

2.4 - Energie thermique

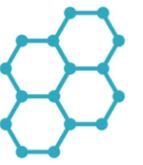
2.4.3 Convection

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

François Relotius, M.ing.

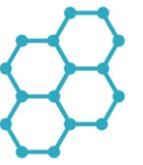
Question



ENR2020

- Qu'est ce que la convection ?
 - C'est un transfert de chaleur à l'échelle macroscopique
 - C'est un phénomène qui a lieu entre la paroi d'un solide et un fluide en mouvement
 - C'est la somme des phénomènes d'advection (le mouvement global du fluide) et de conduction à la paroi
 - C'est un phénomène qui augmente avec la vitesse du fluide en contact avec la paroi
 - Aucune de ces réponses

Question



ENR2020

- Qu'est ce que la convection ?
 - C'est un transfert de chaleur à l'échelle macroscopique
 - C'est un phénomène qui a lieu entre la paroi d'un solide et un fluide en mouvement
 - C'est la somme des phénomènes d'advection (le mouvement global du fluide) et de conduction à la paroi
 - C'est un phénomène qui augmente avec la vitesse du fluide en contact avec la paroi
 - **Toutes les réponses sont vraies, sauf E, évidemment**

Quelques questions

- Testez votre compréhension en tentant de répondre aux questions qui sont formulées en fin de présentation.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Généralités
- Calcul des pertes thermiques
- Analogie
- Exercice
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Définitions
- Généralités
- Calcul des pertes thermiques
- Analogie
- Exercice
- Conclusion

Introduction et objectifs

- La convection est l'un des trois modes de transfert thermique, avec la conduction et le rayonnement.
- Le transfert de chaleur par convection comprend deux mécanismes. Le premier est dû au mouvement **moléculaire** aléatoire. Le second est dû au mouvement global du **fluide**.

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Comprendre le phénomène convectif qui se produit entre un fluide en mouvement et une surface de délimitation lorsque les deux sont à des températures différentes.
 - Découvrir la méthodologie permettant de quantifier les pertes thermiques
 - Connaître l'analogie qui existe avec la résistance thermique

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Définitions***
- Généralités
- Calcul des pertes thermiques
- Analogie
- Exercice
- Conclusion

Définitions

- Qu'est-ce que la convection ?
 - *Transfert de chaleur par échange d'énergie par **un fluide en mouvement** (macroscopique). Il n'existe pas dans le vide.*
 - *À l'interface entre une paroi solide et un fluide en mouvement*
- Combien de mécanismes physiques interviennent ?
 - *Conduction (forme de diffusion) à la paroi entre fluide et solide*
 - *Advection (transport d'énergie dû à un mouvement de fluide en vrac)*

Définitions

- Conduction (diffusion)
 - Il y a d'abord de la **conduction** à la paroi (la conduction est un cas particulier du phénomène plus général de diffusion). Les molécules du solide transfèrent leur énergie au fluide par diffusion due à leur activité moléculaire.
 - En percutant les molécules de fluide en contact avec la paroi, les molécules solides chauffent le fluide.
 - À la jonction de la paroi avec le fluide, il n'y a aucun mouvement du fluide, la vitesse est nulle (p.12). Tout le changement de vitesse (en fait 99%) se fait dans la couche limite hydrodynamique (p.12)

