

Généralités sur la convection

Types de Convection. Les écoulements.
Flux de chaleur et résistance thermique
globale, Approximations et similarité.

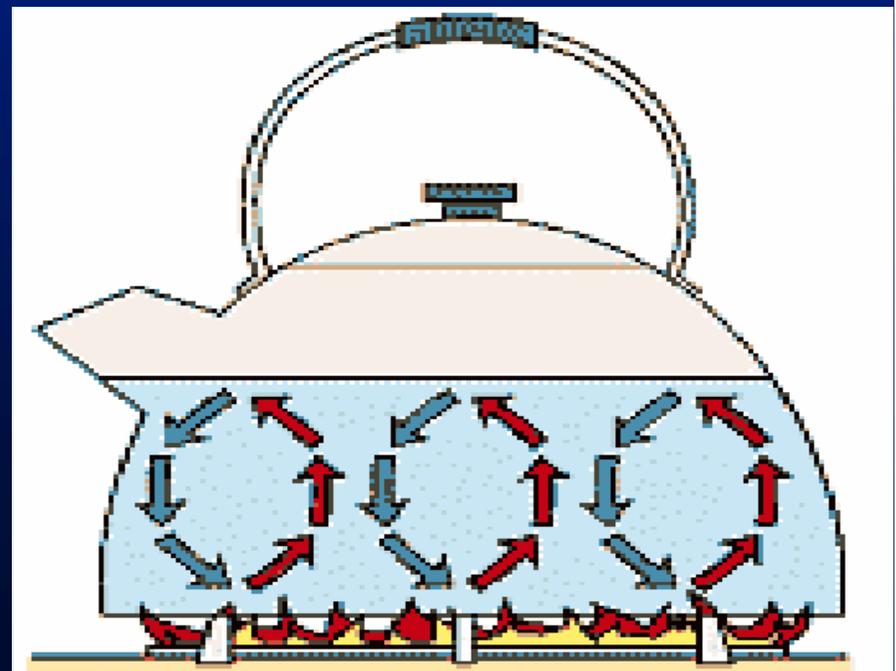
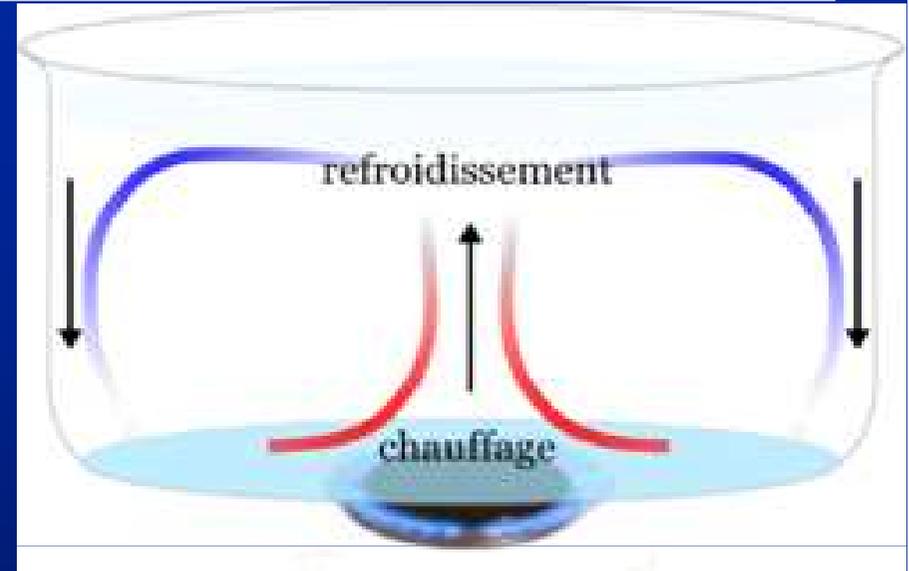
Introduction

- **La convection représente**
 - le transfert entre un fluide et une paroi;
 - La convection est un mode de **transfert** qui implique un déplacement de matière dans le milieu. La matière est **advectée** (*transportée-conduite*), par au moins un **fluide**.
 - un phénomène comportant le transport d'énergie thermique par le mouvement et la diffusion;
- Lorsque le transfert de chaleur s'accompagne d'un transfert de masse. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides ou lorsque un fluide circule autour d'un solide.
- **Objectifs de ce thème**
 - comprendre les mécanismes opérationnels relatif à la convection;
 - quantifier les échanges thermiques convectifs.

