

Convection forcée et effet d'ailette

But du TP : Les échanges de chaleur entre un solide et le fluide, qui l'entoure, sont de type convectif. Ils dépendent de l'écoulement du fluide autour du solide. Vous étudierez dans ce TP la dépendance du coefficient d'échange convectif à la vitesse d'écoulement autour d'une plaque rectangulaire horizontale et parallèle à l'écoulement. Ceci dans le but de comprendre comment augmenter ces échanges avec un système d'ailettes qu'on peut retrouver, par exemple, dans un convecteur domestique ou dans un radiateur de microprocesseur.

Avertissement

Dans votre compte rendu, il est impératif que vos graphes soient numérotés, légendés et discutés dans le texte ; il est également important que vos tableaux soient présentés de manière pertinente : un tableau ou une figure sans légende et dont le contenu n'est pas discuté dans le texte n'a pas à figurer dans un compte rendu.

1 Éléments théoriques

1.1 Convection et coefficient d'échange convectif

Lorsque qu'un solide est à une température différente du fluide qui l'entoure, il se produit un transfert de chaleur entre le fluide et le solide qui tire sa particularité dans le fait que le fluide peut se déplacer autour du solide. Ce transfert est donc dépendant de la nature du fluide, mais également de la façon dont il s'écoule autour du solide.

Le flux convectif de chaleur Φ_{cv} est proportionnel à la surface d'échange fluide-solide S et à la différence de température ΔT entre le fluide et le solide et on peut donc écrire :

$$\Phi_{cv} = h.S.\Delta T \quad (1)$$

Le coefficient de proportionnalité h , qui lie le flux convectif à ces deux grandeurs, s'appelle le coefficient d'échange convectif. C'est ce coefficient qui va varier en fonction de la nature du fluide et de son écoulement.

Au cours de ce TP, la dépendance de h à la nature du fluide ne sera pas étudiée puisque seul l'air sera utilisé comme fluide en écoulement autour de l'élément solide. Suivant que l'écoulement d'air est imposé par une ventilation externe, ou initié par les différences de densité de l'air (l'air chaud est plus léger que l'air froid), on parle de convection forcée ou de convection naturelle. Dans les deux cas, c'est l'écoulement qui assure le renouvellement des couches de fluides en contact avec la paroi, et renforce les échanges de chaleur. Au cours de cette séance, seule la convection forcée sera étudiée en mettant l'air en mouvement à l'aide d'un ventilateur et permettra de caractériser l'évolution de h en fonction de la vitesse sur le système particulier de la plaque plane horizontale (vitesse d'écoulement parallèle à la plaque).

1.2 Couche limite dynamique, couche limite thermique

Considérons une plaque rectangulaire chauffée, au sein d'un écoulement d'air, parallèle à celle-ci, à température ambiante. La plaque est refroidie par l'écoulement. Suivant le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), il se développe à la surface de la plaque une couche de fluide au sein de laquelle le profil de vitesse du fluide est différent de celui qu'on retrouve loin de la paroi.

Pour le transfert de chaleur, cela implique que les effets de l'écoulement (le transport) ne se manifeste que loin des parois. Néanmoins, au contact d'une paroi à température imposée, la température évolue

rapidement sur les premières couches fluides, pour atteindre la température du fluide. L'épaisseur sur laquelle la température du fluide évolue est **la couche limite thermique**.

Le flux thermique échangé dans cette couche limite thermique est assuré essentiellement par la conduction. Pour ces raisons et dans le but de pouvoir comparer les échanges convectifs dans des configurations très différentes, plutôt que de tracer la simple évolution du coefficient h en fonction des grandeurs caractéristiques de l'écoulement et des propriétés thermiques du système, on trouve des corrélations donnant l'évolution du nombre de Nusselt, Nu , en fonction des nombres de Reynolds, Re , et de Prandtl, Pr , ces trois nombres sans dimension permettant de caractériser les régimes d'écoulement ainsi les propriétés thermiques du système.

