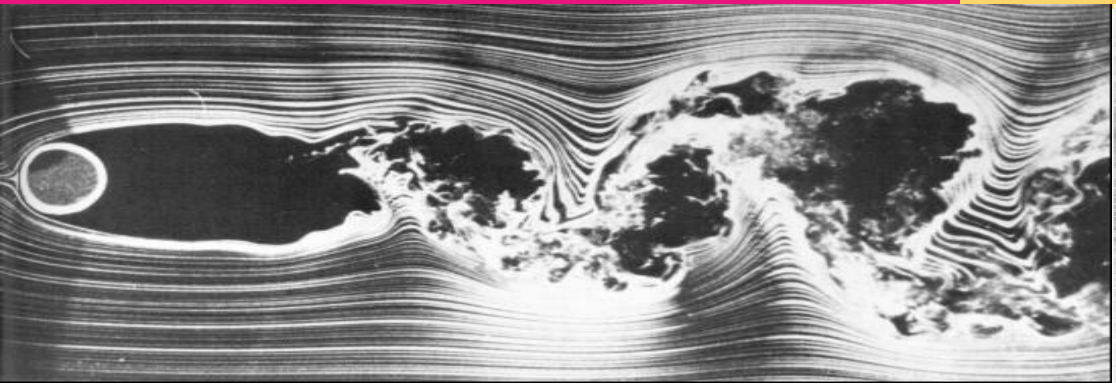
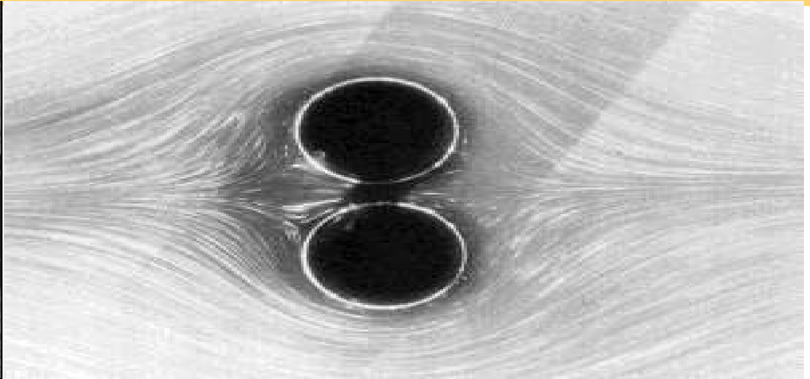
 

Transfert de chaleur par Convection

Séances n°5-6

Introduction / Caractérisation des écoulements / Caractérisation des échanges / Lois d’échange en convection

Plan des séances n°5-6

- Echange par convection
  - Introduction
  - Caractérisation des écoulements
  - Caractérisation des échanges
  - Lois d’échange en convection

- Exercices d’application
  - Echanges convectifs fluide-plaque
  - Ecoulement dans une canalisation
  - Refroidissement d’un barreau métallique

Rappel

- Quels sont les trois modes de transfert thermique?

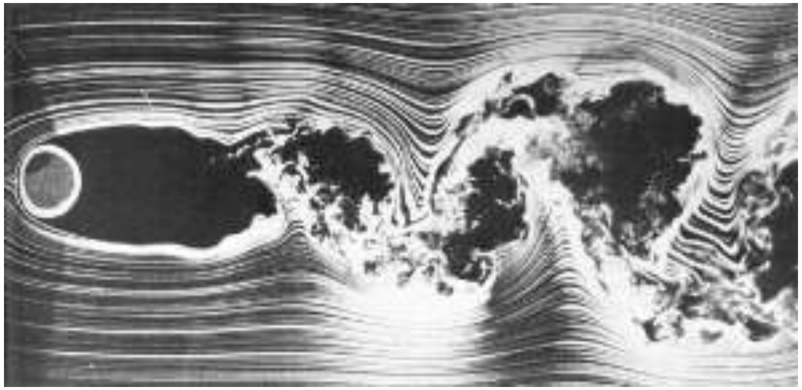
Qu’est-ce que la convection?