Phénomène de Convection

□ Le mouvement dans une **casserole** posée sur le feu s'explique par les différences de **densité** créées par le **chauffage**. Le fluide se met en mouvement spontanément quand la différence de **température** entre le haut et le bas de la couche d'eau atteint une valeur critique.

□ Le **chauffage** par le sol relève du même principe. La couche chaude à la base des pièces, du fait de la dilatation thermique, devient plus légère (relativement) et engendre une circulation dans la maison.



Convection Thermique

- L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.
- La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :
 - la différence de température entre la paroi et le fluide ;
 - la vitesse du fluide ;
 - la capacité thermique massique du fluide ;
 - la surface d'échange ;
 - l'état de surface du solide ;
 - sa dimension etc . .

Types de convection

Convection naturelle

Convection forcée

La convection Naturelle: représente un phénomène de la *mécanique des fluides*, qui se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide. Le gradient est généralement la température.

- La **masse volumique** est en général fonction de la température.
- La différence de **masse volumique** implique une différence de la poussée et donc crée un mouvement.
- De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Ils sont à l'origine de certains phénomènes océanographiques (**courants marins**), météorologiques (**orages**), géologiques (remontées de **magma**) par exemple.

Types de convection

La convection Forcée:

Elle est provoquée par une circulation artificielle (**pompe, turbine**) d'un **fluide**. Le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle. Quelques exemples de convection forcée dans des appareillages : chauffage central avec accélérateur, chauffages électriques avec soufflerie, four à convection de **cuisinière**. Le corps humain a son propre système de convection forcée, la **circulation sanguine**.

Principe physique :

Une particule de fluide chauffée à la base devient moins dense du fait de sa dilatation thermique et remonte sous l'action de la **poussée d'Archimède**. Arrivée au sommet de la couche, le fluide échange sa chaleur, se refroidit et s'alourdit. Il redescend alors et crée un transfert retour de chaleur. **Henri Bénard**, a initié à l'étude de la convection dans une couche de fluide soumise à un **gradient** de température vertical. Ces expériences sont connues sous le nom de **cellules de Bénard**.

Types de convection

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement; on distingue :

Écoulement en régime laminaire:

❖ Tous les vecteurs vitesse sont parallèles à un instant t . Si tous les vecteurs vitesse sont à la fois parallèles et égaux, l'écoulement laminaire est uniforme.

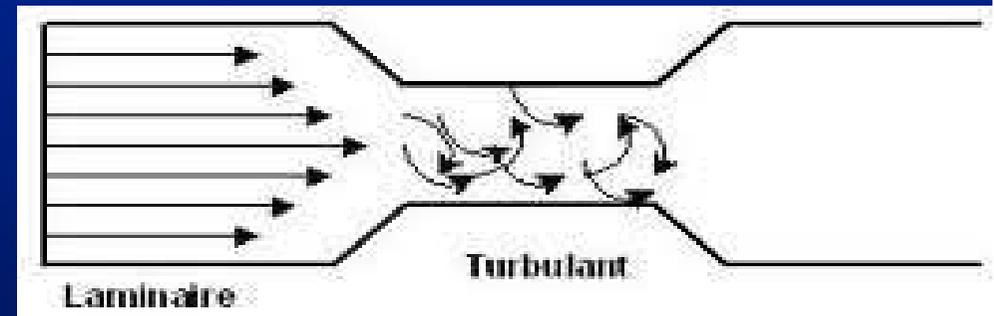
Écoulement en régime turbulent: Les vecteurs des vitesses instantanées sont inégaux (différents en direction, sens, intensité). Des tourbillons se forment. La viscosité du fluide augmente: à la viscosité moléculaire μ s'ajoute une viscosité de turbulence n .



Écoulements

- **Quels sont les deux types d'écoulements ?**

- on distingue deux types d'écoulements: laminaires et turbulents;
- on est en présence d'un écoulement mixte lorsqu'une partie de la surface est en régime laminaire alors que l'autre partie est en régime turbulent.



