LEÇON 8:CONVECTION NATURELLE

Transferts convectifs naturels et mixtes

INTRODUCTION

- Convection naturelle: chaque fois qu'un corps solide se trouve dans un fluide à température différente
  - Différences de température fluide/solide

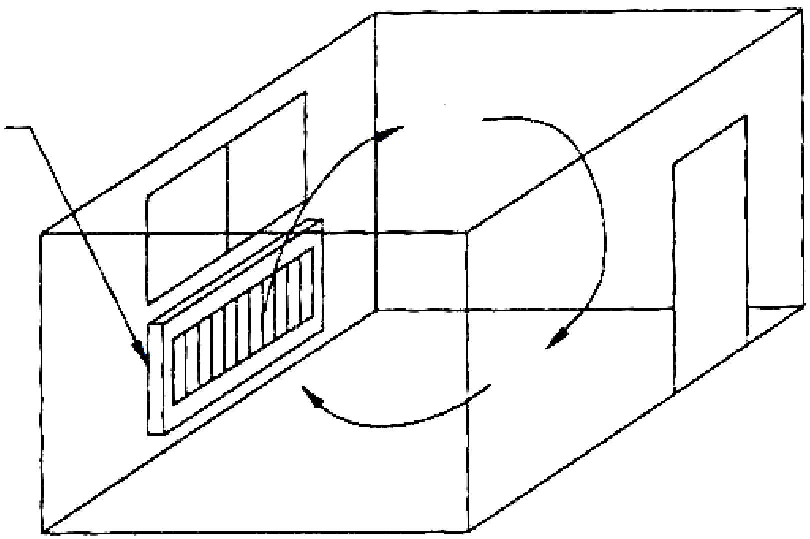
    $\Rightarrow$transfert de chaleur

    $\Rightarrow$ variations locales de masse volumique du fluide

    $\Rightarrow$écoulement descendant ou ascendant
- Le mouvement prend naissance au cœur même du processus de transfert ($\neq$ convection forcée)

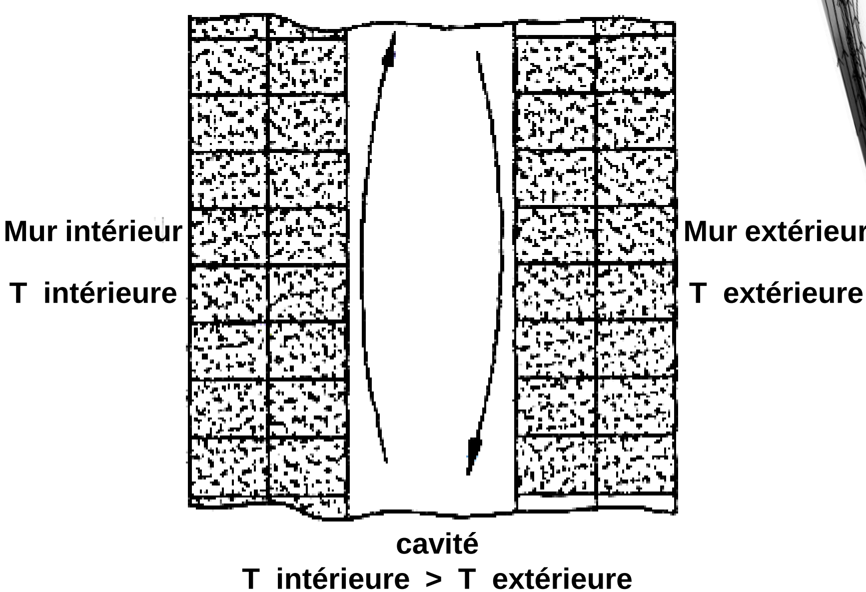
INTRODUCTION

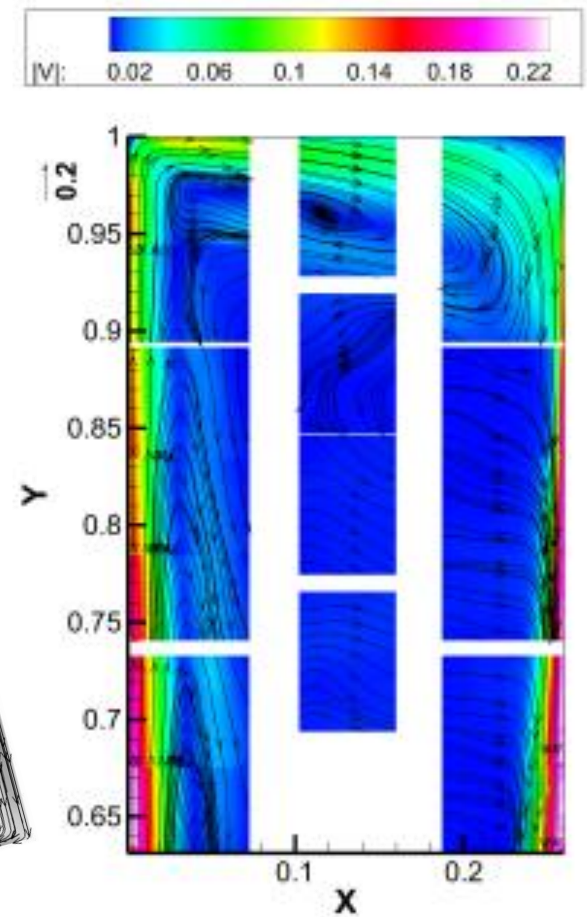
- Convection naturelle externe:
  - Chauffage



INTRODUCTION

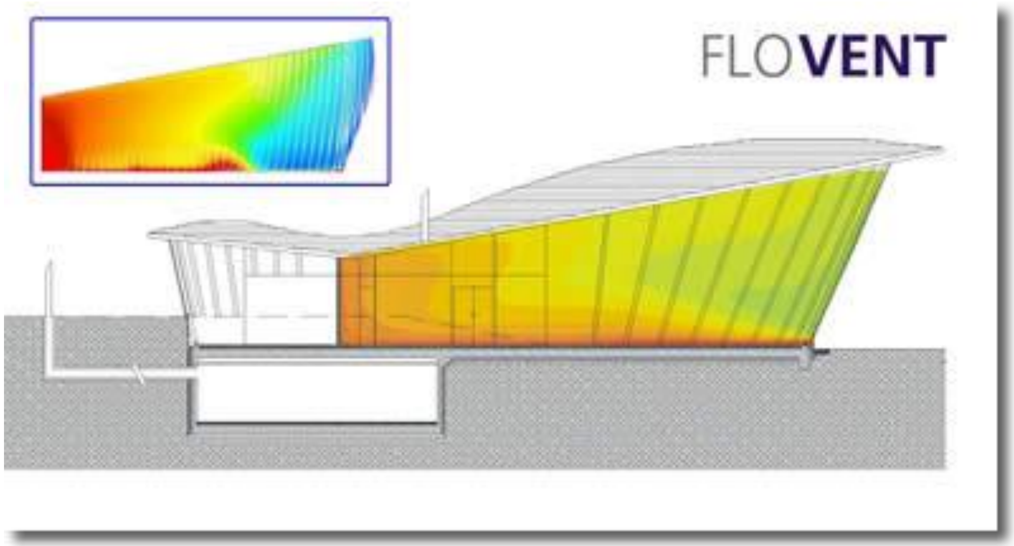
- Convection naturelle interne:
  - Convection en cavité