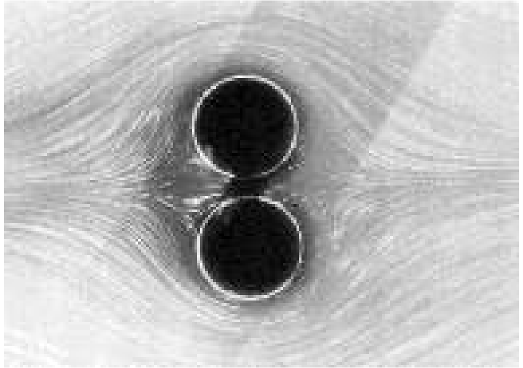
- Echange de chaleur par convection:
  - Lorsqu’une paroi solide est en contact avec un fluide à une température différente
- Le régime de conduction proche entre les molécules du solide et celles du fluide entraîne une variation de la masse volumique du fluide
  - → Poussée d’Archimède
  - → Mise en mouvement du fluide
  - → Mouvement dit de « Convection naturelle »
  - → si le fluide est mis en mouvement par un « moteur » et est dirigé vers la paroi solide, la convection est dite forcée

Ecoulement des fluides
Régime laminaire/turbulent

A retenir!

- Expérimentalement on montre qu'un fluide peut présenter plusieurs aspects qualitativement très différents
  - Ecoulement laminaire: régulier, absence totale de brassage, symétrie
  - Ecoulement turbulent: fort taux de brassage, aucune symétrie
  - Régime transitoire: entre les deux zones: très mal connu





Nombres à retenir

A retenir!

- Nombre de Reynolds caractérise l'écoulement en convection forcée :

$$Re = \frac{U.D}{\nu}$$

- Nombre de Prandlt , capacité d'un fluide à transporter le mouvement et la chaleur (intrinsèque au fluide)

$$Pr = \frac{\nu}{a_f}$$

- Nombre de Grashoff, facilité d'un fluide à se mettre en mouvement

$$Gr = \frac{g.\beta.\delta T.D^3}{\nu^2}$$

- Nombre de Rayleigh, caractérise l'écoulement en convection naturelle

$$Ra = \frac{g.\beta.\delta T.D^3}{a_f.\nu} = Pr.Gr$$

U: vitesse du fluide, g: gravité, β: coefficient de dilatation, δT: différence de température, D: grandeur caractéristique, ν: viscosité, a_f: diffusivité thermique du fluide (λ/ρc)

Loi de Newton, Nombre de Nusselt

$$d^2Q = h_{cl}.\left(T_p - T_f\right).dS.dt$$

Avec:

	Tp	température de surface de la paroi,
	Tf	température caractéristique du fluide,
	h_{cl}	coefficient d'échange convectif local ou coefficient local de Newton. Son unité est le $W.m^{-2}.°C^{-1}$.

h_{cl} dépend notamment :

- ✓ des températures du fluide et du solide,
- ✓ du régime de l'écoulement,
- ✓ de la nature du fluide,
- ✓ des géométries locales (aspect granuleux ou lisse du matériau) et globale (approvisionnement et évacuation de l'air facilité).

Coefficient d'échange convectif global

$$\Delta Q = h_c.\left(T_p - T_f\right).S.\Delta t$$
$$\Phi = h_c.\left(T_p - T_f\right).S$$

Dans cette formulation, les températures Tp et Tf sont moyennées.