- **Écoulement laminaire**

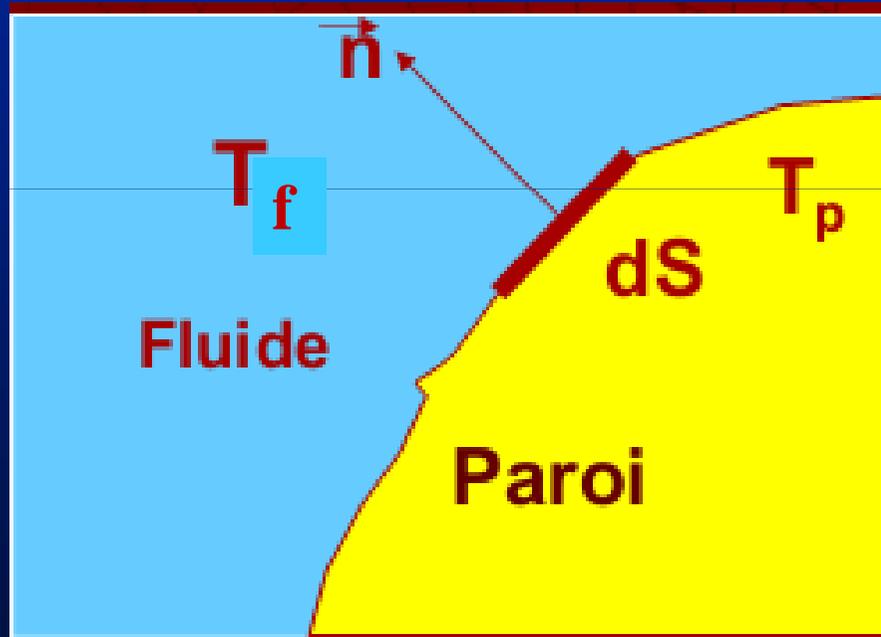
- mouvement ordonné du fluide, les particules de fluides s'écoulent le long de lignes de flux;
- l'écoulement s'effectue simultanément selon un axe x , parallèle à la surface et un axe y , normal à la surface.

- **Écoulement turbulent**

mouvement désordonné du fluide accompagné de variations de vitesse importantes;

Transfert convectif

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.



Un fluide de température T_f s'écoule au-dessus d'une paroi maintenue à une température T_p .

Transfert convectif

- **Un coefficient local**

- Un transfert de chaleur par convection a lieu si $T_f \neq T_p$.
- Le flux de chaleur local q'' est exprimé selon l'équation:

$$q'' = h (T_p - T_f)$$

où h est le coefficient de convection local, coefficient d'échange par convection,

il s'exprime en $W/(m^2.K)$

q'' s'exprime en Joules.

Transfert convectif

- **Un coefficient moyen**

- Les conditions de l'écoulement varient le long d'une surface, donc h varie aussi et par conséquent, q'' varie.
- Le taux de transfert de chaleur est obtenu en intégrant le flux local sur toute la surface.

$$q = (T_p - T_f) \int h dA_s$$

- La relation peut être exprimée en fonction d'un coefficient de convection moyen.

$$q = h \bar{A}_s (T_p - T_f)$$

- donc

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int h dA_s$$

Transfert convectif

- **Le transfert de masse**

- le transfert de masse peut être décrit de la même façon que le transfert de chaleur;
- si une espèce A , de concentration molaire $C_{A,\infty}$ s'écoule le long d'une surface où la concentration de la même espèce est maintenue à une valeur $C_{A,s} \neq C_{A,\infty}$, un transfert de masse par convection a lieu;
- le flux molaire local associé à ce transfert est définie selon la relation

$$N_A'' = h_m (C_{A,s} - C_{A,\infty})$$

où h_m est un coefficient de transfert de masse local.

