

# BUREAU D'ETUDE

## Transferts Thermiques

### Enoncé

#### Etude 1. Bronzage dans le vent

On considère un capteur solaire qui reçoit du soleil un flux rayonné  $\varphi_i = 1 \text{ kW/m}^2$ . On supposera que la surface du capteur est assimilable à un corps noir, c'est-à-dire que le flux réfléchi est nul. La totalité du flux radiatif incident est donc absorbée. La surface du capteur, supposée horizontale, est un carré de 2 m de côté, posé sur un support au dessus du sol. Cette surface est isolée thermiquement par le dessous. Elle se refroidit :

- d'une part, par rayonnement, la surface émet vers la voûte céleste un flux radiatif  $\varphi_r$  et on suppose que le temps est clair et sans nuage de sorte que l'atmosphère est totalement transparente au rayonnement,
- d'autre part, par échange thermique conductif-convectif  $\varphi_c$  avec l'air ambiant à  $30^\circ\text{C}$ , en supposant que l'atmosphère est animée d'un vent fort de  $10 \text{ m/s}$ , vitesse supposée suffisamment forte pour que l'échange convectif puisse être considéré comme un régime de convection forcée.

1. Calculer, en régime permanent, la température de surface du capteur.
2. Quelle serait la valeur du flux solaire incident en dessous de laquelle le capteur ne serait pas plus chaud que l'air ?
3. Quelle serait la température du capteur par une claire nuit d'été où le flux solaire serait nul (toujours avec  $T_a = 30^\circ\text{C}$ ) ?

Données numériques :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Unités SI}$$

pour l'air :

$$\lambda_a = 0.02 \text{ W/m/K}$$

$$\nu_a = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0.7$$

#### Etude 1. (suite) Bronzage sous abri

Reprendre l'étude précédente en supposant que le capteur est isolé du vent par une vitre d'épaisseur  $e = 0.5 \text{ cm}$  et une petite lame d'air de même épaisseur (Cf. figure 1). On suppose que cette lame d'air mince est au repos (on le vérifiera *a posteriori*). On suppose également le verre complètement transparent au rayonnement. On donne  $\lambda_v = 1 \text{ W/m/K}$ .

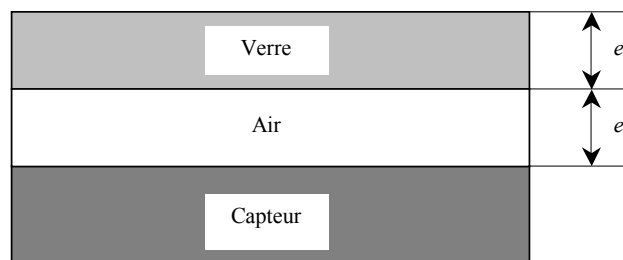


Schéma du capteur solaire protégé par une vitre.

## Etude 2. Courants de densité

### 1. Préambule

Un courant de densité de hauteur  $H$  avance avec une vitesse  $u$  dans un fluide au repos de hauteur  $d$ . On se place, pour estimer la vitesse, dans un référentiel lié au front (Cf. figure 2).

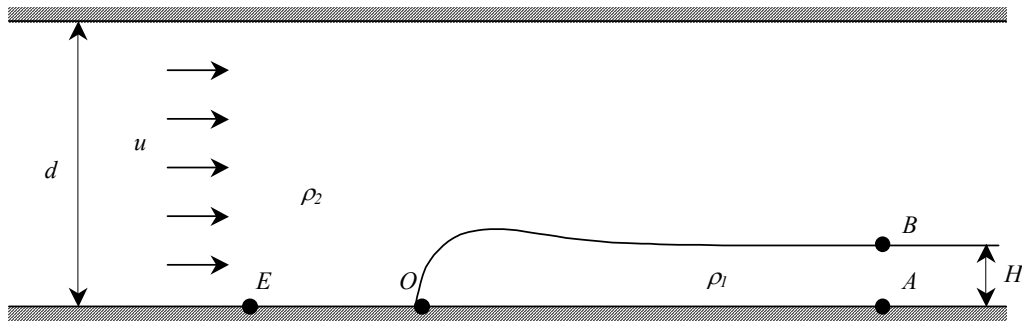


Schéma d'un courant de densité.

Pour calculer la vitesse  $u$  :

- écrire l'équation de continuité dans le fluide 2 entre l'amont et l'aval,
- écrire le théorème de Bernoulli dans le fluide 2 le long de la ligne de courant EOB,
- on suppose tous les frottements négligeables (fluide parfait) et le fluide 1 au repos.