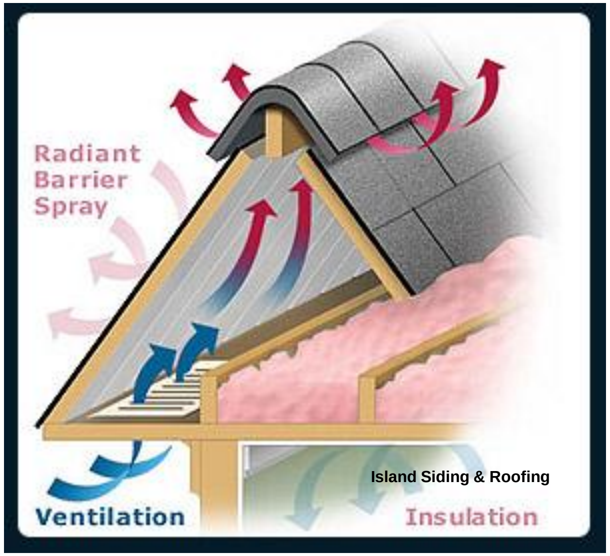




INTRODUCTION

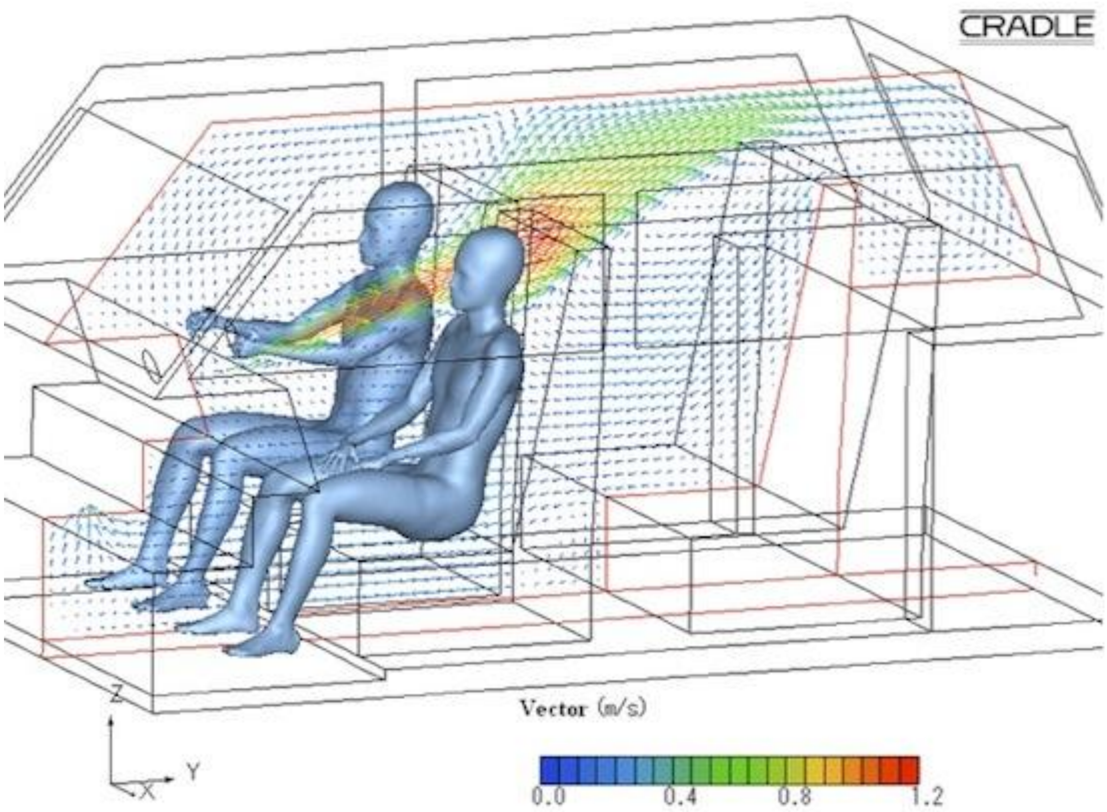
- Exemples:
  - Bâtiment:





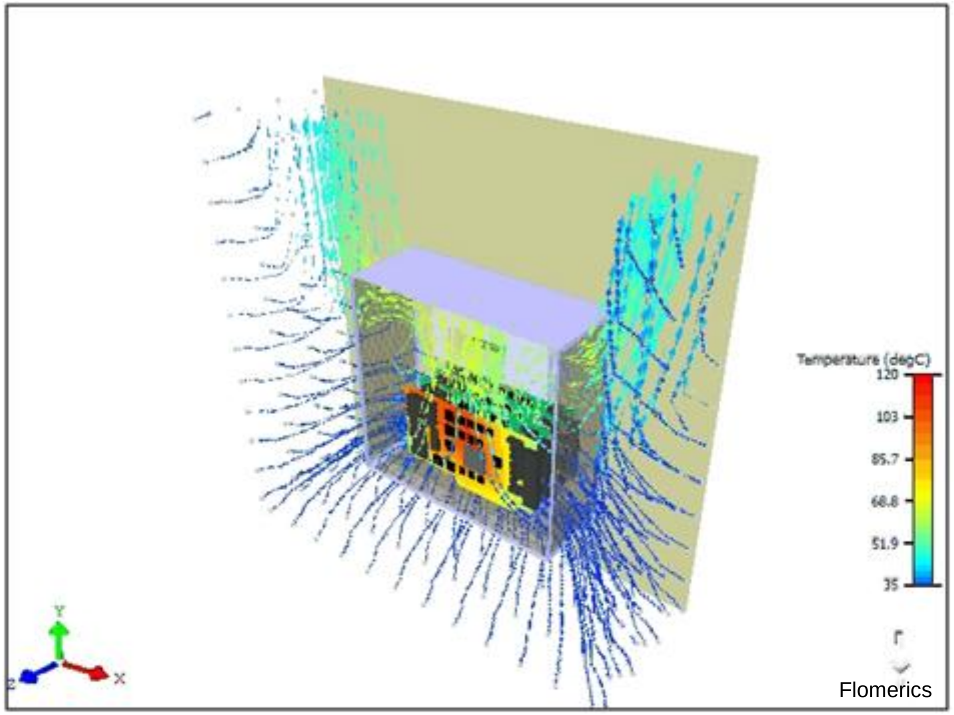
INTRODUCTION

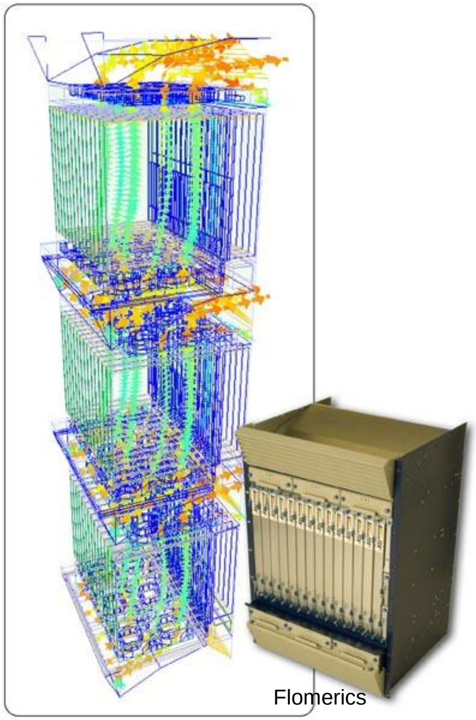
- Exemples:
  - Thermique de l'homme



INTRODUCTION

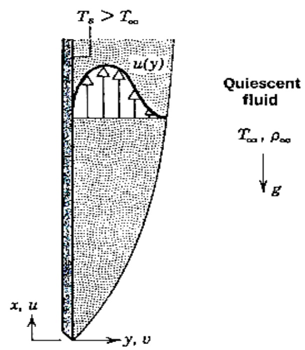
- Exemples:
  - Electronique



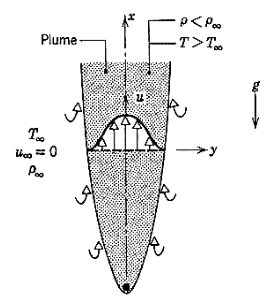


INTRODUCTION

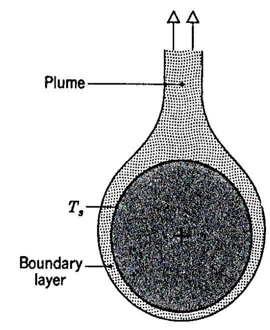
- Exemples:



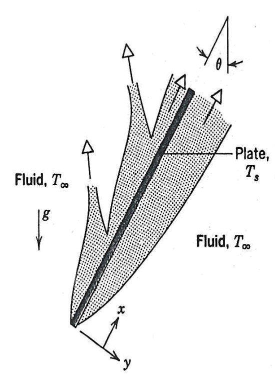
Plaque plane verticale



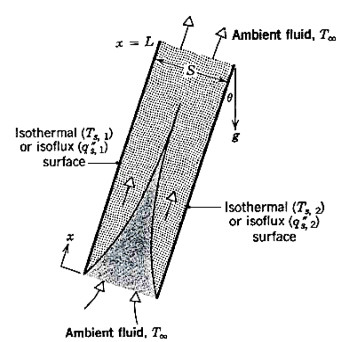
Panache au dessus d'un cylindre (à grande distance)



Panache en dessus d'un cylindre (à courte distance)



Plaque plane inclinée



Canal

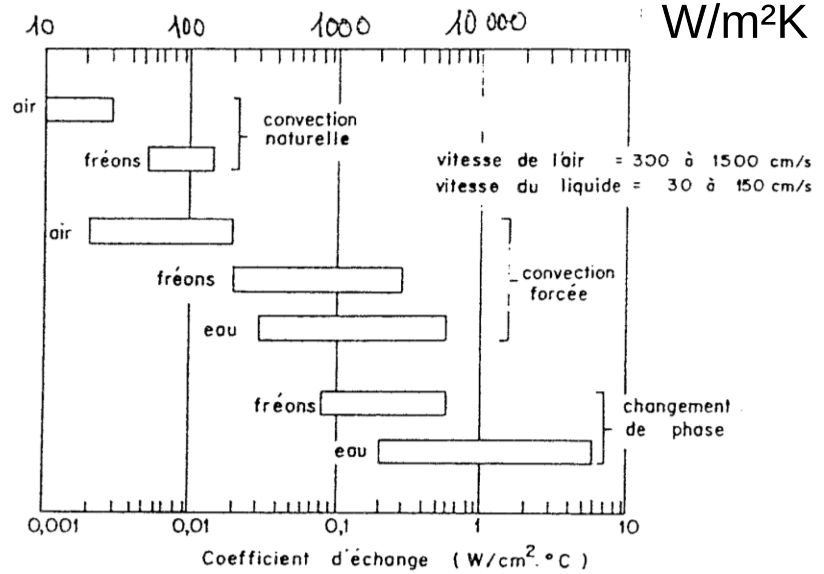
INTRODUCTION

- Origin du mouvement:
  - Force de volume, proportionnelle à la masse volumique
    - En général gravitationnelle
    - Effets centrifuges (machines tournantes)
    - Effets de Coriolis (mouvements atmosphériques et ou océaniques)
  - Présence d'un gradient de masse volumique
    - En général causé par la dilatation du gaz à proximité de la source chaude
    - Gradients de concentration
    - Combinaison des 2

INTRODUCTION

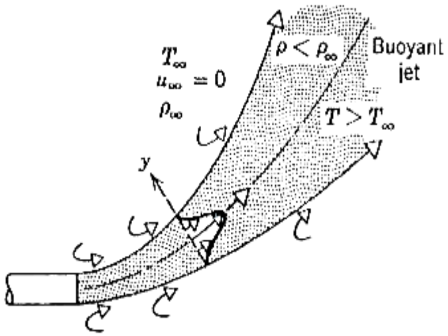
- Convection naturelle:
  - En général, vitesses associées à la convection naturelle nettement plus faibles que celles en convection forcée
  - Coefficients d'échange convectifs généralement plus faibles

W/m²K



INTRODUCTION

- Convection naturelle:
  - Combinaison possible avec la convection forcée: convection mixte



