$	$1.193 \times 10^{-5}$	1.96	1.00
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	$0.297 \times 10^{-3}$	$1.210 \times 10^{-5}$	1.85	1.00
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	$0.282 \times 10^{-3}$	$1.227 \times 10^{-5}$	1.75	1.00

Properties of gases at 1 atm pressure

Temperature, $T\text{ K}$	Density, $\rho\text{ kg/m}^3$	Specific heat, $C_p\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$	Thermal conductivity, $k\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$	Thermal diffusivity, $\alpha\text{ m}^2/\text{s}$	Dynamic viscosity, $\mu\text{ kg/m}\cdot\text{s}$	Kinematic viscosity, $\nu\text{ m}^2/\text{s}$	Prandtl number, $Pr$
Air							
200	1.766	1003	0.0181	$1.02 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-5}$	$0.76 \times 10^{-5}$	0.740
250	1.413	1003	0.0223	$1.57 \times 10^{-5}$	$1.61 \times 10^{-5}$	$1.14 \times 10^{-5}$	0.724
280	1.271	1004	0.0246	$1.95 \times 10^{-5}$	$1.75 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^{-5}$	0.717
290	1.224	1005	0.0253	$2.08 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^{-5}$	$1.48 \times 10^{-5}$	0.714
298	1.186	1005	0.0259	$2.18 \times 10^{-5}$	$1.84 \times 10^{-5}$	$1.55 \times 10^{-5}$	0.712
300	1.177	1005	0.0261	$2.21 \times 10^{-5}$	$1.85 \times 10^{-5}$	$1.57 \times 10^{-5}$	0.712
310	1.143	1006	0.0268	$2.35 \times 10^{-5}$	$1.90 \times 10^{-5}$	$1.67 \times 10^{-5}$	0.711
320	1.110	1006	0.0275	$2.49 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-5}$	$1.77 \times 10^{-5}$	0.710
330	1.076	1007	0.0283	$2.64 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-5}$	$1.86 \times 10^{-5}$	0.708
340	1.043	1007	0.0290	$2.78 \times 10^{-5}$	$2.03 \times 10^{-5}$	$1.96 \times 10^{-5}$	0.707
350	1.009	1008	0.0297	$2.92 \times 10^{-5}$	$2.08 \times 10^{-5}$	$2.06 \times 10^{-5}$	0.706
400	0.883	1013	0.0331	$3.70 \times 10^{-5}$	$2.29 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-5}$	0.703
450	0.785	1020	0.0363	$4.54 \times 10^{-5}$	$2.49 \times 10^{-5}$	$3.18 \times 10^{-5}$	0.700
500	0.706	1029	0.0395	$5.44 \times 10^{-5}$	$2.68 \times 10^{-5}$	$3.80 \times 10^{-5}$	0.699
550	0.642	1039	0.0426	$6.39 \times 10^{-5}$	$2.86 \times 10^{-5}$	$4.45 \times 10^{-5}$	0.698
600	0.589	1051	0.0456	$7.37 \times 10^{-5}$	$3.03 \times 10^{-5}$	$5.15 \times 10^{-5}$	0.698
700	0.504	1075	0.0513	$9.46 \times 10^{-5}$	$3.35 \times 10^{-5}$	$6.64 \times 10^{-5}$	0.702
800	0.441	1099	0.0569	$11.7 \times 10^{-5}$	$3.64 \times 10^{-5}$	$8.25 \times 10^{-5}$	0.704
900	0.392	1120	0.0625	$14.2 \times 10^{-5}$	$3.92 \times 10^{-5}$	$9.99 \times 10^{-5}$	0.705
1000	0.353	1141	0.0672	$16.7 \times 10^{-5}$	$4.18 \times 10^{-5}$	$11.8 \times 10^{-5}$	0.709
1200	0.294	1175	0.0759	$22.2 \times 10^{-5}$	$4.65 \times 10^{-5}$	$15.8 \times 10^{-5}$	0.720
1400	0.252	1201	0.0835	$27.6 \times 10^{-5}$	$5.09 \times 10^{-5}$	$20.2 \times 10^{-5}$	0.732
1600	0.221	1240	0.0904	$33.0 \times 10^{-5}$	$5.49 \times 10^{-5}$	$24.9 \times 10^{-5}$	0.753
1800	0.196	1276	0.0970	$38.3 \times 10^{-5}$	$5.87 \times 10^{-5}$	$29.9 \times 10^{-5}$	0.772
2000	0.177	1327	0.1032	$44.1 \times 10^{-5}$	$6.23 \times 10^{-5}$	$35.3 \times 10^{-5}$	0.801

Corrélations sur plaque plane à température uniforme:

- Régime laminaire ( $Re_x$  critique  $\cong 10^6$ ):  $Nu_x = 0,332 Re_x^{0.5} Pr^{1/3}$
- Régime turbulent :  $Nu_x = 0,029 Re_x^{0.8} Pr^{1/3}$

Corrélations sur plaque plane à flux uniforme:

- Régime laminaire ( $Re_x$  critique  $\cong 10^6$ ):  $Nu_x = 0,453 Re_x^{0.5} Pr^{1/3}$
- Régime turbulent :  $Nu_x = 0,0308 Re_x^{0.8} Pr^{1/3}$

Corrélations en conduite entre 2 plaques parallèles à température uniforme en régime établi:

- Régime laminaire ( $Re$  critique  $\cong 2000$ ) :  $Nu = 7.54$
- Régime turbulent :  $Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^n$   
 $n=0.4$  pour un chauffage du fluide  
 $n=0.3$  pour un refroidissement

Corrélations en conduite entre 2 plaques parallèles à flux uniforme en régime établi:

- Régime laminaire :  $Nu = 8.235$
- Régime turbulent :  $Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^n$   
 $n=0.4$  pour un chauffage du fluide  
 $n=0.3$  pour un refroidissement

Corrélations en convection naturelle sur une plaque plane verticale à température uniforme :

$$Nu_{moyen} = A Ra_L^n \quad Ra_L = Gr \cdot Pr = (g \beta \Delta T L^3 / \nu^2) * (\nu/\alpha)$$

$$\text{Couche limite laminaire (Rayleigh critique } \cong 10^9) A = 0.59 \quad n = 0.25$$

$$\text{Couche limite laminaire puis turbulente} \quad A = 0.1 \quad n = 1/3$$

Epaisseur de la couche limite sur une plaque plane soumise à un écoulement en convection forcée :

$$\delta = 4.92 \sqrt{\frac{\mu}{\rho} \frac{L}{U_\infty}}$$

Epaisseur de la couche limite sur une plaque plane verticale en convection naturelle :

$$\delta = 6.L \left( \frac{4}{Gr} \right)^{1/4}$$