Comparer le résultat obtenu au résultats expérimentaux portés p. 168 (figure 13) du livre. On utilisera l'expression de  $u$  trouvée dans ce préambule pour résoudre les deux problèmes qui suivent.

2. Un circuit hydraulique de diamètre  $d$  est alimenté en eau froide (température  $T_1$ ) avec la vitesse  $U$  est connecté par un piquage à une arrivée d'eau chaude (température  $T_2$ ). En amont du piquage, le circuit d'eau froide comprend un coude (Cf. figure 3).

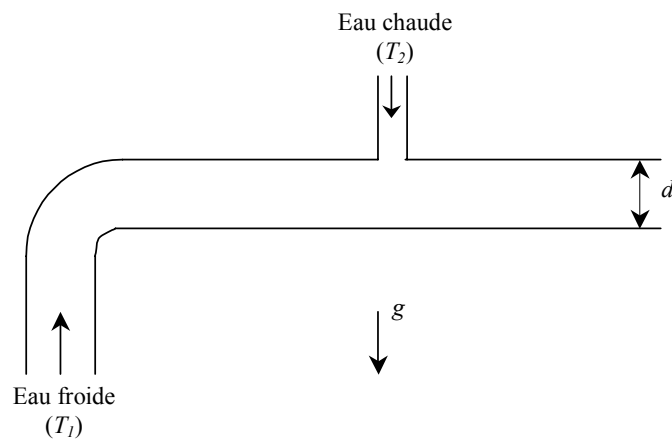


Schéma du circuit hydraulique.

On ne souhaite pas que de l'eau chaude puisse remonter jusqu'au coude, pour ne pas risquer d'endommager les tuyauteries. Trouver une condition sur la vitesse  $U$  pour qu'on soit assuré qu'il ne se forme pas de courant de densité. Montrer que cette condition peut se mettre sous la forme d'une valeur critique du nombre de Froude réduit. Pour simplifier, on fera comme si le conduit était de section rectangulaire et on supposera le problème bidimensionnel (sinon, il faudrait réécrire plus proprement l'équation de continuité). Commenter la cohérence de cette condition avec les résultats expérimentaux portés p. 159 (figure 10) du livre.

3. Un barrage flottant a pour objet de protéger une baie d'une nappe flottante d'hydrocarbures (Cf. figure 4).

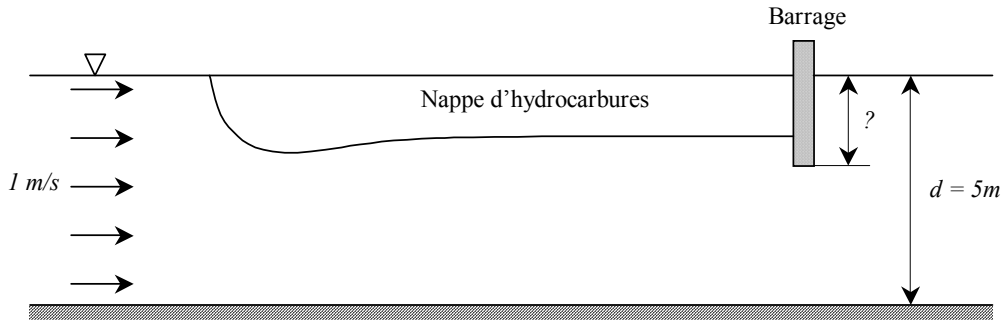


Schéma d'un barrage d'hydrocarbures.

Le courant dans la baie peut atteindre  $1\text{ m/s}$  sous l'effet de la marée. Par ailleurs, la profondeur d'eau à l'endroit où est implanté le barrage est de  $5\text{ m}$ . Calculer la profondeur du barrage pour qu'il n'y ait pas pénétration d'hydrocarbures dans la baie. Dans cette étude, on négligera tous les frottements. Si on trouve plusieurs solutions au problème, on vérifiera, par un raisonnement qualitatif simple, que seule l'une d'entre elles correspond à un état d'équilibre stable. Donnée numérique : la masse volumique des hydrocarbures est de  $900\text{ kg/m}^3$ .