Jet libre en convection mixte

INTRODUCTION

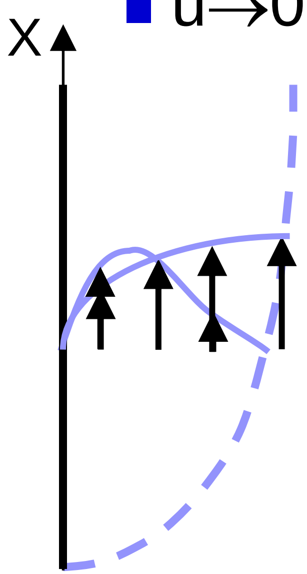
- Phénoménologie de la plaque plane verticale
- Mise en équation pour la plaque plane verticale
- Ordres de grandeur
- Résolution par la méthode des similitudes
- Effet de la turbulence
- Conditions en flux imposé
- Autres géométries
- La convection mixte

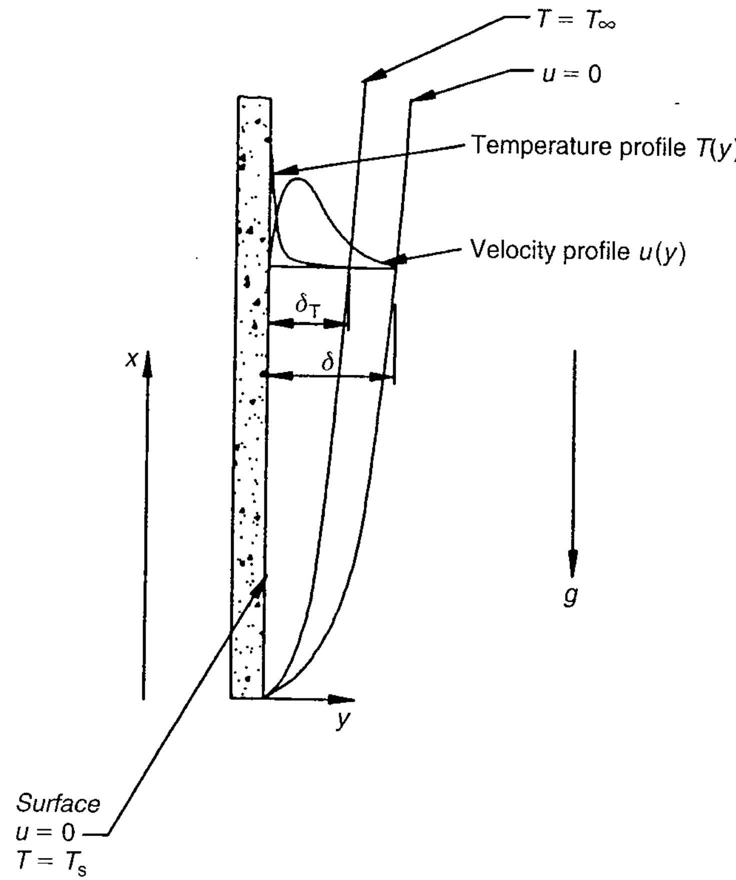
PHÉNOMÉNOLOGIE DE LA PLAQUE PLANE

- Hypothèses:
  - Convection naturelle
  - Écoulement laminaire
  - Stationnaire
  - Température de la plaque imposée

PHÉNOMÉNOLOGIE DE LA PLAQUE PLANE

- Plaque plane dans un fluide au repos:
  - Profil de température semblable à celui de la convection forcée
  - Profil de vitesse différent
    - u=0 pour y=0
    - u→0 pour y →∞

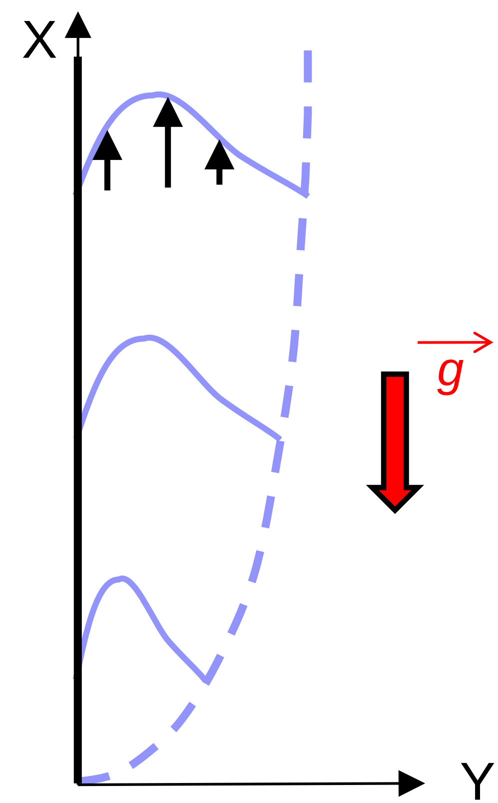




MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

- Mêmes équations que pour la convection forcée
  - 2D, stationnaire, incompressible, propriétés uniformes
- Terme particulier:
  - Forces de flottabilité
    - Forces de pression
    - Forces de gravité: $F_x = -\rho g$
  - Variation de la masse volumique

Incompatible ?



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{F_x}{\rho}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \frac{F_y}{\rho}$$

MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

- Solution: hypothèse de Boussinesq:
  - La masse volumique est considérée comme constante sauf dans le terme de pesanteur: $-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}-g$
  - Alors $\rho=\rho_\infty-\rho\beta\left(T-T_\infty\right)$
- Explication:
  - Hypothèse 1: petits écarts de pression et de température
    - $T \to T', p \to p'$
  - $\Rightarrow$variations linéaires de la masse volumique:
    - $\rho=\bar{\rho}-\rho\beta T'+\rho\alpha p'$
      - $\beta = coefficient\ de\ dilatation = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial T}\Big)_\rho$
      - $\alpha = coefficient\ de\ compressibilité = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial p}\Big)_T$

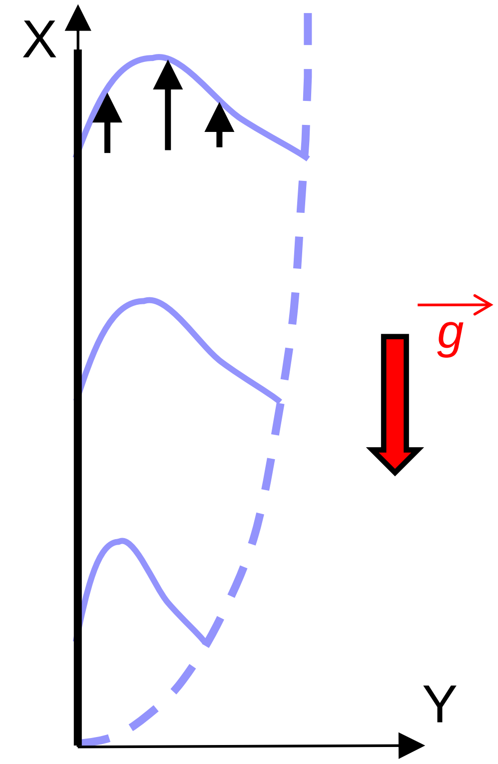
MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

- Solution: hypothèse de Boussinesq:
  - Hypothèse 2: variations de masse volumique dues à la pression négligeables devant celles dues à la température (incompressibilité)
    - $|\alpha p'| << |\beta T'|$
    - Validation:
      - Pour une plaque de 1m de haut en contact avec de l'air:
        - $\alpha \approx 10^{-5} \Rightarrow \alpha p' \approx 10^{-4}$
        - $\beta \approx 10^{-3} \Rightarrow \beta\, T' \approx 10^{-3}.\Delta T$
      - Si $\Delta T > 10°C \Rightarrow$ 2 ordres de grandeur de différence

MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

- Equation de continuité:
  - Pas de changement

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

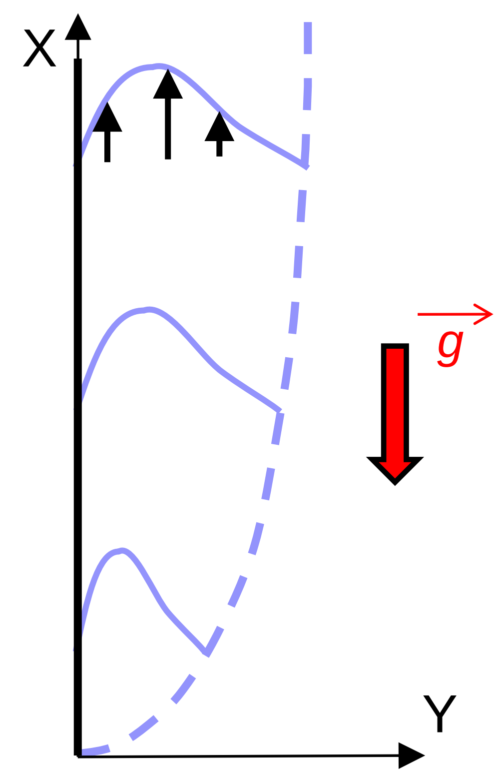


MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

- Equations de quantité de mouvement:
  - Suivant X:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}-g$$

  - Suivant Y:
    - Négligeable au 1er ordre
    - $\frac{\partial p}{\partial y}\approx 0$ $\Rightarrow$ Pour un X donné, p=cte=pression hors de la couche limite
    - Or à l'extérieur de la couche limite: u=v=0
    - $\Rightarrow \frac{\partial p}{\partial x}=-\rho_\infty g$