Le **nombre de Nusselt** Nu est un nombre sans dimension, qui permet de comparer les échanges convectifs avec les échanges conductifs au sein d'un fluide en contact avec le solide, qui est à une température différente. Il mesure aussi l'efficacité de l'écoulement dans l'intensification des transferts de chaleur. Sa valeur dépend bien sûr des caractéristiques de l'écoulement (écoulement interne, externe, établi ou pas, du nombre de Reynolds, ...) mais pas de la nature exacte du fluide. Il est défini par la formule suivante :

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2)$$

avec h , le coefficient d'échange convectif, L une longueur caractéristique du système (la longueur de la plaque dans notre expérience) et k , la conductivité thermique du fluide.

Le **nombre de Reynolds** Re est un nombre sans dimension, qui permet de comparer les effets visqueux et les effets inertiels dans un fluide en écoulement. On le définit comme suit :

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3)$$

Avec ρ , la masse volumique du fluide, U , la vitesse d'écoulement du fluide, L , une longueur caractéristique du système (la longueur de la plaque dans notre expérience) et μ , la viscosité dynamique du fluide.

Le **nombre de Prandtl** Pr est, lui aussi, un nombre sans dimension, qui permet de comparer la rapidité des phénomènes thermiques et celles des phénomènes hydrodynamiques. Il est défini de la façon suivante :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (4)$$

Avec μ , la viscosité dynamique du fluide, C_p , la capacité calorifique du fluide et k , la conductivité thermique du fluide.

On démontre ainsi que dans le cas d'une simple plaque en régime laminaire ($Re_L < 3.10^5$), ces nombres sans dimension sont liés par la relation suivante :

$$Nu_L = 0,665 Re_L^{0,5} Pr^{1/3} \quad (5)$$

Alors que si l'écoulement est turbulent ($Re_T > 5.10^5$) et que $Pr > 0,5$, on a :

$$Nu_T = 0,035 Re_T^{4/5} Pr^{1/3} \quad (6)$$

1.3 Effet d'ailette

Pour augmenter les échanges de chaleur entre un solide et un fluide, on lui adjoint parfois un système d'ailettes. C'est le cas pour les convecteurs domestiques, ou les processeurs informatiques... Le principe de base est d'augmenter la surface d'échange. Nous allons étudier en détail le fonctionnement

d'une ailette.

Le flux de chaleur Φ produit à une de ses extrémités, est évacué pour partie par convection naturelle avec une densité surfacique $\phi_{cv}(x) = h \cdot \Delta T(x)$, sur une surface d'échange $dS = \mathcal{P}dx$, où \mathcal{P} désigne le périmètre de l'ailette (et vaut ici deux fois la largeur de l'ailette, car il y a deux faces). Le reste de la chaleur est transféré par conduction le long de l'ailette. Cette chaleur devra alors être évacuée par convection ou conduite plus loin le long de l'ailette. Au final, toute la chaleur est évacuée par convection, et :

$$\Phi = \int \phi_{cv}(x) \cdot dS = h \cdot \mathcal{P} \cdot \int (T(x) - T_{\infty}) \cdot dx \quad (7)$$

Pour connaître le profil de température le long de l'ailette, il suffit de faire un bilan sur chaque tranche. Le flux transféré par conduction à travers l'ailette est :

$$\phi_{cd}(x) = -k \mathcal{S} \frac{\partial T}{\partial x}$$

Ce flux varie le long de l'ailette, à cause des flux perdus par convection, et on a ainsi :

$$\phi_{cd}(x + dx) - \phi_{cd}(x) = -\mathcal{P} \cdot dx \cdot \phi_{cv}(x) = -\mathcal{P} \cdot dx \cdot h \cdot (T(x) - T_{\infty})$$

et finalement, on obtient : $\mathcal{S} \cdot k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = h \cdot \mathcal{P} \cdot (T(x) - T_{\infty})$

La forme générale de la solution est $T(x) = A \cdot e^{\frac{x}{L}} + B \cdot e^{-\frac{x}{L}}$ avec

$$L = \sqrt{\frac{k \cdot \mathcal{S}}{h \cdot \mathcal{P}}} \quad (8)$$

où L est une longueur caractéristique, A et B sont des constantes à déterminer, k est la conductivité thermique du cuivre ($k = 390 \text{ W/m/K}$), \mathcal{P} et \mathcal{S} sont le périmètre et la surface de la section de l'ailette (largeur \times épaisseur), et h est le coefficient d'échange convectif.