On définit le nombre de **Nussel**: rapport des grandeurs thermophysiques convectives aux grandeurs conductives du fluide.

$$\boldsymbol{Nu = \frac{h_c.D}{\lambda_f}}$$

Les lois d'échange en convection

- La convection naturelle:
  - C'est le nombre de Rayleigh qui détermine si un écoulement est laminaire ou turbulent limite Ra≈10^{10}

$$Nu = f(Pr, Gr) = c(Pr.Gr)^n$$

- La convection forcée
  - C'est le nombre de Reynolds qui le détermine la transition (dépend de la géométrie générale)

$$Nu = f(Pr, Re)$$

Exercices d’application

Échanges convectifs fluide - plaque

A. Un fluide s'écoule en convection forcée parallèlement à une plaque plane de dimensions L=0,2 m (sens de l' écoulement) et l=0,1 m.
L'écart de température entre le fluide et la plaque est de + 20 °C.
La vitesse du fluide est égale à 0,1 m.s^{-1}.
La dimension L sera prise comme distance caractéristique.

B. Conditions d'échange : cf poly § 5
Propriétés thermo-physiques : cf poly § 6

C. Déterminez le régime d'écoulement et calculez R_e, P_r, N_u, h_c ainsi que le flux échangé sur l'ensemble de la plaque dans le cas où le fluide est :

1. de l'air,
2. de l'eau.

Échanges convectifs fluide - plaque

A. Régime laminaire si Re < 3.10^5

$$Nu = 0,628.Pr^{0,33}Re^{0,5}$$

B. Régime turbulent si Re > 5.10^5

$$Nu = 0,035.Pr^{0,33}Re^{0,8}$$

C. Données thermophysiques : cf §6 poly (considérées comme stables)

Échanges convectifs fluide - plaque

	Eau	Air
Pr	6,945	0,737
Re	19 900	1274
Régime	Laminaire	Laminaire
Nu	167,9	20,1
hc	507,2	2,5
Flux échangé [W]	202,9	1,0

Écoulement dans une canalisation

A. Une canalisation rectiligne de section circulaire est parcourue par un écoulement d'eau en convection forcée. L'écart de température entre l'eau et la canalisation, supposé constant, est de 20 °C. La vitesse de l'eau est égale à 1 $m.s^{-1}$. Le diamètre D, égal à 10 cm, sera pris comme distance caractéristique.

B. Conditions d'échange : cf poly § 5
(flux de paroi supposé constant)
Propriétés thermo-physiques : cf poly § 6

C. Déterminez le régime d'écoulement et calculez R_e, P_r, N_u, h_c ainsi que le flux échangé par unité de longueur de canalisation.

D. Conduisez la même étude dans le cas d'un diamètre D'=1 mm (hypothèse de flux de paroi constant)

Écoulement dans une canalisation

A. Re = 99 502 : régime turbulent. Pr = 6,945

$$Nu=0,023Pr^{0,4}Re^{0,8}$$

B. Nu = 497,4

C. hc = 3 004 $W.m^{-2}.K^{-1}$

D. Flux échangé par unité de longueur : 18,9 $kW.m^{-1}$

E. Re = 995 : régime laminaire

F. Nu = 4,36

G. hc = 2 633

H. Flux échangé par unité de longueur : 165,4 $W.m^{-1}$

Refroidissement d'un barreau métallique

A. Un barreau métallique (supposé de longueur infinie) est porté à une température uniforme T_0 et se refroidit uniformément par échanges aérauliques avec l'ambiance à température T_a (flux perpendiculaire au barreau). On cherche à déterminer le temps t_1 au bout duquel le barreau est descendu à température T_1.

B. Le barreau se refroidit sous l'effet de la convection forcée seule. Conditions d'échange : cf poly § 5

C. Le barreau se refroidit sous l'effet de la convection naturelle seule. Conditions d' échange : cf poly § 4 (régime laminaire)

Refroidissement d'un barreau métallique

A. Données à fournir à la demande...

B. Barreau :

1. Diamètre : D = 1 cm (distance caractéristique)
2. Chaleur massique : C = 255 J/kg.°C
3. Masse linéique : M = 0,7 kg/m
4. Température initiale : T_0 = 500 °C
5. Température finale : T_1 = 35 °C