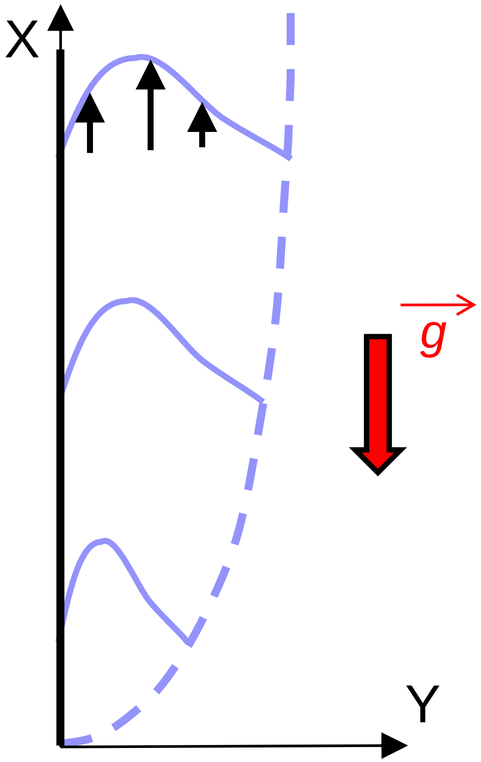


MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

- Equations de quantité de mouvement:
  - Suivant X:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\boxed{\frac{g}{\rho}(\rho_\infty-\rho)}+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Terme de flottabilité
(ou de pesanteur)



  - Hypothèse de Boussinesq:
    - $\rho=\rho_\infty-\rho\beta(T-T_\infty)$

$$\Rightarrow \rho_\infty-\rho=\rho\beta(T-T_\infty)$$

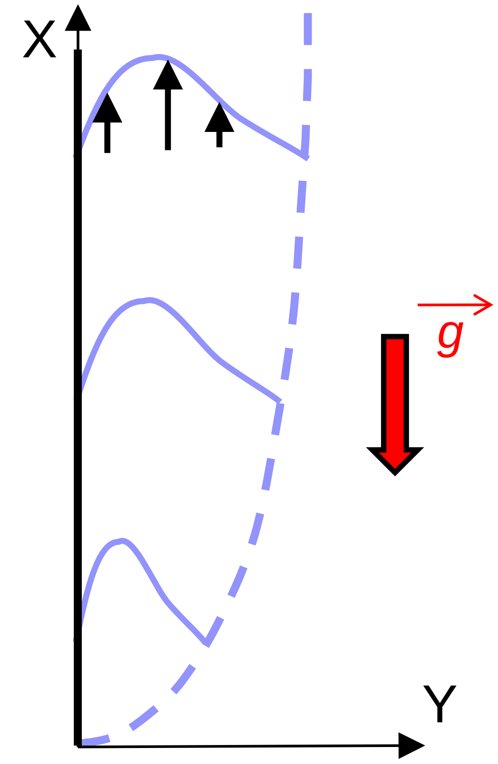
  - Donc équation suivant X:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\beta g(T-T_\infty)+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

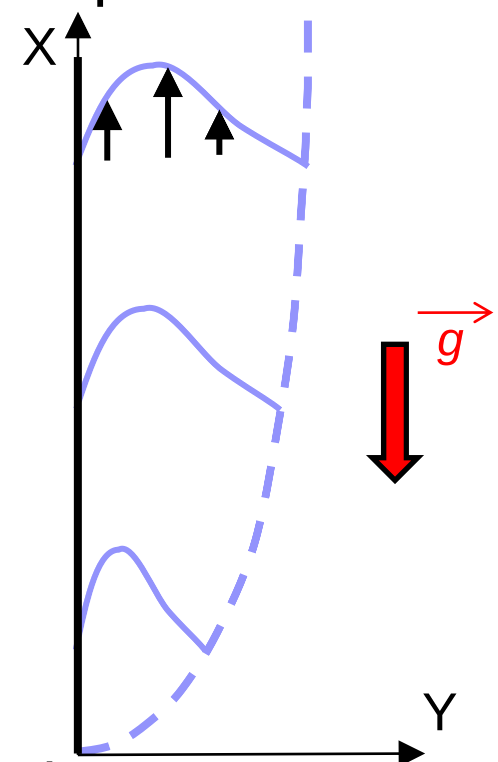
- Equations de l'énergie:
  - Pas de dissipation visqueuse ou due à la pression ni de flux volumique
  - Pas de changement:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$



MISE EN ÉQUATION POUR LA PLAQUE PLANE VERTICALE

- Equations :
  - 2D, stationnaire, incompressible, propriétés uniformes, Pas de dissipation visqueuse ou due à la pression ni de flux volumique



$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\beta g\left(T-T_\infty\right)+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

  - $\Rightarrow$Couplage des équations de quantité de mouvement et de l’énergie

ORDRES DE GRANDEUR

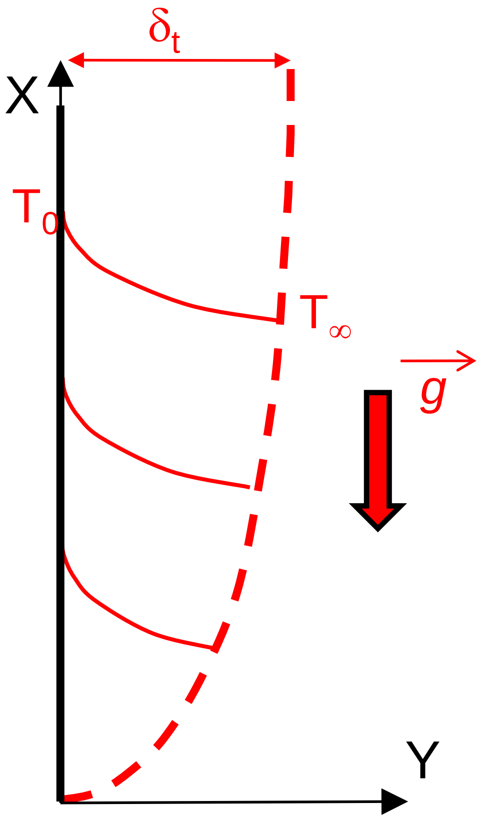
- Au sein de la couche limite thermique:

$$x \approx L$$

$$y \approx \delta_t$$

$$T \approx (T_0 - T_\infty) = \Delta T$$

$$u \approx ?$$



  - Equation de continuité:

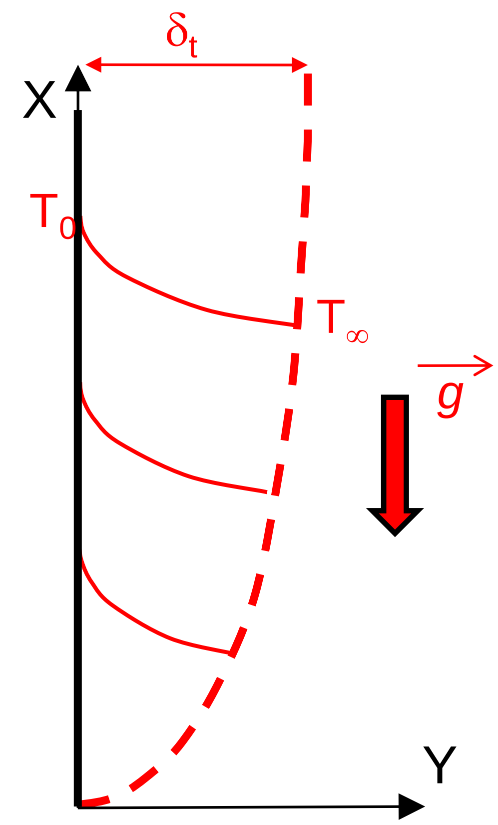
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{u}{L} \approx \frac{v}{\delta_t}$$

ORDRES DE GRANDEUR

- Au sein de la couche limite thermique:
  - Equation de l'énergie:

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

$$\Rightarrow \rho c_p\left(u\frac{\Delta T}{L}+v\frac{\Delta T}{\delta_t}\right)\approx\lambda\frac{\Delta T}{\delta_t^{\,2}}$$



- Or $\dfrac{u}{L}\approx\dfrac{v}{\delta_t}$

$$\Rightarrow \rho c_p u\frac{\Delta T}{L}\approx\lambda\frac{\Delta T}{\delta_t^{\,2}}$$

$$\Rightarrow u\approx\frac{\lambda}{\rho c_p}\frac{L}{\delta_t^{\,2}}=a\frac{L}{\delta_t^{\,2}}$$

ORDRES DE GRANDEUR

- Au sein de la couche limite thermique:
  - Equation de quantité de mouvement:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\beta g\left(T-T_{\infty}\right)+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

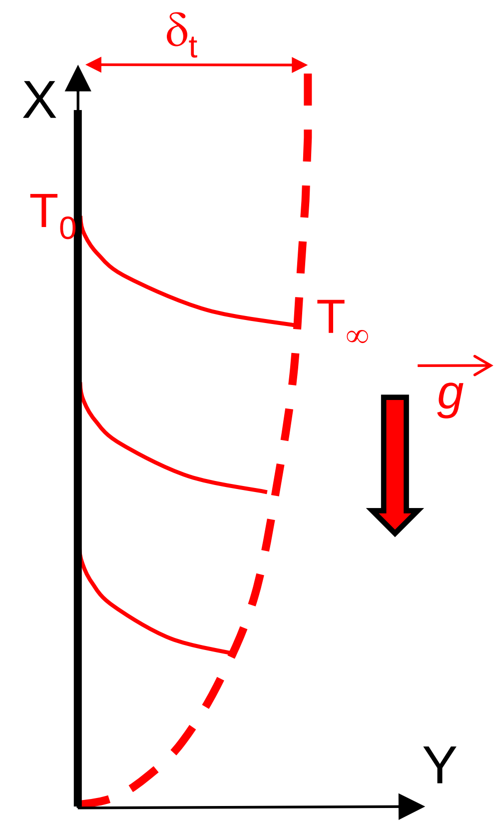
$$u\frac{u}{L}+v\frac{u}{\delta_t}\approx\beta g\Delta T+\frac{\mu}{\rho}\frac{u}{\delta_t{}^2}$$