Définitions

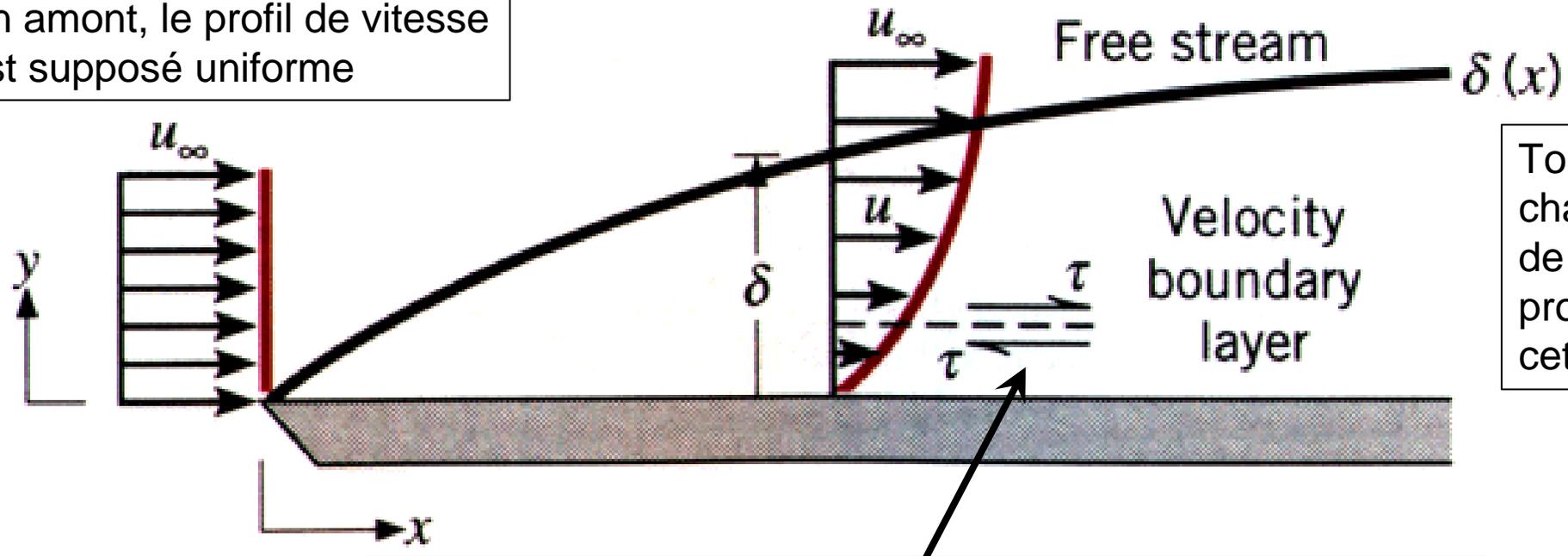
- Advection (mouvement global)
 - Contrairement à ce qui se produit dans un solide, dès les premières couches de fluide au-dessus de la paroi, ce dernier bouge. Ainsi, des molécules ayant été énergisées (chauffées) en paroi, sont remplacées par le mouvement du fluide, par celles qui ne sont pas encore à la température de la paroi.
 - Les nouvelles molécules en contact pariétale sont alors chauffées par **conduction** (diffusion) et une molécule qui quitte la paroi, se met en contact (donc conduction avec les autres) et les réchauffent alors qu'elles-mêmes se refroidissent.
 - Il se crée alors une couche limite dite thermique (p.13) dans laquelle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la paroi, la température du fluide se rapproche de celle qu'avait le fluide **avant** d'être en contact avec la surface.

Définitions

- Couche limite hydrodynamique

Dans cette zone, l'écoulement est considéré non perturbé par la présence d'un objet solide.