Transfert convectif

- **Le transfert de masse**

- le taux de transfert de masse total peut être exprimé en fonction d'un coefficient moyen.

$$N_A = h_m A_s (C_{A,S} - C_{A,\infty})$$

et

$$\bar{h}_m = \frac{1}{A_s} \int h_m dA_s$$

- **Qu'il s'agisse de transfert de masse ou de chaleur, la définition d'un coefficient de transfert est utile et similaire.**

Transfert convectif

- Ainsi, que ce soit pour le transfert de masse ou le transfert de chaleur, le problème de convection consiste à déterminer le coefficient de transfert

CHALEUR

h [W/m²K]

MASSE

h_m [m/s]

- **Complexité**

– le problème convectif dépend de plusieurs paramètres: caractéristiques du fluide, nature de l'écoulement, la température, la forme de la surface d'échange.

- cette multiple dépendance résulte du fait que le transfert convectif est déterminé par les couches limites fluide et thermique qui se développent sur la surface du solide.

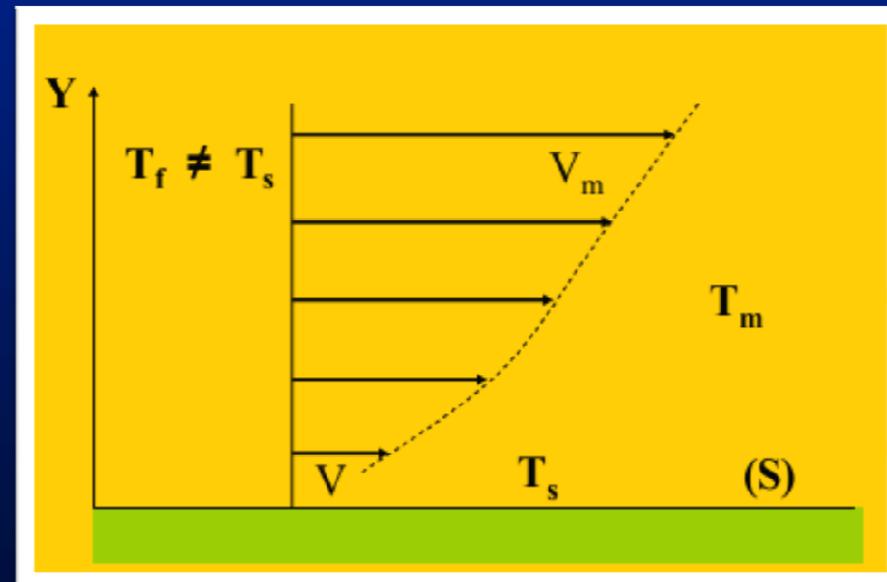
Couches limites

L'étude des écoulements au voisinage des parois est nécessaire pour la détermination des échanges thermiques par convection entre un solide et le fluide qui l'entoure.

• Considérons un fluide qui s'écoule le long d'une surface S.

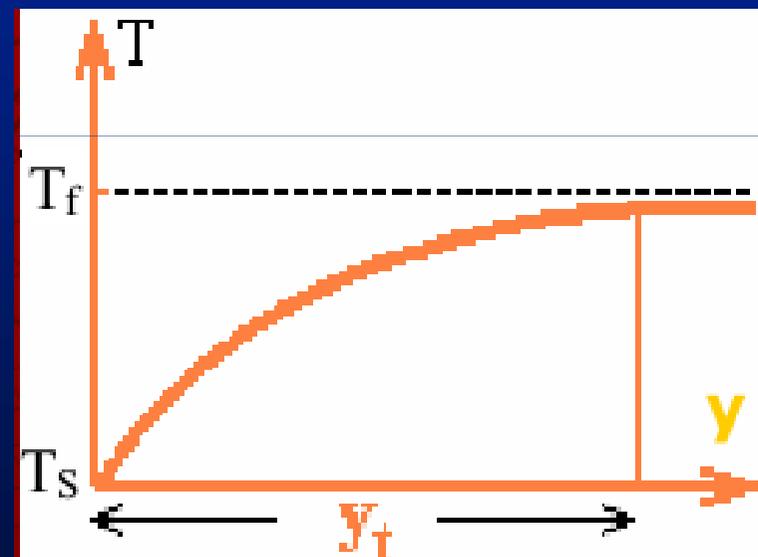
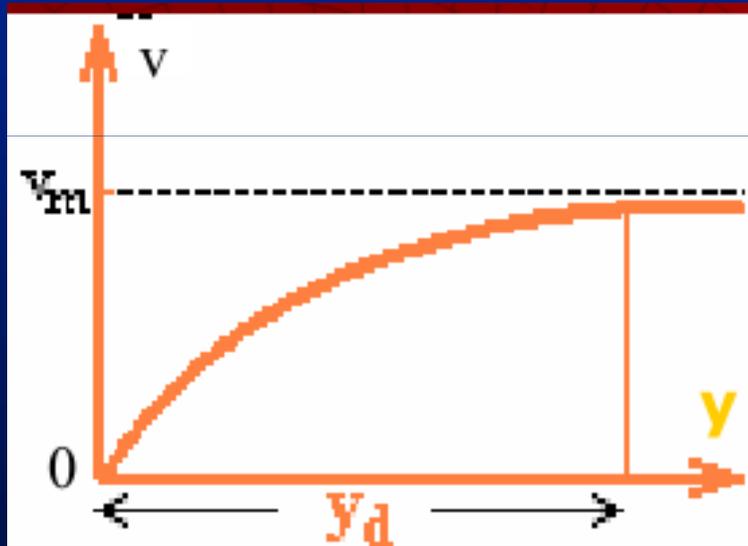
* *Loin de la surface, le fluide a une vitesse moyenne V_m et une température moyenne T_m*