  - Or $\frac{u}{L}\approx\frac{v}{\delta_t}$

$$\frac{u^2}{L}\approx\beta g\Delta T+\frac{\mu}{\rho}\frac{u}{\delta_t{}^2}$$

  - Or $u\approx a\frac{L}{\delta_t{}^2}$

$$a^2\frac{L^2}{\delta_t{}^4}\frac{1}{L}\approx\beta g\Delta T+\frac{\mu}{\rho}\frac{aL}{\delta_t{}^4}$$



ORDRES DE GRANDEUR

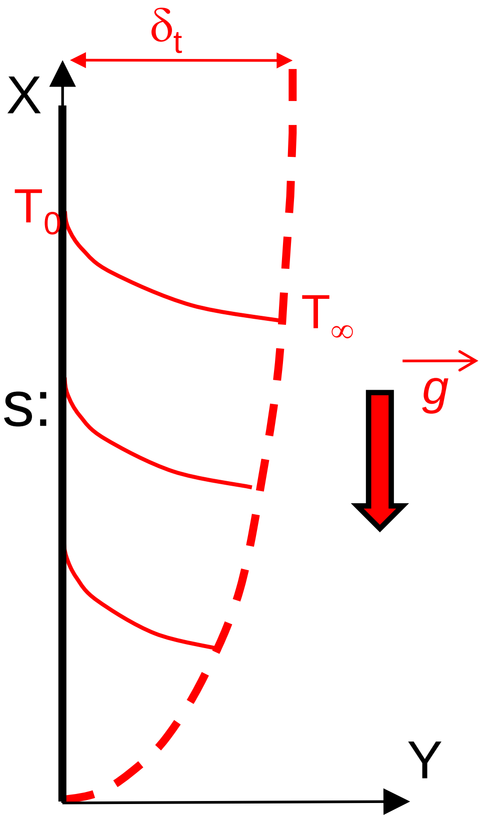
- Au sein de la couche limite thermique:
  - Equation de quantité de mouvement:

$$a^2 \frac{L}{\delta_t^{\,4}} \approx \beta g \Delta T + \frac{\mu}{\rho} \frac{aL}{\delta_t^{\,4}}$$

$$\Rightarrow \frac{a^2 L}{g\beta\Delta T \delta_t^{\,4}} \approx 1 + \frac{\mu}{\rho} \frac{aL}{g\beta\Delta T\, \delta_t^{\,4}}$$

  - Introduisons 2 nombres caractéristiques:
    - Grashof: $Gr = \dfrac{g\beta\Delta T\, L^3}{\nu^2}$
    - Rayleigh: $Ra = Gr\ \Pr$

$$\frac{L^4}{\delta_t^{\,4}} \frac{1}{Gr \Pr^2} \approx 1 + \frac{L^4}{\delta_t^{\,4}} \frac{1}{Gr \Pr} \Rightarrow \frac{L^4}{\delta_t^{\,4}} \frac{1}{Ra \Pr} \approx 1 + \frac{L^4}{\delta_t^{\,4}} \frac{1}{Ra}$$

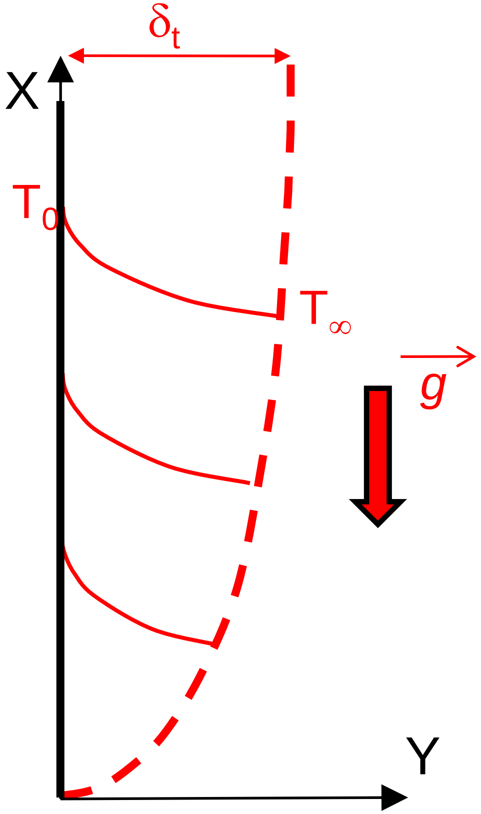


ORDRES DE GRANDEUR

- Au sein de la couche limite thermique:
  - Ordre de grandeur h et Nu:

$$h = \frac{-\lambda \dfrac{\partial T}{\partial y}}{\Delta T} \approx \frac{\lambda \Delta T}{\Delta T\ \delta_t} \approx \frac{\lambda}{\delta_t}$$

$$\Rightarrow Nu = \frac{hL}{\lambda} \approx \frac{L}{\delta_t}$$

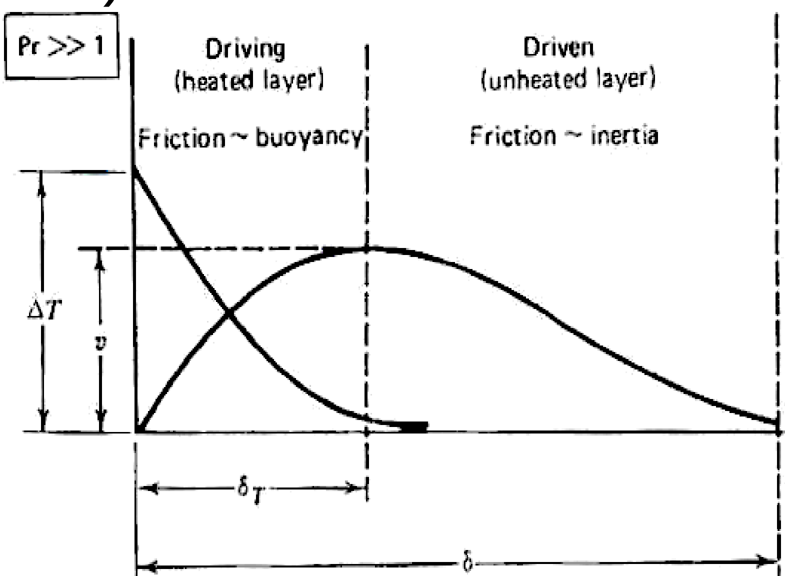


ORDRES DE GRANDEUR

- Au sein de la couche limite thermique:
  - $$\left(\frac{\delta_t}{L}\right)^4 \approx \frac{1}{Ra\,\mathrm{Pr}} + \frac{1}{Ra}$$
    Flottabilité Inertie Viscosité
- Si $\mathrm{Pr} \geq 1$ ($\mathrm{Pr}=1$, $\mathrm{Pr}>>1$):
  - Les forces de flottabilité sont équilibrées par:
    - Les forces de viscosité ($\mathrm{Pr}>>1$)
    - Les forces de viscosité et d'inertie ($\mathrm{Pr}=1$)
  - $$\left(\frac{\delta_t}{L}\right)^4 \approx \frac{1}{Ra}$$

$$u \approx a\frac{L}{\delta_t^{\,2}} \approx \frac{a}{L}\sqrt{Ra}$$

$$Nu \approx Ra^{1/4}$$

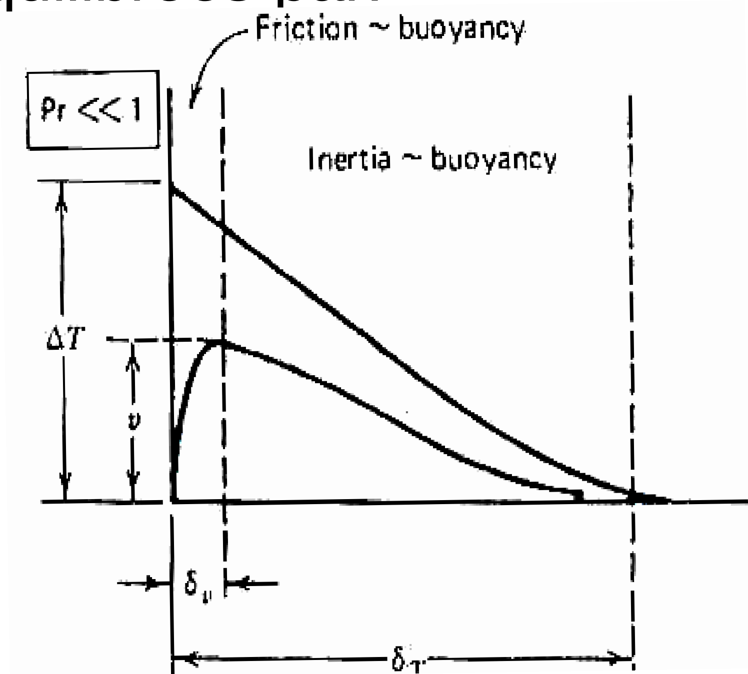


ORDRES DE GRANDEUR

- Au sein de la couche limite thermique:
  - $$\left(\frac{\delta_t}{L}\right)^4 \approx \frac{1}{Ra\,\mathrm{Pr}} + \frac{1}{Ra}$$
    Flottabilité Inertie Viscosité
- Si $\mathrm{Pr} << 1$:
  - Les forces de flottabilité sont équilibrées par:
    - Les forces d'inertie($\mathrm{Pr} << 1$)
  - $$\left(\frac{\delta_t}{L}\right)^4 \approx \frac{1}{Ra\,\mathrm{Pr}}$$

$$u \approx a\frac{L}{\delta_t^{\,2}} \approx \frac{a}{L}\sqrt{Ra\,\mathrm{Pr}}$$

$$Nu \approx (Ra\,\mathrm{Pr})^{1/4}$$



RÉSOLUTION PAR LA MÉTHODE DES SIMILITUDES

- Equations et conditions aux limites:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\beta g\left(T-T_{\infty}\right)+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

  - Conditions aux limites
    - Sur la plaque (y=0): $u=v=0$, $T=T_0$
    - Dans le fluide au loin(y→∞): $u\to 0, v\to 0$, $T\to T_{\infty}$