En amont, le profil de vitesse est supposé uniforme



Tout le changement de vitesse se produit dans cette zone

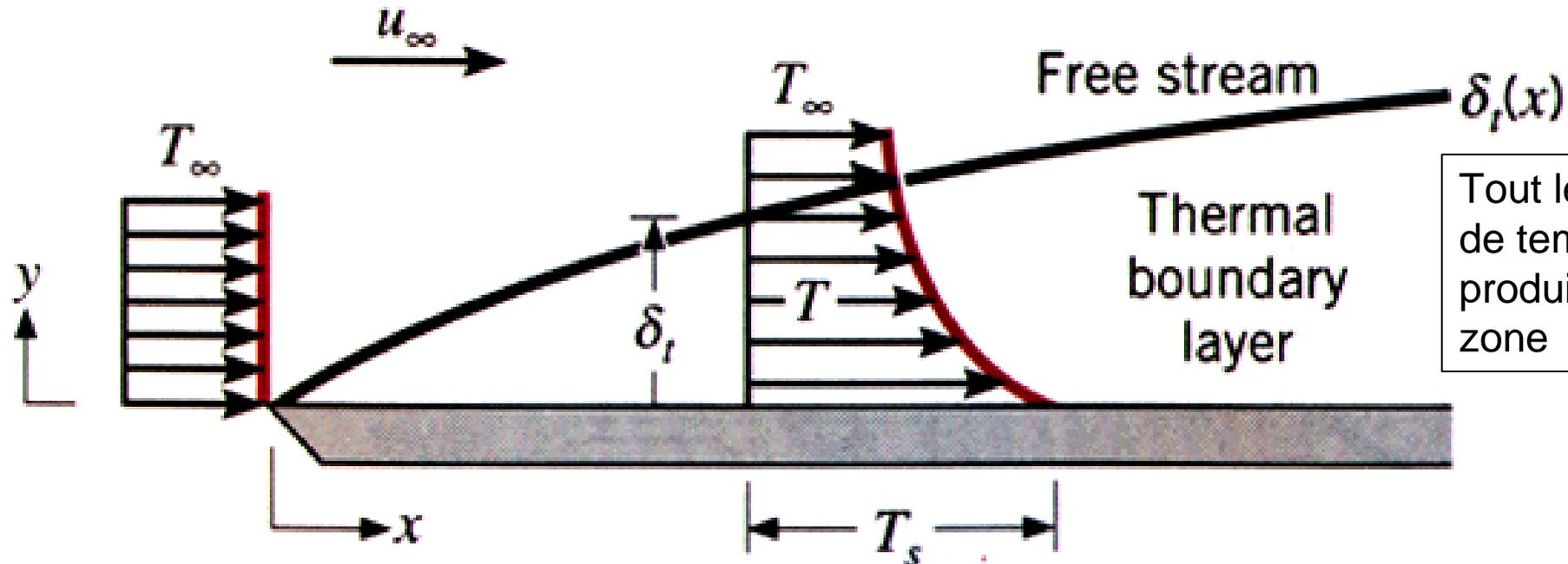
Ce sont des forces de cisaillement dans cette zone qui font varier la vitesse et induisent la friction pariétale.

Définitions

- Couche limite thermique

En amont, les profils de vitesse et de température sont supposés uniformes

Dans cette zone, la température de l'écoulement est considérée non perturbée par la présence d'un objet solide à une température différente.



Tout le changement de température se produit dans cette zone

Définitions

- ***Convection naturelle*** : due à la poussée d'Archimède, elle-même causée par la présence combinée d'un gradient de densité, résultant des variations de température, et d'une force de volume.
 - Les fluides chauds montent et les fluides froids descendent.
- ***Convection forcée*** : écoulement dû à un gradient de pression (pompes, ventilateurs)

Plan de la présentation

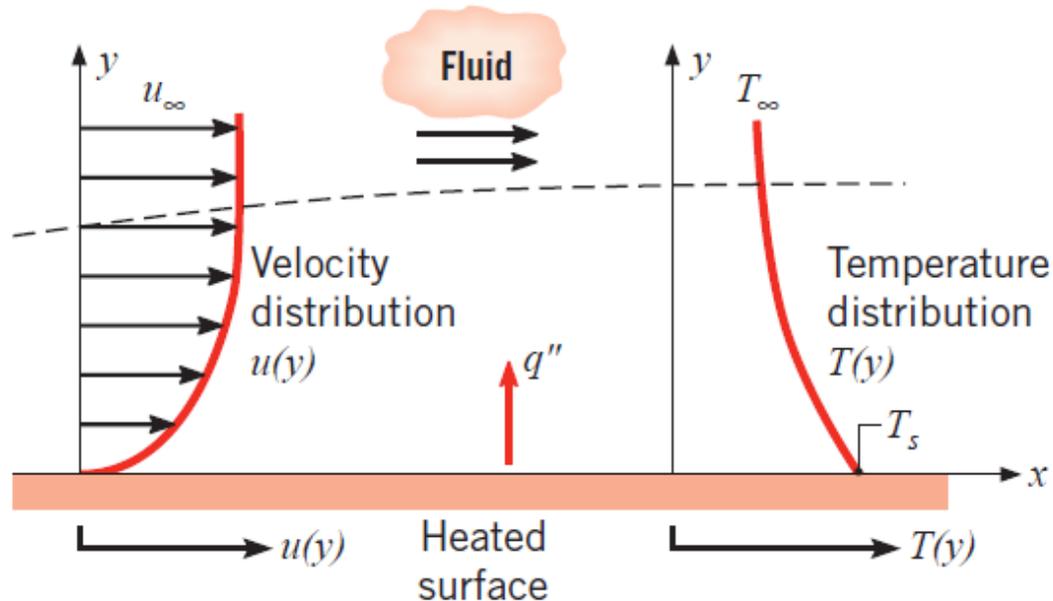
- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- ***Généralités***
- Calcul des pertes thermiques
- Analogie
- Exercice
- Conclusion