C. Air :

1. Vitesse (convection forcée) : v = 2 m/s
2. Température : T_a = 27 °C
3. Caractéristiques : cf poly § 6
4. Coefficient de dilatation isobare (convection naturelle) : $\beta = 1/T_a$

Refroidissement d'un barreau métallique

A. Équation de refroidissement : $-MC\frac{dT}{dt}=h.\pi D.(T-T_a)$

B. Convection forcée :

Re = 1273,9 cf § 5 : c = 0,615 et n = 0,466 Nu = 17,2

hc = 43,2 W/m².°C

$$-\frac{MC}{h.\pi D}.\frac{dT}{(T-T_a)}=dt \qquad -\int_{T_0}^{T_1}\frac{MC}{h.\pi D}.\frac{dT}{(T-T_a)}=\int_0^{t_1}dt \qquad -\frac{MC}{h.\pi D}.\ln\left(\frac{T_1-T_a}{T_0-T_a}\right)=t_1$$

t_1 = 537 s = 8 min 57 s

Refroidissement d'un barreau métallique

A. Convection naturelle (§ 4) :

Pr = 0,737

$$Gr = \frac{g\beta D^3 \Delta T}{\nu^2} = \frac{g\beta D^3 (T-T_a)}{\nu^2}$$

$$Nu = 0{,}53.Pr^{1/4}\left(\frac{g\beta D^3 (T-T_a)}{\nu^2}\right)^{1/4} = 0{,}53.\left(\frac{g\beta D^3 Pr}{\nu^2}\right)^{1/4}(T-T_a)^{1/4}$$

$$h_c = 0{,}53.\frac{\lambda}{D}\left(\frac{g\beta D^3 Pr}{\nu^2}\right)^{1/4}(T-T_a)^{1/4}$$

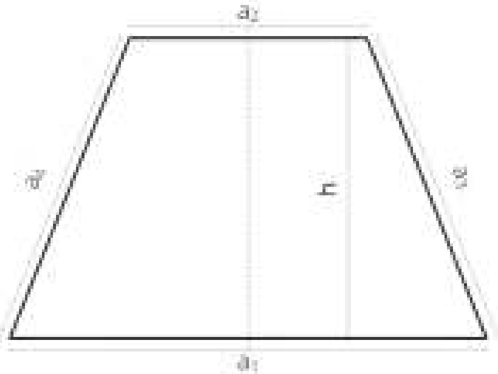
$$\int_0^{t_1} dt = -\frac{MC}{\pi D}\frac{D}{0{,}53.\lambda}\left(\frac{\nu^2}{g\beta D^3 Pr}\right)^{1/4}\int_{T_0}^{T_1}\frac{dT}{(T-T_a)^{5/4}}$$

$$t_1 = -\frac{MC}{\pi D}\frac{D}{0{,}53\lambda}\left(\frac{\nu^2}{g\beta D^3 P_r}\right)^{1/4} 4\left(\frac{1}{(T_0 - T_a)^{1/4}} - \frac{1}{(T_1 - T_a)^{1/4}}\right)$$

t_1 = 2043 s = 34 min 3 s

Canalisation trapézoïdale

II. Une canalisation de section trapézoïdale (cf schéma ci-contre) est parcourue par un écoulement interne d'eau chaude. Les deux surfaces S_1 et S_2 sont parallèles et ont le même plan de symétrie On a : $a_1 = 0{,}4$ m, $a_2 = 0{,}2$ m, h = 0,25 m. Les conditions d'échange sont données par :



$$N_u = 0{,}0214\left(R_e^{0{,}8} - 100\right)P_r^{0{,}4} \quad D_h = 4\frac{A}{P} \qquad P = \sum_i a_i$$

La distance caractéristique est prise égale au diamètre hydraulique D_h calculé en fonction de A, section de passage du fluide, et de P, périmètre mouillé. L'eau circule à la vitesse $v = 0{,}3\ m.s^{-1}$.