* *Au voisinage immédiat de la surface, la température du fluide est très voisine de celle de la surface. La vitesse du fluide est quasiment nulle.*



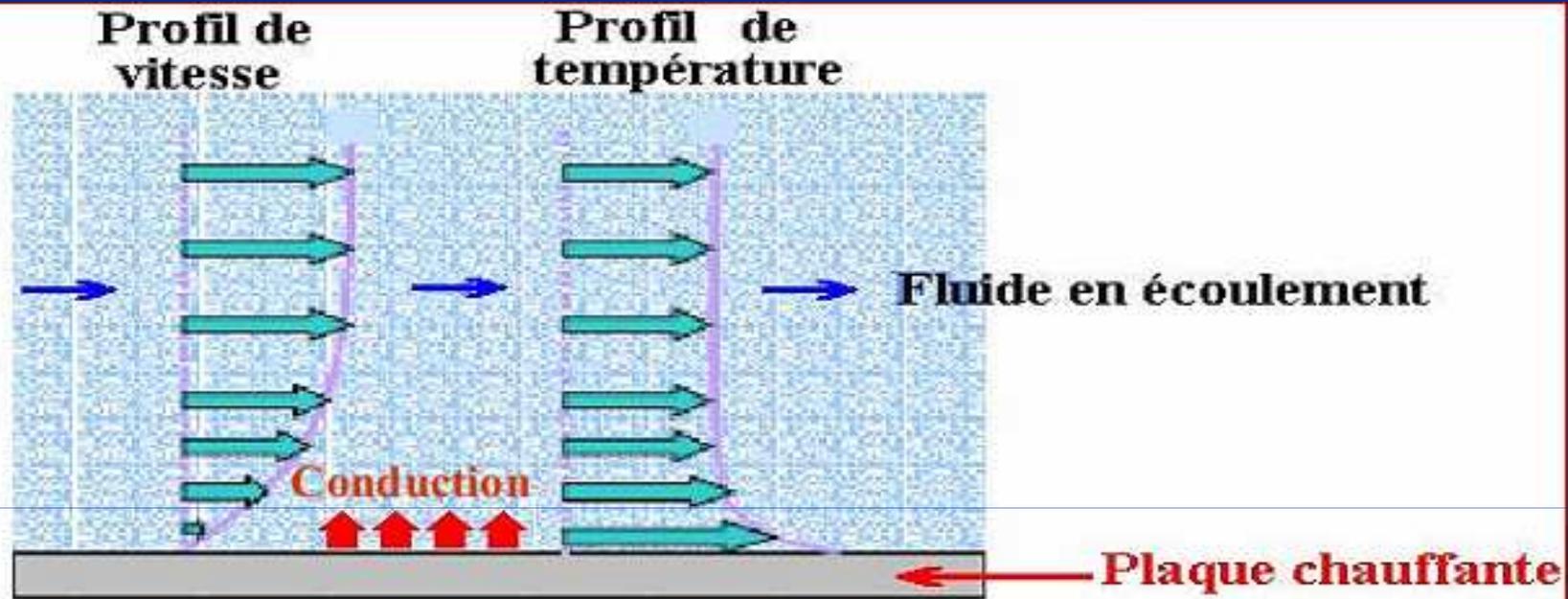
Couches limites

Les diagrammes des vitesses et des températures, dans la direction perpendiculaire à la surface, définissent une couche de fluide appelée 'couche limite' dont la température et la vitesse ont l'allure des courbes suivantes :



On définit ainsi deux **couches limites** y_d « **couche limite fluide** » et y_t « **couche limite thermique** » de quelques mm d'épaisseur.