Généralités

- Comment qualifier et quantifier le transfert de la chaleur?
 - Le taux de transfert de chaleur par convection est proportionnel à la différence de températures T entre le **fluide** et une **paroi**, multiplié par la surface à travers laquelle se produit le transfert.
 - Le taux de transfert dépend du coefficient de transfert de chaleur, h , qui **n'est pas une propriété** physique mais un facteur qui dépend de nombreux paramètres (géométrie, nature de l'écoulement, propriétés, état de surface, etc.)

Généralités

- Flux de chaleur sortant d'une paroi de température T_s vers un fluide de température T_∞



$$q''_{conv} = h (T_s - T_\infty)$$

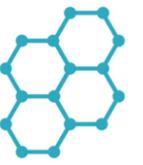
Généralités

- Les paramètres de la convection
 - Il existe de nombreuses caractéristiques sans dimension, nécessaires au calcul du coefficient de transfert h , qui expriment des **rapports physiques**. Parmi eux, on retrouve les nombres de :
 - Reynolds, Prandtl, Rayleigh, Nusselt, Schmidt, Jakob, Colburn, etc...
 - Ils sont issus de l'analyse théorique et expérimentale du phénomène et permettent d'obtenir la valeur de h par le biais de corrélations.
 - Ce cours ne demande pas de savoir déterminer le coefficient de transfert. Si requis ce paramètre sera donné ou spécifié via une relation très simplifiée.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Généralités
- ***Calcul des pertes thermiques***
- Analogie
- Exercice
- Conclusion

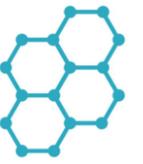
Question



ENR2020

- Quels sont les noms qui permettent de caractériser un écoulement en fonction de la valeur estimée du nombre de Reynolds?
 - Régime instationnaire
 - Régime laminaire
 - Régime stationnaire
 - Régime saturé
 - Régime turbulent

Question



ENR2020

- Quels sont les noms qui permettent de caractériser un écoulement en fonction de la valeur estimée du nombre de Reynolds?
 - Laminaire et turbulent.
 - On pourrait ajouter une zone dite "transitoire" alors que des instabilités se produisent dans la couche laminaire et que la couche limite n'est pas encore turbulente mais ce choix de réponse n'est pas dans ceux proposés ici.

Calcul des pertes thermiques

- Il existe des corrélations pour déterminer les pertes thermiques pour des :
 - Surfaces planes tels les murs d'un bâtiment, la surface d'un panneau solaire, etc.
 - Surfaces cylindriques tels les tubes d'un champ géothermique, d'une pompe à chaleur ou de n'importe quel système de chauffage à l'eau, etc.
 - Sphères comme dans le cas de lits de particules utilisées dans le stockage d'énergie solaire
 - Faisceaux tubulaires comme dans les échangeurs

Calcul des pertes thermiques

- Méthodologie de calcul
 1. Reconnaître la **géométrie** de l'écoulement.
 2. Déterminer la température de référence, T_f , pour le calcul des propriétés du fluide.
 3. Calculer la valeur du nombre de Reynolds, Re .
 4. Choisir la **corrélation** appropriée pour le nombre de Nusselt, Nu , en fonction des plages de validité
 5. Déterminer le coefficient de transfert de chaleur, h
 6. Calculer le flux de chaleur

Calcul des pertes thermiques

- Une fois le nombre de Nusselt, Nu , estimé, on calcule le coefficient de transfert convectif, h .

$$Nu_L \equiv \frac{hL}{k_f} = \left. \frac{dT^*}{dy^*} \right|_{y^*=0} = f(x^*, Re, Pr)$$

$$Nu_D \equiv \frac{hD}{k_f} = \left. \frac{dT^*}{dr^*} \right|_{r^*=0} = f(r^*, Re, Pr)$$

Corrélations !