Le régime permanent est établi. Les caractéristiques du fluide sont : Conductivité thermique : $0{,}597\ W.m^{-1}.K^{-1}$
Viscosité cinématique : $0{,}101.10^{-5}\ m^2.s^{-1}$ Diffusivité thermique : $14{,}3.10^{-8}\ m^2.s^{-1}$

II.1. Calculez les nombres de Reynolds, de Prandtl et de Nusselt. Calculez le coefficient d'échange par convection h_{c_eau}.

II.2. La canalisation se refroidit sous l'effet d'un flux d'air qui s'écoule perpendiculairement à l'axe de la canalisation, avec une vitesse de $3\ m.s^{-1}$. L'échange est supposé se faire sur l'ensemble du périmètre de la canalisation. La distance caractéristique est prise égale au diamètre hydraulique D_h. Les conditions d'échange sont données par :

$$N_u = 0{,}16.R_e^{0{,}64}.P_r^{0{,}35}$$

Les caractéristiques du fluide sont : Conductivité thermique : $0{,}0262\ W.m^{-1}.K^{-1}$
Viscosité cinématique : $1{,}57.10^{-5}\ m^2.s^{-1}$ Diffusivité thermique : $2{,}22.10^{-5}\ m^2.s^{-1}$

Calculez les nombres de Reynolds, de Prandtl et de Nusselt, et le coefficient d'échange par convection h_{c_air}.

Canalisation trapézoïdale

- 1.
- P = 1,139, A=0,075 => Dh=0.264
- Re= 78267,3   Pr=7,0.63 => Nu= 379,8
- hc_eau=860,5 W/m²/°C
- 2.
- Re=50350.3   Pr=0.707   Nu=144.8
- => hc=14,4

Canalisation trapézoïdale

II.3. On note x la distance depuis l'entrée de la canalisation. La température de l'eau T_{eau} est considérée uniforme à une abscisse x et variant donc uniquement selon la distance x : $T_{eau}(x)$. En exprimant sur une longueur dx le flux de chaleur cédé par l'eau à la canalisation et le flux de chaleur cédé par la canalisation à l'air, déterminez une relation exprimant la température T_{canal} (supposée uniforme à une abscisse x) en fonction de la température de l'eau T_{eau} et de la température de l'air T_{air}.

On considérera l'épaisseur de la canalisation comme négligeable et donc indifféremment les dimensions a_i comme dimensions intérieures ou dimensions extérieures. On néglige de même la capacité calorifique et la résistance thermique de la canalisation.

II.4. La température de l'air est supposée constante : T_{air} = 12 °C.

À partir du bilan énergétique sur une longueur dx, déterminez une équation différentielle de la température de l'eau.

Calculez la distance L de l'entrée à laquelle la température de l'eau a diminué de 1 °C ?

Les caractéristiques du fluide sont :

Masse volumique : 1000 $kg.m^{-3}$ Chaleur massique : 4 185 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$ Température à l'entrée : 47 °C

Canalisation trapézoïdale

- 3
- $\Phi_{eau \to canal} = h_{eau} P dx \left(T_{eau} - T_{canal}\right)$
- $\Phi_{canal \to air} = h_{air} P dx \left(T_{canal} - T_{air}\right)$
- Équilibre instantané: le canal est négligé
- $h_{eau} P dx \left(T_{eau} - T_{canal}\right) = h_{air} P dx \left(T_{canal} - T_{air}\right)$
- $Tcanal = \frac{heau * Teau + hair * Tair}{heau + hair}$
- 4
- $h_{eau} P dx \left(T_{eau}(x) - \frac{heau * Teau(x) + hair * Tair}{heau + hair}\right) = -\rho cv A dTeau$
- $\frac{dTeau}{Teau - Tair} = -\frac{heau.hair}{heau + hair} \frac{P}{\rho cv A} dx$
- L=169,3m