Couches limites



Au voisinage de la surface, se développent les couches limites hydrodynamiques et thermiques dans lesquelles on observe les variations de vitesse et de température.

- Le transfert-chaaleur de la plaque vers le fluide résulte de 2 mécanismes :
- Au voisinage immédiat de la surface, le transfert se fait par conduction;
 - Loin de la surface le transfert résulte aussi du déplacement du fluide.

Couches limites

- **Quelle est donc la relation entre la couche limite thermique et le coefficient de convection h ?**
 - en chaque point de la surface, la vitesse de l'écoulement étant nulle, le transfert de chaleur s'effectue uniquement par conduction entre les molécules de fluide;
 - puisque le flux convectif correspond au flux diffusif à la paroi, un bilan d'énergie donne:

$$h = \frac{-k_f}{T_p - T_f} \left(\frac{dT}{dy} \right) \Big|_{y=0}$$

- le gradient de température influence le coefficient de transfert local. Finalement, le flux diminue en s'éloignant du bord d'attaque.

Équations du transfert convectif

La résolution des équations aux dimensions fait apparaître des nombres sans dimension très utiles dans l'étude de la mécanique des fluides et en particulier dans les phénomènes convectifs.

Ces nombres sont en particulier :

- 1 - Le nombre de Reynolds
- 2 - Le nombre de Nusselt
- 3 - Le nombre d' Eckert
- 4 - Le nombre de Grashof
- 5 - Le nombre de Prandtl

Équations du transfert convectif

Le nombre de Reynolds

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Reynolds :

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{\rho V d}{\mu}$$

V: vitesse d'écoulement du fluide (m/s)

d : distance traversée par le flux thermique (m)

ν : viscosité cinématique (kg. m⁻¹.s⁻¹)

L'expérience montre que pour Re inférieur à une valeur critique Rec, l'écoulement dans une conduite est toujours laminaire

On peut admettre la valeur **2200** pour **Rec**

Équations du transfert convectif

Le nombre de Nusselt

Il caractérise l'importance de la convection par rapport à la conduction :

C'est le rapport de la quantité de chaleur échangée par convection $h.S. \Delta T$ à une quantité de chaleur échangée par conduction $\lambda .S.\Delta T/d$:

$$Nu = \frac{h.S.\Delta T}{\lambda.S.\frac{\Delta T}{d}}$$



$$Nu = \frac{h.d}{\lambda}$$

Remarque:

Nu est fonction directe de hc, sa connaissance permet de déterminer la valeur de hc.

Équations du transfert convectif

Le nombre d'Eckert:

Caractérise la dissipation d'énergie par frottement au sein du fluide (dégradation de l'énergie mécanique en chaleur).

$$\frac{v^2}{c_p \Delta T}$$

Le nombre de Grashof :

Caractérise la force de viscosité du fluide.
 β_p : facteur de dilatation volumique du fluide.

$$Gr = \frac{gd^3\beta_p\Delta T}{\nu^2}$$

Le nombre de Prandtl:

Caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$$

Formules utilisées

a - Écoulement tubulaire :

Nombre de Reynolds critique : $Re_{ec} = 2200$

Généralement les écoulements sont forcés et le régime est turbulent et

$$Nu = 0,023 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{4/3}$$

Formule connue sous le nom 'formule de 'Colburn'

avec :

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{\rho Vd}{\mu}$$

d est le diamètre du tube

b - Ecoulement plan :

Nombre de Reynolds critique : $Re_{ec} = 3.10^5$

Convection naturelle:

Ecoulement laminaire : $Nu = 0,479.Gr^{1/4}$, $Re < Rec$

Ecoulement turbulent : $Nu = 0,13.(Gr.Pr)^{1/3}$, $Re > Rec$

Convection forcée:

Ecoulement laminaire : $Nu = 0,66 Pr^{1/3} Re^{1/2}$, $Re < Rec$

Ecoulement turbulent : $Nu = 0,036 Pr^{1/3} Re^{4/5}$, $Re > Rec$

3 - Résistance Thermique superficielle :

Considérons un fluide de température T_1 qui circule au voisinage d'une paroi de température T_2 . La densité de flux de chaleur échangée s'écrit :

$$\varphi = h_c(T_1 - T_2)$$



$$(T_1 - T_2) = \frac{1}{h_c} \cdot \varphi = R_{th} \cdot \varphi$$

L'analogie avec la loi d'Ohm permet de définir la résistance thermique superficielle R_{th} .

$$R_{th} = \frac{1}{h_c} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$$

L' équation qui régit les échanges de chaleur entre la surface A du cylindre et le fluide s'écrit:

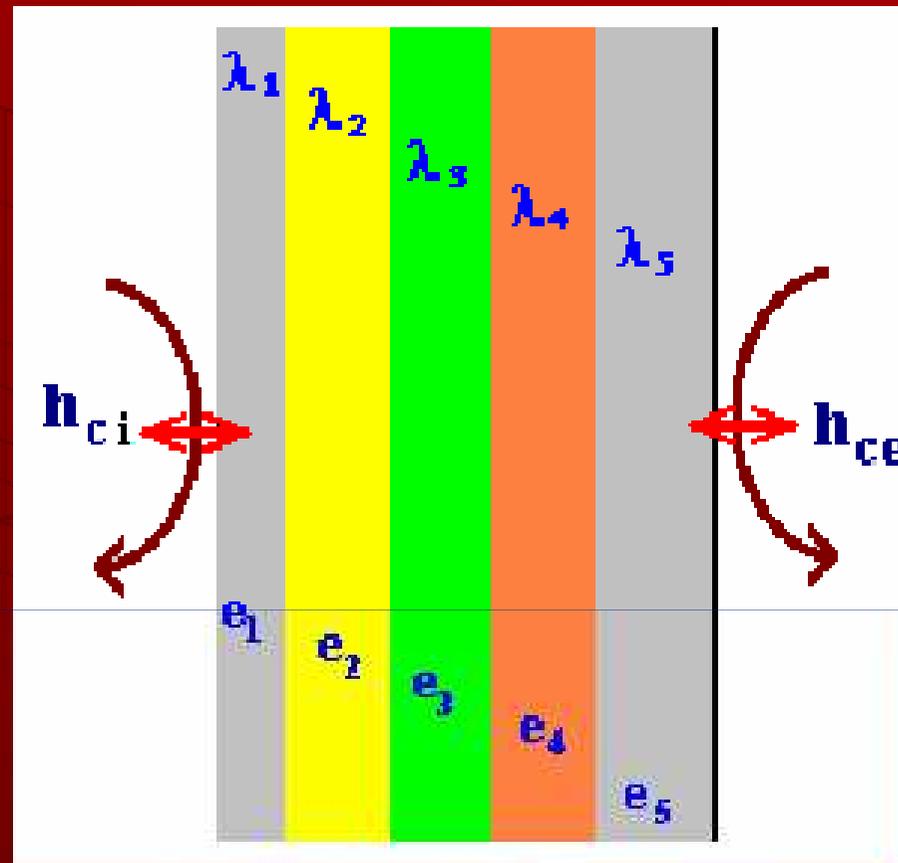
$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$$

k é tant le coefficient de transfert global et $R = 1/K$, est la résistance thermique Globale.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_{c1}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{c2}}}$$

Dans le cas d'une paroi plane composée (épaisseurs e_1 , e_2 , e_3 ...et conductivités λ_1 , λ_2 , λ_3 ...), le même calcul conduit à la résistance thermique globale :

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{1}{h_{c1}} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{1}{h_{c2}} \right)$$



$$\frac{1}{K} = \left(\frac{1}{h_{c1}} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{1}{h_{c2}} \right)$$

L'équilibre mécanique impose que les parties les plus denses soient situées en dessous des moins denses. Les mouvements dans le fluide seront alors favorisés :

c'est le phénomène de **convection naturelle**.