- k_f est la conductivité thermique du fluide

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Reynolds (Re)

- Le nombre de Reynolds est défini comme un rapport des forces d'inertie du fluide par rapport aux forces dues à sa viscosité

- Force d'inertie

$$\rho * U_{\infty}^2 * A \longrightarrow \frac{kg}{m^3} * \frac{m^2}{s^2} * m^2 \longrightarrow kg * \frac{m}{s^2} \longrightarrow N$$

- Force visqueuse

$$\frac{\mu * U_{\infty} * A}{L} \longrightarrow \frac{N*s}{m^2} * \frac{m}{s} * \frac{1}{m} * m^2 \longrightarrow N$$

$$Re_L \equiv \frac{U_{\infty} * L}{\nu} = \frac{\rho * U_{\infty} * L}{\mu}$$

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Reynolds (Re)
 - Il est aussi utilisé pour caractériser l'écoulement
 - **Régime laminaire** (force visqueuse > force d'inertie)
 - Écoulement stable
 - **Régime turbulent** (force d'inertie > force visqueuse)
 - Instabilité
 - Tourbillon, Vortex

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Échange entre un cylindre et un écoulement d'air (convection externe)
 - Corrélation de **Hilpert** pour un écoulement externe autour d'un cylindre

$$\overline{Nu}_D \equiv \frac{\bar{h}D}{k} = C Re_D^m Pr^{1/3}$$

Re_D	C	m
0.4–4	0.989	0.330
4–40	0.911	0.385
40–4000	0.683	0.466
4000–40,000	0.193	0.618
40,000–400,000	0.027	0.805

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Échange entre un cylindre et un écoulement d'air (convection externe)
 - Corrélation de **Zukauskas** pour un écoulement externe autour d'un cylindre

$$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4}$$

$$\left[\begin{array}{l} 0.7 \lesssim Pr \lesssim 500 \\ 1 \lesssim Re_D \lesssim 10^6 \end{array} \right]$$

$$\text{Si } Pr \lesssim 10, n = 0,37$$

$$\text{Si } Pr \gtrsim 10, n = 0,36$$

Re_D	C	m
1–40	0.75	0.4
40–1000	0.51	0.5
10^3 – 2×10^5	0.26	0.6
2×10^5 – 10^6	0.076	0.7

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Échange entre un cylindre et un écoulement d'air (convection externe)
 - Corrélation de **Churchill-Bernstein** pour un écoulement externe autour d'un cylindre