RÉSOLUTION PAR LA MÉTHODE DES SIMILITUDES

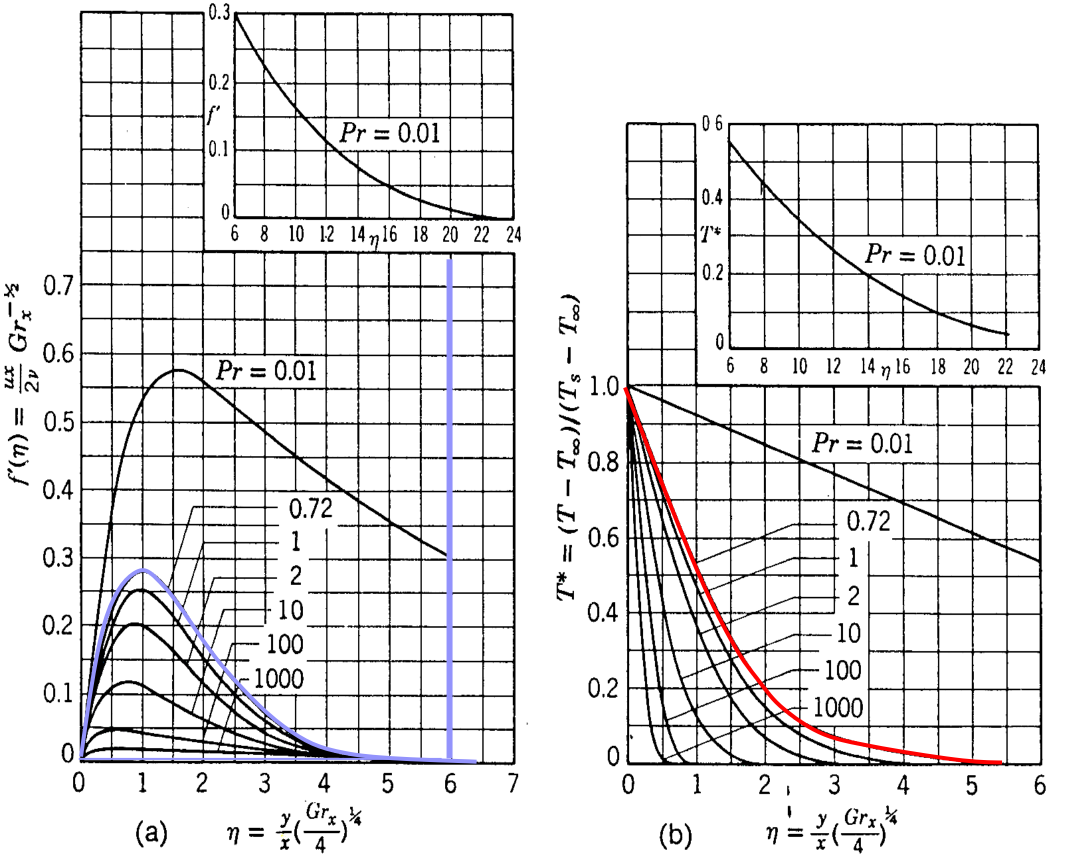
- Résolution:
  - On pose $\eta = \frac{y}{x}\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4}$
  - fonction courant : $\Psi(x,y) = f(\eta)\left[4\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4}\right]$
  - On pose également: $\theta = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$
  - Cheminement similaire à celui de la convection forcée
  - On aboutit à:

$$\begin{cases} f''' + 3ff'' - 2(f')^2 + \theta = 0 \\ \theta'' + 3\,\mathrm{Pr}\ f\ \theta' = 0 \end{cases}$$

  - Conditions aux limites
    - Sur la plaque (y=0): $\eta=0, f=f'=0, \theta=1$
    - Dans le fluide au loin($y\to\infty$): $\eta \to\infty, f'\to 0, \theta \to 0$

RÉSOLUTION PAR LA MÉTHODE DES SIMILITUDES

- Résultats:
  - Résolution numérique
  - Solution en vitesse et température:
    - Air: Pr=0.72
    - $\Rightarrow \ \boldsymbol{\delta} \approx 6.x.\left(\frac{4}{Gr}\right)^{1/4}$
      - $U(\delta)=0{,}01U_{max}\,(x)$



RÉSOLUTION PAR LA MÉTHODE DES SIMILITUDES

- Résultats:
  - Solution en flux, coefficient d'échange et nombre de Nusselt:
    - Valeurs locales:

$$\varphi = h(T_s - T_\infty) = -\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0}$$

$$= -\frac{\lambda}{x}(T_s - T_\infty)\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4} \left.\frac{d\theta}{dy}\right|_{\eta=0}$$

$$Nu_x = \frac{h_x\, x}{\lambda} = \left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4} g(\mathrm{Pr})$$

$$g(\mathrm{Pr}) = \frac{0{,}75\,\mathrm{Pr}^{1/2}}{\left(0{,}609 + 1{,}221\,\mathrm{Pr}^{1/2} + 1{,}238\,\mathrm{Pr}\right)^{1/4}}$$

RÉSOLUTION PAR LA MÉTHODE DES SIMILITUDES

- Résultats:
  - Solution en flux, coefficient d'échange et nombre de Nusselt:
    - Valeurs moyennes:

$$\bar{h}_L = \frac{1}{L} \int_0^L h_x \, dx \qquad \overline{Nu_L} = \frac{\bar{h}_L \; L}{\lambda}$$

  - On a:

$$\bar{h}_L = \frac{4}{3} h_L$$

$$\overline{\mathrm{Nu}_\mathrm{L}} = \frac{4}{3} \mathrm{Nu}_\mathrm{L}$$

RESULTATS LAMINAIRES

- Corrélations:
  - Ra<10^9

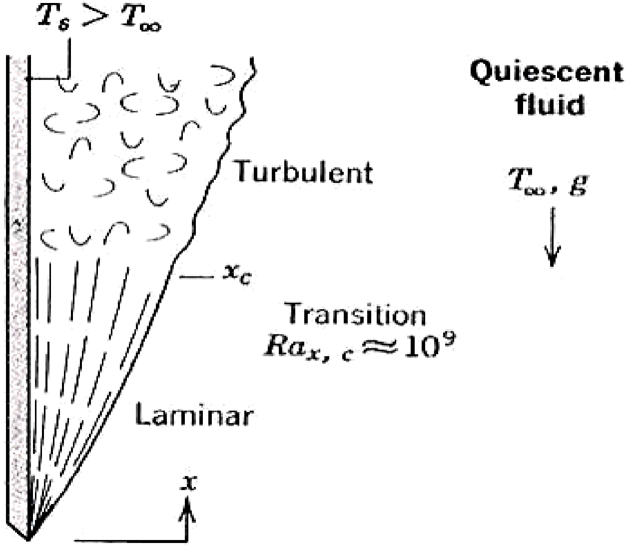
$$\begin{cases} Nu_x = 0{,}59\ Ra_x^{1/4} \\ \overline{Nu}_L = 0{,}59\ Ra_l^{1/4} \end{cases}$$

EFFET DE LA TURBULENCE

- Caractérisation laminaire/turbulent:
  - Plaque plane verticale à T_P imposée
  - Nombre de Rayleigh:

$$Ra = Gr \ \Pr = \frac{g\beta\Delta T \ L^3}{\nu^2}\Pr$$

  - Si $Ra<Ra_c$: laminaire, Si $Ra>Ra_c$: turbulent
  - $Ra_c \approx 10^9$ pour la plaque verticale



EFFET DE LA TURBULENCE

- Corrélations:
  - Plaque plane verticale à T_P imposée
  - En turbulent:
    - Corrélation de Mac Adams: $Ra > 10^9$

$$\begin{cases} Nu_x = 0{,}1\, Ra_x^{1/3} \\ \overline{Nu}_L = 0{,}1\, Ra_l^{1/3} \end{cases}$$

CONDITIONS EN FLUX IMPOSÉ

- Densité de flux imposé uniforme φ:
  - Plaque plane verticale
  - Nombre de Grashof modifié:

$$Gr_x^* = Gr_x \; Nu_x = \frac{g\beta\varphi x^4}{\nu^2\lambda}$$

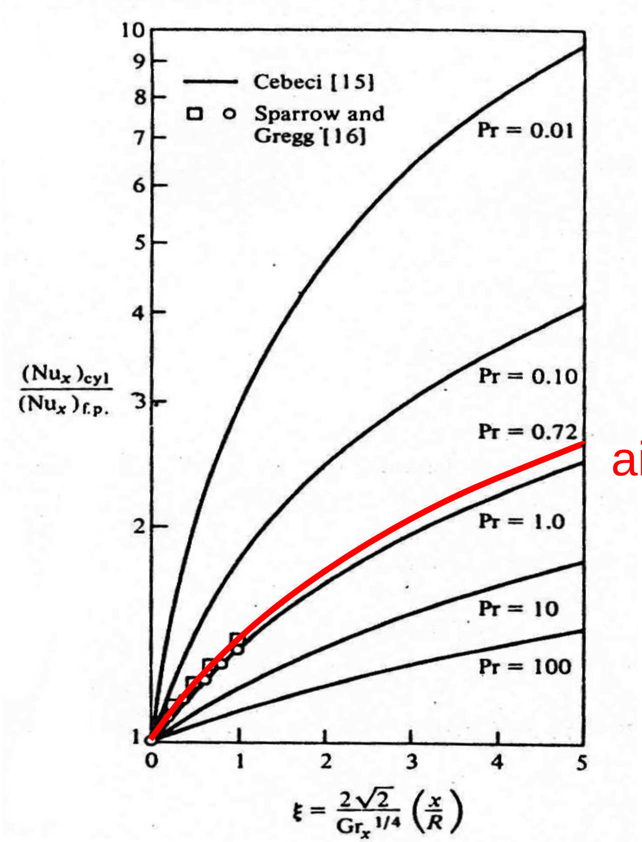
  - Corrélation: $10^5 < Gr_x^* < 10^{11}$