### Etude 3. Dimensionnement du circuit de refroidissement d'un réacteur expérimental

On souhaite dimensionner le circuit de refroidissement d'un réacteur nucléaire expérimental à gaz. Ce réacteur est modélisé de la façon suivante :

- le coeur du réacteur est constitué d'un barreau cylindrique d'oxyde d'uranium de longueur  $L$  et de diamètre  $D_1$  (avec sa gaine protectrice) plongé dans un canal cylindrique de diamètre intérieur  $D_2$  dans lequel circule du  $\text{CO}_2$  sous pression,
- l'isolation thermique extérieure du coeur est supposée parfaite,
- le  $\text{CO}_2$  est refroidi dans un échangeur par un courant d'eau,
- le tuyau cylindrique de longueur  $l$  allant de la sortie du coeur à l'échangeur est imparfaitement calorifugée,
- une pompe fait circuler le  $\text{CO}_2$  et impose un débit massique de gaz constant  $\dot{m}$ ,
- le problème sera supposé monodirectionnel, les abscisses curvilignes sont désignées par  $x$ ,  $y$  et  $z$  respectivement dans les trois éléments du circuit : le coeur, la tuyauterie gaz et l'échangeur.

*Partie I : détermination du débit massique de gaz*

Le flux surfacique de chaleur dégagé par le barreau d'uranium (et proportionnel au flux de neutrons) a une densité approximative donnée par la loi suivante :

$$\varphi(x) = \varphi_0 \cos\left(2p\left[\frac{x}{L} - \frac{1}{2}\right]\right)$$

avec  $p = 1.374\text{ rad}$ .

1. Soit  $T_m(x)$  la température de mélange à la cote  $x$  du coeur. Quel est le flux de chaleur emporté par le fluide entre l'entrée dans le coeur (cote  $x = 0$ ) et la cote  $x$ ? Montrer que l'on peut exprimer  $T_m(x)$  sous la forme :

$$T_m(x) = \overline{T_m} + \frac{\Delta T}{2} \frac{\sin\left(2p\left[\frac{x}{L} - \frac{1}{2}\right]\right)}{\sin p}$$

avec :

$$\begin{cases} \overline{T_m} = \frac{T_m(L) + T_m(0)}{2} \\ \Delta T = T_m(L) - T_m(0) \end{cases}$$

où  $T_m(0)$  et  $T_m(L)$  sont les températures de mélange à l'entrée et à la sortie du coeur.

On rappelle l'expression de la température de mélange :

$$T_m = \frac{\int_A \rho T (\underline{u} \cdot \underline{n}) dA}{\int_A \rho (\underline{u} \cdot \underline{n}) dA} = \frac{1}{\dot{m}} \int_A \rho T (\underline{u} \cdot \underline{n}) dA$$

où  $A$  désigne la section de la conduite et  $\dot{m}$  le débit massique.

2. Bien que le flux de chaleur apporté par le combustible ne soit pas constant sur toute la longueur  $L$ , on supposera que le nombre de Nusselt est indépendant de  $x$  et qu'on peut appliquer la corrélation suivante (on vérifiera qu'on est bien en régime turbulent) :

$$\text{Nu} = 0.02 \times \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{1/3} \times \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^{0.53}$$

On suppose également que les régimes dynamique et thermique sont établis à l'entrée du coeur en  $x = 0$ . Calculer la température maximum  $T_p^{\text{max}}$  atteinte par la paroi de la gaine entourant le combustible. Exprimer le nombre de Reynolds en fonction du débit massique  $\dot{m}$  et déterminer ce débit de façon à ce que la température de la paroi de la gaine ne dépasse pas  $535^\circ\text{C}$ . En déduire la hauteur  $L$  du coeur.

Indication : on déterminera successivement le coefficient d'échange  $h$ , le nombre de Nusselt, le nombre de Reynolds et enfin le débit massique.

3. Déterminer la position  $\left(\frac{x}{L}\right)_{\text{max}}$  pour laquelle on atteint la température de gaine maximum. Tracer l'allure de  $T_m\left(\frac{x}{L}\right)$  et  $T_p\left(\frac{x}{L}\right)$ .

### Partie II : dimensionnement du calorifugeage de la conduite de gaz en sortie du coeur

Le  $\text{CO}_2$  sortant du canal est transporté jusqu'à l'échangeur par un tuyau cylindrique en acier, de rayon intérieur et extérieur désignés respectivement par  $R_1$  et  $R_2$ , entouré d'un calorifuge de rayon  $R_3$  imposé. On suppose que le gaz est uniformément à la température  $\theta(y)$  sur toute section droite de la conduite (ici  $y$  représente l'abscisse curviligne le long de la conduite). On a donc :

$$\theta(0) = T_m(L)$$

Soit  $h_a$  le coefficient d'échange entre le calorifuge et l'air ambiant supposé à la température  $T_a$ . On désigne par  $\lambda_a$  et  $\lambda_c$  les coefficients de conduction respectifs de l'acier et du calorifuge.