$$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$$

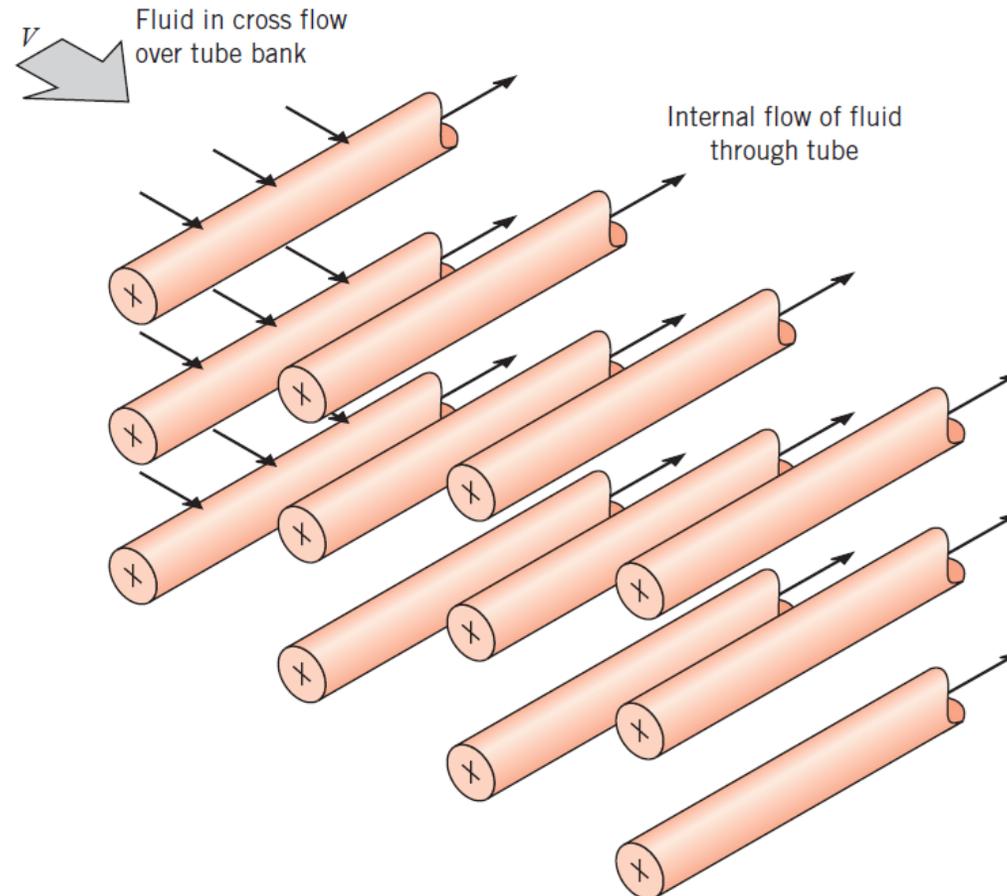
Pour tout $Re_D Pr \gtrsim 0,2$

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Échange entre un cylindre et un écoulement d'air (convection externe)
 - Pour les corrélations de Hilpert et de Churchill-Bernstein :
 - toutes les propriétés sont évaluées à la température du film, $T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2}$
 - Pour celle de Zukauskas :
 - toutes les propriétés sont évaluées à T_∞ , sauf Pr_s , qui est évaluée à T_s .

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)

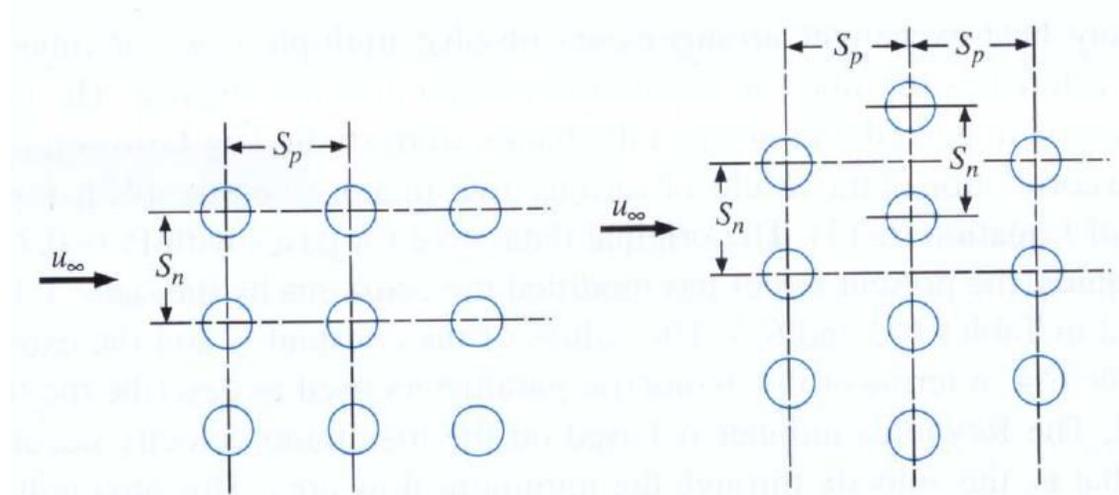


Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Rangées de cylindres (modified Grimson)

$$Nu_D = C * \left(\frac{U_\infty * d}{v_f} \right)^n * Pr_f^{\frac{1}{3}}$$

- Propriété évaluée à la température de la couche limite $T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$



Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Rangées de cylindres

$\frac{S_p}{d}$	$\frac{S_n}{d}$							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
	C	n	C	n	C	n	C	n
In line								
1.25	0.386	0.592	0.305	0.608	0.111	0.704	0.0703	0.752
1.5	0.407	0.586	0.278	0.620	0.112	0.702	0.0753	0.744
2.0	0.464	0.570	0.332	0.602	0.254	0.632	0.220	0.648
3.0	0.322	0.601	0.396	0.584	0.415	0.581	0.317	0.608
Staggered								
0.6	—	—	—	—	—	—	0.236	0.636
0.9	—	—	—	—	0.495	0.571	0.445	0.581
1.0	—	—	0.552	0.558	—	—	—	—
1.125	—	—	—	—	0.531	0.565	0.575	0.560
1.25	0.575	0.556	0.561	0.554	0.576	0.556	0.579	0.562
1.5	0.501	0.568	0.511	0.562	0.502	0.568	0.542	0.568
2.0	0.448	0.572	0.462	0.568	0.535	0.556	0.498	0.570
3.0	0.344	0.592	0.395	0.580	0.488	0.562	0.467	0.574

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Corrélation de **Dittus-Boelter** pour un écoulement turbulent entièrement développé (hydrodynamiquement et thermiquement) dans un tube circulaire lisse :

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$$

$n = 0,4$ en mode chauffage
 $n = 0,3$ en mode refroidissement

$$\left[\begin{array}{l} 0.6 \lesssim Pr \lesssim 160 \\ Re_D \gtrsim 10,000 \\ \frac{L}{D} \gtrsim 10 \end{array} \right]$$

Calcul des pertes thermiques

- Le nombre de Nusselt (Nu)
 - Pour un panneau solaire incliné jusqu'à $\beta = 60^\circ$, le coefficient de transfert convectif, h , entre une plaque absorbante et un couvercle de verre peut être estimé par (Hollands, 1976) :

$$Nu = 1 + 1.44 * \left[1 - \frac{1708 (\sin(1.8\beta))^{1.6}}{Ra \cos(\beta)} \right] * \max \left(0, 1 - \frac{1708}{Ra \cos(\beta)} \right) + \max \left(0, \left(\frac{Ra \cos(\beta)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)$$

Convection

- Le nombre de **Rayleigh**, est un nombre sans dimension, utilisé en convection naturelle, qui peut être estimé par:

$$Ra \equiv \frac{g\beta'}{\nu^2} (T_s - T_\infty) L^3 \times Pr = Gr \times Pr = \frac{g\beta'}{\alpha\nu} (T_s - T_\infty) L^3$$

- g : constante gravitationnelle
 - β' : coefficient d'expansion, $1/T$
 - Pr : Nombre de Prandtl
 - L : Distance entre la plaque absorbante et la plaque de verre, épaisseur
 - α : diffusivité thermique
 - ν : viscosité cinématique
- Lorsque les propriétés du fluide sont évaluées à $T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2}$

Convection

- Le nombre de Rayleigh fait partie de la grande famille des nombres sans dimension qui permettent de déterminer le rapport de force, de puissance, d'importance entre deux phénomènes physiques qui se produisent dans une situation donnée.
- Tous ces nombres sont utilisés afin de déterminer le coefficient de transfert thermique h qui lui-même permet d'estimer les échanges convectifs par l'équation de Newton, $q = h \times A \times (T_s - T_\infty)$.

Convection

- Le nombre de Rayleigh fait partie de la grande famille des nombres sans dimension qui permettent de déterminer le rapport de force, de puissance, d'importance entre deux phénomènes physiques qui se produisent dans une situation donnée.
- Tous ces nombres sont utilisés afin de déterminer le coefficient de transfert thermique h qui lui-même permet d'estimer les échanges convectifs par l'équation de Newton, $q = h \times A \times (T_s - T_\infty)$.
- Certains de ces nombres, avec leur définition, sont présentés dans un document facultatif disponible sur le site du cours en 2.4.