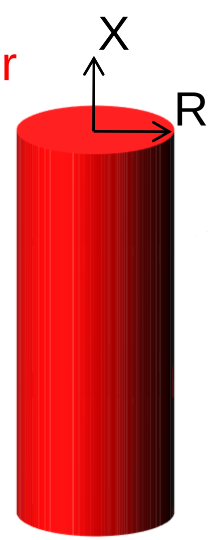
$$Nu_x = \frac{hx}{\lambda} = 0{,}6(Gr_x^* \;\mathrm{Pr})^{1/5}$$

AUTRES GÉOMÉTRIES

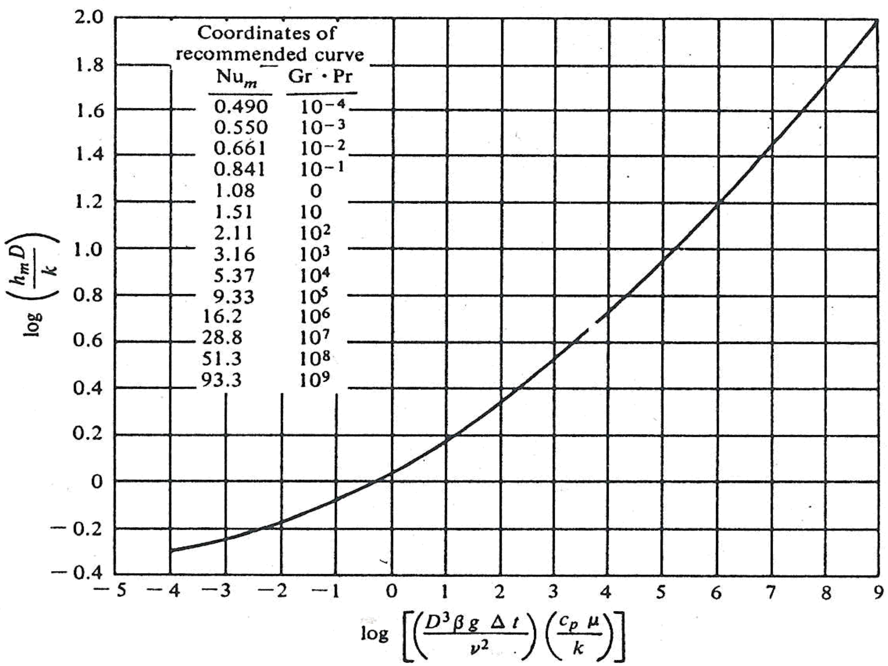
- Cylindres:

Cylindre vertical





Cylindre horizontal



AUTRES GÉOMÉTRIES

- Cylindres et sphères:
  - Corrélations:
    - Cylindres: $10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$

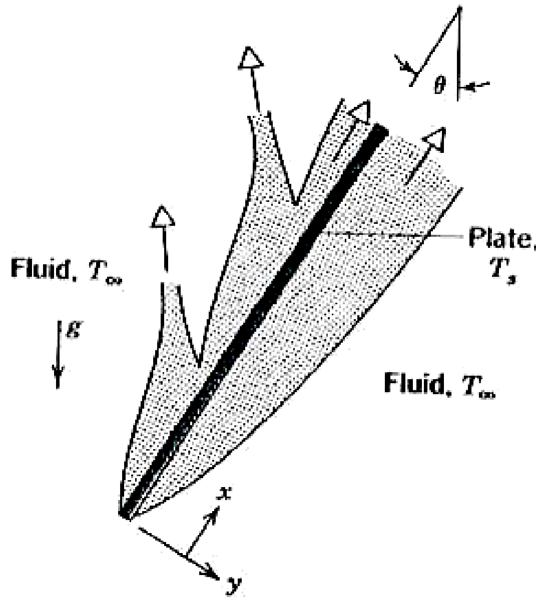
$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0{,}60 + \frac{0{,}387\, Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0{,}559 / \mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

    - Sphères: $\mathrm{Pr} \geq 0.7$, $Ra_D \leq 10^{11}$

$$\overline{Nu}_D = 2 + \frac{0{,}589\, Ra_D^{1/4}}{\left[1 + (0{,}469 / \mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{4/9}}$$

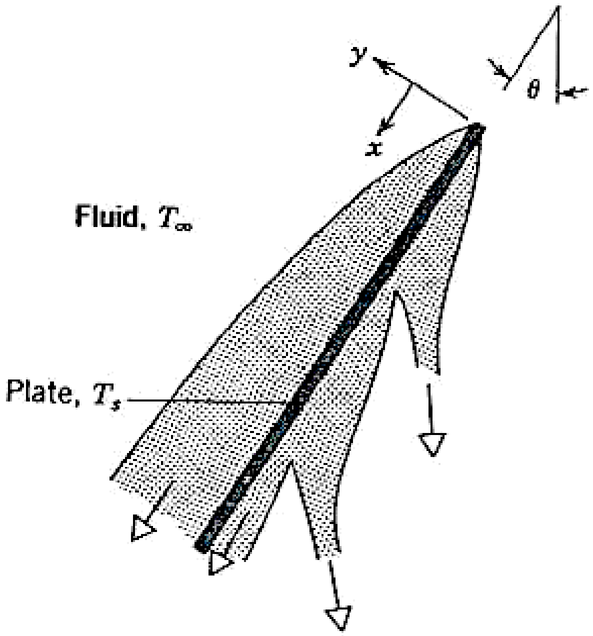
AUTRES GÉOMÉTRIES

- Plaque inclinée: $\theta \leq 60°$
  - Ecoulement ascendant
    - Ecoulement inferieur
      - 2D
      - Idem plaque plane
      - Avec $g.\cos\theta$ au lieu de g
    - Ecoulement supérieur
      - 3D
      - Très complexe



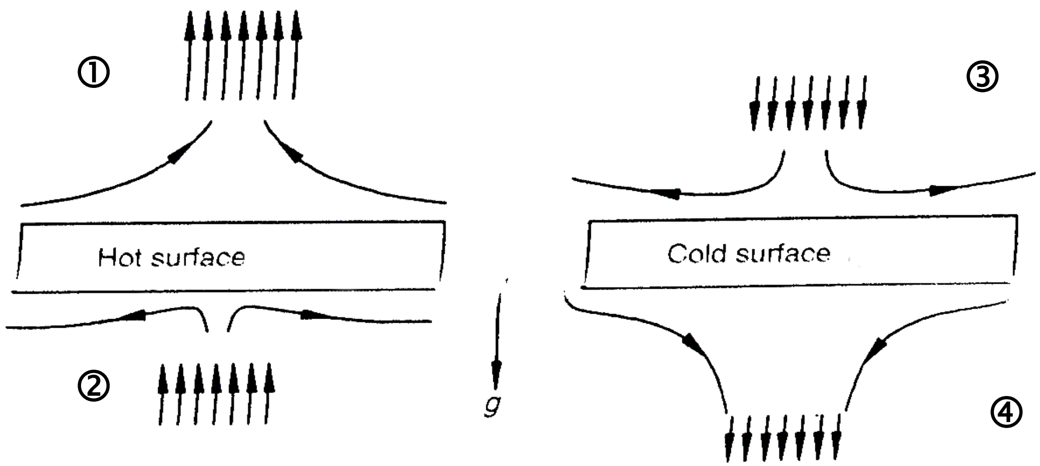
AUTRES GÉOMÉTRIES

- Plaque inclinée: $\theta \leq 60°$
  - Ecoulement descendant
    - Ecoulement supérieur
      - 2D
      - Idem plaque plane
      - Avec $g.\cos\theta$ au lieu de g
    - Ecoulement inférieur
      - 3D
      - Très complexe



AUTRES GÉOMÉTRIES

- Plaques horizontales:



$$cas\ 1\ et\ 4\begin{cases}\overline{Nu}_L = 0{,}54(Gr_L\ \Pr)^{1/4} & 10^4 < Ra_L < 10^7 \\ \overline{Nu}_L = 0{,}15(Gr_L\ \Pr)^{1/3} & 10^7 < Ra_l < 10^{11}\end{cases}$$

$$cas\ 2\ et\ 3: \overline{Nu}_L = 0{,}27(Gr_L\ \Pr)^{1/4} \quad 10^4 < Ra_L < 10^{10}$$

- $L = S/P$

CONVECTION MIXTE

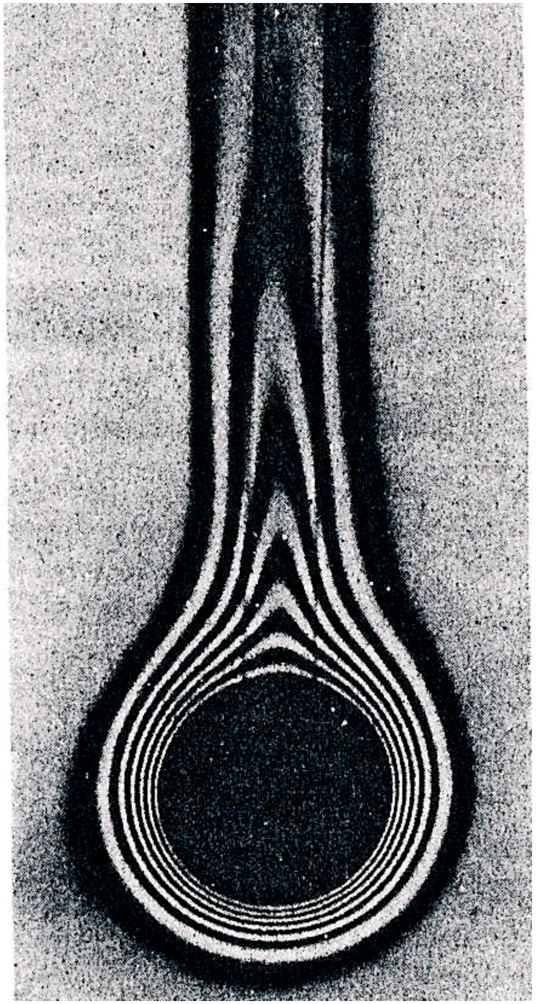
- Définitions:
  - Convection naturelle:
    - Vitesses imposées inexistantes ou négligeables
  - Convection forcée:
    - Vitesses imposées importantes
    - Effets de flottabilité négligeables