Formation des vents dans l'atmosphère



Exemple de calcul :

De l'air à $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ circule sur une surface plane de 75 cm de long et 30 cm de large à la température $71\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec une vitesse moyenne de $26,8\text{ m/s}$.



Calculer la puissance-chaleur échangée entre l'air et la surface.

Données :

Température de l'air : $T_{\text{air}} = 5 \text{ °C}$

Masse volumique de l'air : $\rho = 1,136 \text{ kg/m}^3$

Chaleur spécifique isobare de l'air : $c_p = 1 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Viscosité dynamique de l'air : $\mu = 1,91 \cdot 10^{-5} \text{ Poiseuille (kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1})$

Conductivité de l'air : $\lambda = 0,027 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Calcul du nombre de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{V.L}{\nu} = \frac{V.L.\rho}{\mu} = \frac{26,8 \times 0,75 \times 1,136}{1,91 \times 10^{-5}} = 1,2 \cdot 10^6$$

$\text{Re} > 3 \cdot 10^5 \rightarrow$ le régime d'écoulement est turbulent

$V = 26,8 \text{ m/s} = 96,5 \text{ km/h} \rightarrow$ la convection est forcée



Nombre de Nusselt

$$\text{Nu} = 0,036 \text{ Pr}^{1/3} \text{ Re}^{4/5}$$

Nombre de Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{1,91 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3}{0,027} = 0,711$$



$$\text{Nu} = 0,036 \cdot (0,711)^{1/3} \cdot (1,2 \cdot 10^6)^{4/5} = 2346$$



$$h_c = \frac{\lambda \cdot \text{Nu}}{L} = \frac{0,027 \cdot 2346}{0,75} = 84,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = h_c \cdot (T_s - T_{\text{air}}) \cdot S = 84,5 \cdot (71 - 5) \cdot 0,75 \cdot 0,3 = 1255 \text{ W}$$

L' équation qui régit les échanges de chaleur entre la surface A du cylindre et le fluide s'écrit:

k é tant le coefficient de transfert global et $R = 1/K$, est la résistance thermique Globale.

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_{c1}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{c2}}}$$

Application:

Calculer les températures des deux faces d'un mur d'épaisseur 0,4 m.

On donne:

- . $\lambda = 0,813 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- . $T_e = -15 \text{ }^\circ\text{C}$
- . $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- . $h_{ce} = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
- . $h_{ci} = 8,33 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

La résistance thermique globale :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_{ce}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{ci}} = \frac{1}{25} + \frac{0,4}{0,813} + \frac{1}{8,33} = 0,652$$

Soit : **$k = 1,534 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$**

Avec $T_i - T_e = 35 \text{ °C}$, on a : **$\dot{Q} = k.S.(T_i - T_e)$**

et **$\frac{\dot{Q}}{S} = k.(T_i - T_e) = 1,534 \times 35 = 53,69 \text{ W/m}^2$**

Or : **$\frac{\dot{Q}}{S} = h_{ci} \cdot (T_i - T_{pi}) = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_{pi} - T_{pe}) = h_{ce} \cdot (T_{pe} - T_e)$**

D'où : **$(T_i - T_{pi}) = \frac{\dot{Q}}{h_{ci} \cdot S} = 6,45 \text{ °C}$**  **$T_{pi} = 13,55 \text{ °C}$** .

$(T_{pi} - T_{pe}) = \frac{e}{\lambda} \frac{\dot{Q}}{S} = 26,42 \text{ °C}$  **$T_{pe} = -12,87 \text{ °C}$**

En résumé

- **Quels étaient les objectifs de cette thématique ?**
 - développer brièvement les fondements du transfert convectif;
 - présenter sommairement les trois types de convection: fluide, thermique et massique;
 - présenter brièvement l'analyse des couches limites;
 - comprendre comment est déterminé le coefficient de transfert de chaleur h .
- **L'analyse par couche limite est-elle applicable en tous cas ?**
 - non, dans la plupart des cas Nu , donc h , est obtenu à partir de relations empiriques expérimentales.
 - ces relations seront discutées aux thématiques suivantes.