Calcul des pertes thermiques

- Valeurs typiques du coefficient de convection

Process	h (W/m ² · K)
Free convection	
Gases	2–25
Liquids	50–1000
Forced convection	
Gases	25–250
Liquids	100–20,000
Convection with phase change	
Boiling or condensation	2500–100,000

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Généralités
- Calcul des pertes thermiques
- ***Analogie***
- Exercice
- Conclusion

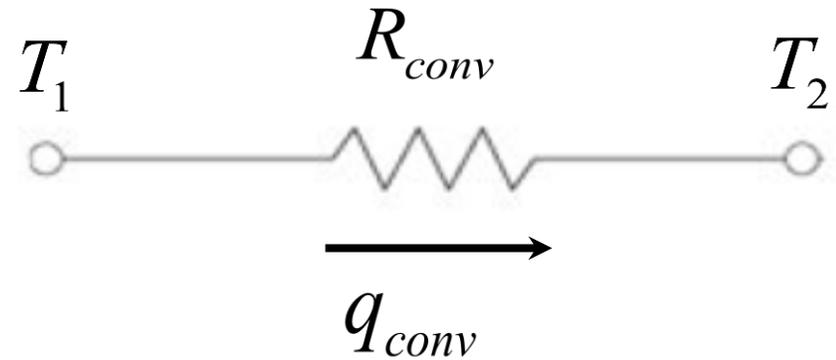
Analogie

- Notion de Résistance thermique

$$q_{conv} = hA(T_1 - T_2) = \frac{(T_1 - T_2)}{1/hA}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

$$q_{conv} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{conv}}$$



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Généralités
- Calcul des pertes thermiques
- Analogie
- ***Exercice***
- Conclusion

Exercice

You've experienced convection cooling if you've ever extended your hand out the window of a moving vehicle or into a flowing water stream. With the surface of your hand at a temperature of 30°C , determine the convection heat flux for (a) a vehicle speed of 35 km/h in air at -5°C with a convection coefficient of $40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ and (b) a velocity of 0.2 m/s in a water stream at 10°C with a convection coefficient of $900 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Which condition would *feel* colder? Contrast these results with a heat loss of approximately 30 W/m^2 under normal room conditions.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Loi de Fourier
- Généralités
- Analogies
- Exercice
- ***Conclusion***

Conclusion

- La convection est un phénomène qui apparaît naturellement lorsqu'il existe une **différence de température** dans un milieu.
- Il s'agit de la propagation de chaleur du chaud vers le froid, à **l'échelle moléculaire et macroscopique** à l'interface entre une paroi solide et un fluide en mouvement.
- Il est possible de **quantifier la convection**, soit la quantité d'énergie transférée par unité de temps, grâce à différentes corrélations en fonction de la géométrie de l'écoulement.



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions



Liste de questions à réflexion

- Quelle est la différence entre un coefficient local de transfert de chaleur par convection et un coefficient moyen? Quelles sont leurs unités?
- Quelles sont les formes de la loi de Newton du refroidissement pour un flux thermique et un taux de transfert thermique?
- Quelle est la loi de Fick?
- Quelles sont les couches limites de vitesse (hydrodynamique) et thermique? Sous quelles conditions se développent-elles?
- Quelles quantités changent avec l'emplacement dans une couche limite de vitesse? Une couche limite thermique?
- Pouvons-nous nous attendre à ce que le transfert de chaleur et de masse change avec la transition d'un écoulement laminaire à une couche limite turbulente? Si c'est le cas, comment?
- Quelles lois de la nature sont incarnées par les équations de transfert de convection?
- Quelle est la température DTLM et comment est-elle utilisée?

Liste de questions à réflexion

- Comment le nombre de Reynolds est-il défini? Quelle est son interprétation physique? Quel est le rôle joué par le nombre critique de Reynolds?
- Quelle est la définition du numéro Prandtl? Comment sa valeur affecte-t-elle la croissance relative de la couche limite de vitesse et de la couche limite thermiques pour l'écoulement laminaire sur une surface?
- Que sont les valeurs de température ambiante représentatives du nombre de Prandtl pour un métal liquide, un gaz, de l'eau et une huile?
- Quel est le coefficient de frottement? Le nombre de Nusselt? Pour un écoulement sur une géométrie prescrite, quels sont les paramètres indépendants qui déterminent les valeurs locales et moyennes de ces quantités?
- Quelle est la base physique de l'effet de refroidissement par évaporation? Avez-vous déjà expérimenté l'effet?
- Quels paramètres importants de la couche limite sont liés par l'analogie de Reynolds?
- Quelles caractéristiques physiques distinguent un écoulement turbulent d'un écoulement laminaire?

Encore ici, cette présentation ne permet pas de répondre explicitement à toutes ces questions.