En particulier, dans le cas d'une ailette infiniment longue comparée à L , on obtient :

$$T(x) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) \cdot e^{-\frac{x}{L}} \quad (9)$$

Dans cette équation, L représente la longueur sur laquelle la température est amortie.

Le flux total évacué par l'ailette est :

$$\Phi = \int h \cdot \mathcal{P} \cdot (T(x) - T_{\infty}) \cdot dx = h \cdot \mathcal{P} \cdot L \cdot (T_0 - T_{\infty}) \quad (10)$$

où L représente aussi la longueur efficace de l'ailette.

2 Dispositif expérimental

Un film chauffant (résistance) est pris en sandwich entre deux plaques de cuivre pour former un élément rectangulaire de 3,8 cm de large, de 6,4 cm de long et de 2 mm d'épaisseur.

Un second dispositif identique à celui décrit précédemment est positionné à l'extrémité d'une ailette également en cuivre de 3 cm de large, de 50 cm de long et d'1 mm d'épaisseur. Il servira dans la seconde partie du TP.

Chacun de ces éléments est fixé au sein d'un tube en PlexiglasTM cylindrique, qui va pouvoir être encastré dans un raccord en PVC, afin d'y faire circuler de l'air à différentes vitesses grâce à un ventilateur. La vitesse de l'écoulement généré pourra être modifiée en obstruant plus ou moins l'entrée

d'air du ventilateur. Cette vitesse sera mesurée au moyen d'une sonde à fil chaud, à placer en sortie de tube perpendiculairement à l'axe de celui-ci.

Une alimentation de courant continu avec afficheur et variateur permettra d'imposer différentes tension et courant aux bornes des résistances chauffantes des deux dispositifs, qui seront utilisés successivement.

Un thermocouple de type K est placé sur la plaque du premier dispositif. Sept autres thermocouples de type K sont disposés le long de l'ailette. L'acquisition en température se fait directement sur l'ordinateur grâce à un conditionneur connecté en USB et au logiciel PL Recorder et permet d'avoir l'évolution de température au cours du temps.

3 Manipulations

3.1 Détermination des coefficients d'échanges convectifs h

Commençons avec le dispositif de petite taille.

- Déterminer le coefficient d'échange convectif, h , pour au moins 4 vitesses d'écoulement, v . Pour déterminer h à une vitesse donnée, procédez de la façon suivante :
 - Fixer la vitesse du ventilateur en obstruant l'entrée d'air du ventilateur au moyen des caches disponibles. Mesurer la vitesse de l'écoulement à l'aide de la sonde à fil chaud.
 - Faire une acquisition de la température de la plaque éteinte (voie 1) afin de déterminer la température du fluide à la vitesse fixée (attention cette valeur change en fonction de la vitesse imposée).
 - Imposer une tension entre 10 et 50 V (le courant va s'adapter), et attendre que la température se stabilise afin que l'on puisse considérer que $P = U.I = \Phi_{cv}$. Relever U , I et cette température. Répéter l'opération avec au moins une autre tension.
Attention à ne jamais dépasser une température de 60°C
 - Tracer $P = f(S.)$ et déterminer h .
- Déterminer la dépendance du coefficient d'échange, h à la vitesse v de l'écoulement en traçant $h = f(v)$. Demander des valeurs de h à vos encadrants si vous manquez de valeurs.
- Tracer $Nu = f(Re)$ et montrer que l'évolution est de la forme $Nu \propto \sqrt{Re}$

3.2 Profils d'ailette

Travaillons maintenant avec le dispositif de grandes dimensions, constitué d'une ailette de 50 cm de long à l'extrémité de deux plaques de cuivre rectangulaires prenant en sandwich un film chauffant.

- Mesurer le profil stationnaire de température dans l'ailette pour deux vitesses v , suffisamment différentes, en fixant une tension d'alimentation du film chauffant de 45 V. Vérifier que ces profils sont bien exponentiels.
- Mesurer alors la longueur caractéristique de ces profils de température, et déterminer sa dépendance à la vitesse de l'écoulement et au coefficient d'échange.
- Vérifier expérimentalement le bilan : $\Phi = P_{chauffe} = \int h.P.\Delta T(x).dx$