La longueur  $l$  de la conduite étant de 10 m et la température à l'entrée de l'échangeur ne devant pas être inférieure à  $325^\circ\text{C}$ , quelle doit être le coefficient de conduction  $\lambda_c$  du calorifuge ? Calculer numériquement  $\lambda_c$ .

Données numériques :

$$D_1 = 0.02 \text{ m}, D_2 = 0.05 \text{ m},$$

$$R_1 = 0.012 \text{ m}, R_2 = 0.015 \text{ m}, R_3 = 0.03 \text{ m}, l = 10 \text{ m}$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ kg/m/s}, \lambda_{\text{CO}_2} = 2 \times 10^{-2} \text{ W/m/K}, C_{p,\text{CO}_2} = 1.07 \times 10^3 \text{ J/kg/K}$$

$$C_{p,\text{eau}} = 4.8 \times 10^3 \text{ J/kg/K}$$

$$\lambda_a = 20 \text{ W/m/K}$$

$$h_a = 10 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

$$\varphi_0 = 10^5 \text{ W/m}^2$$

$$T_m(0) = 230^\circ\text{C}, T_m(L) = 330^\circ\text{C}, T_p^{\text{max}} = 535^\circ\text{C}$$

$$T_a = 20^\circ\text{C},$$

$$T_{\text{CO}_2}^e = \theta(l) = 325^\circ\text{C}, T_{\text{eau}}^e = 210^\circ\text{C}, T_{\text{eau}}^s = 310^\circ\text{C}$$

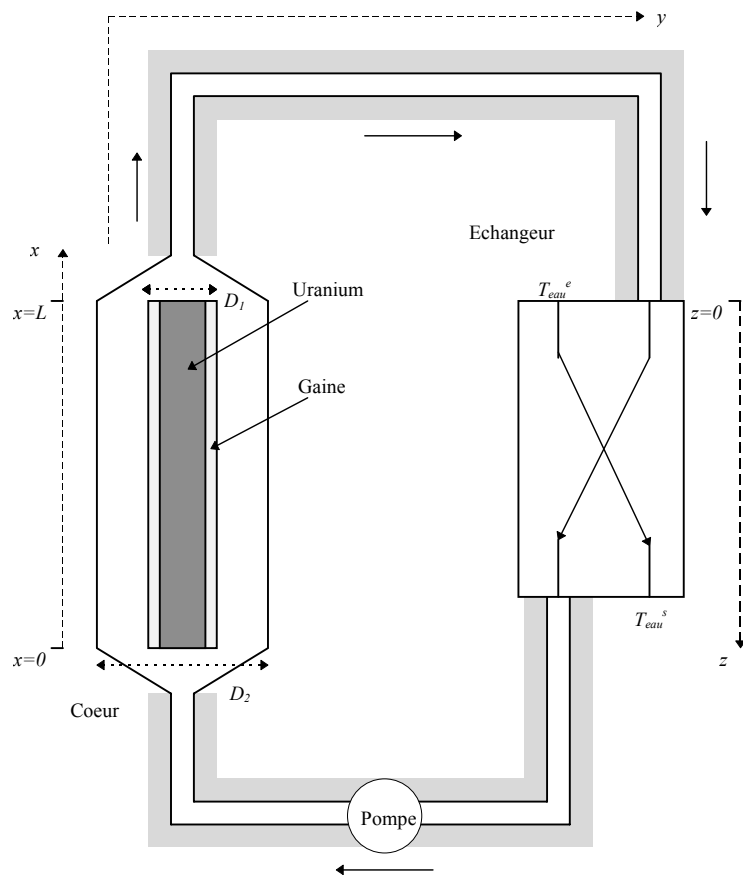


Schéma de principe du réacteur expérimental.

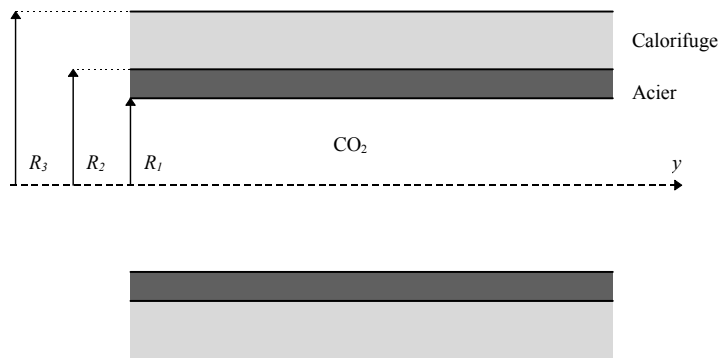


Schéma de principe de la conduite de gaz entre le réacteur et l'échangeur.