CONVECTION MIXTE

- Convection naturelle/convection forcée:
  - Critère de choix: $\dfrac{Gr_{naturelle}}{\left(\mathrm{Re}_{forcée}\right)^2} = \dfrac{\dfrac{g\beta\Delta T\, L^3}{\nu^2}}{\left(\dfrac{U_{forcée}L}{\nu}\right)^2}$
    - Si $\dfrac{Gr_{naturelle}}{\left(\mathrm{Re}_{forcée}\right)^2} >> 1$
      - convection naturelle dominante (convection forcée négligée)
    - Si $\dfrac{Gr_{naturelle}}{\left(\mathrm{Re}_{forcée}\right)^2} << 1$
      - convection forcée dominante (convection naturelle négligée)
    - Sinon: convection mixte

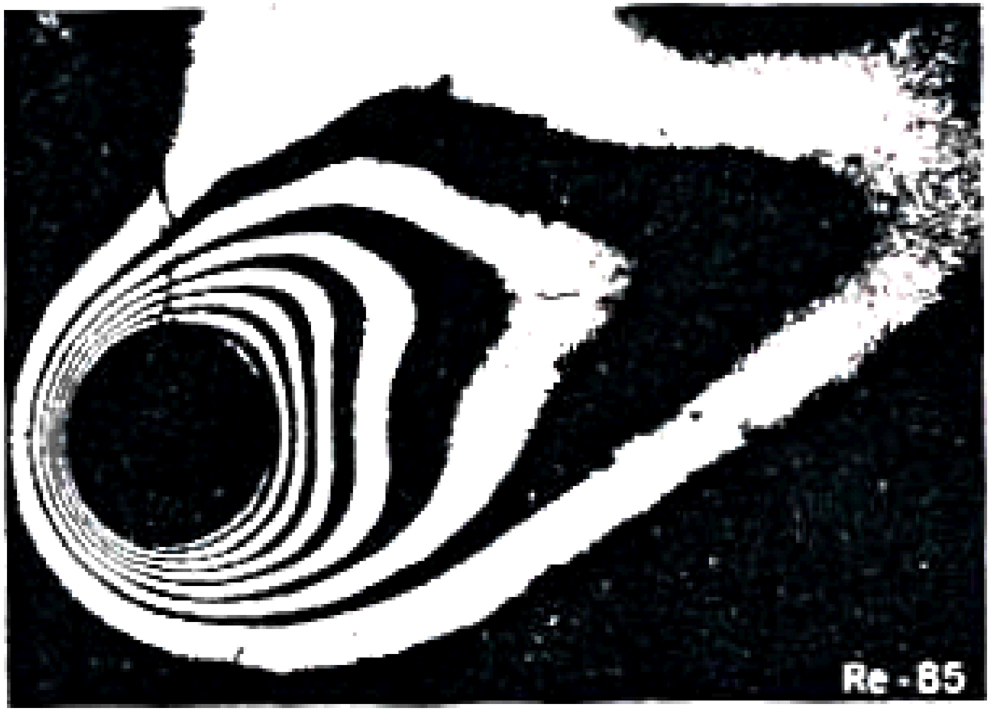
CONVECTION MIXTE

- Exemple:
  - Ecoulement autour d’un cylindre
    - Convection naturelle:
      - Panache ascendant
      - Pas de vitesse imposée



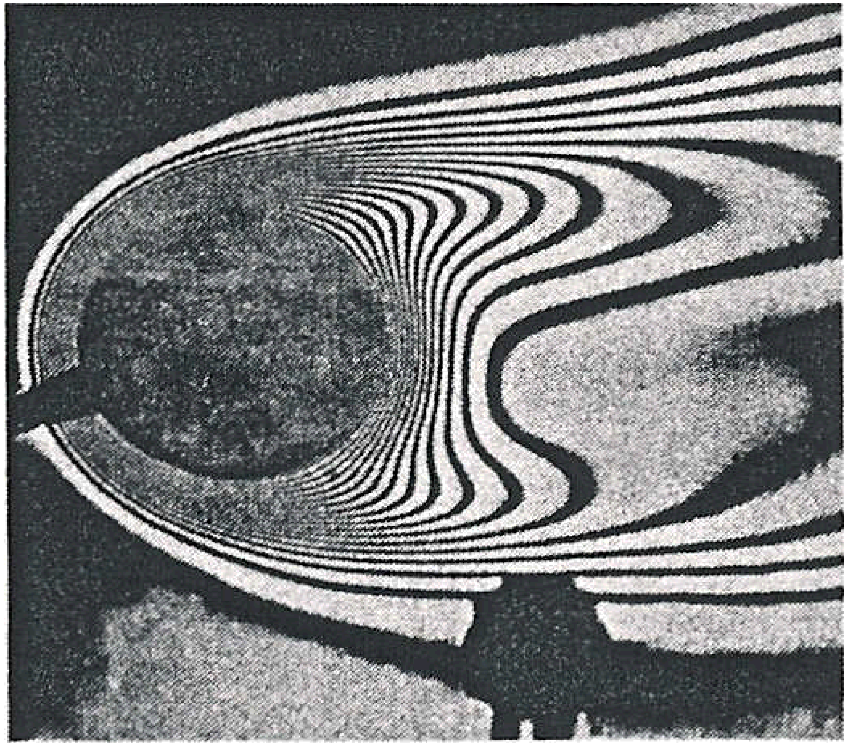
CONVECTION MIXTE

- Exemple:
  - Ecoulement autour d'un cylindre
    - Convection mixte:
      - Imposition d'un vitesse latérale
      - Cas b):Re=85



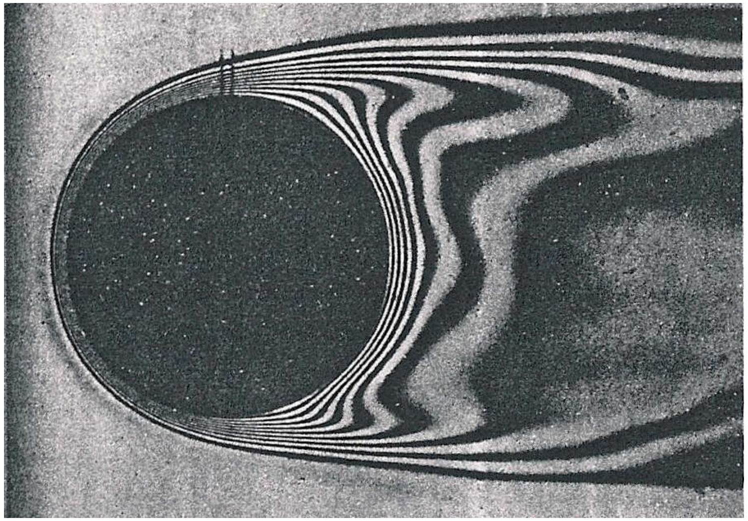
CONVECTION MIXTE

- Exemple:
  - Ecoulement autour d'un cylindre
    - Convection mixte:
      - Imposition d'un vitesse latérale
      - Cas c): Re=230



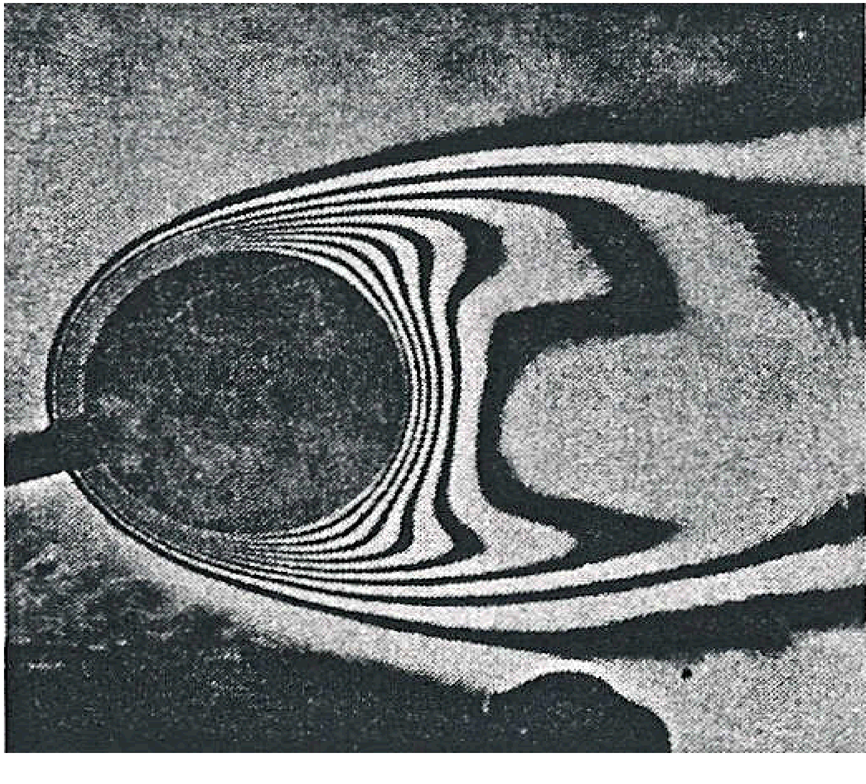
CONVECTION MIXTE

- Exemple:
  - Ecoulement autour d'un cylindre
    - Convection mixte:
      - Imposition d'une vitesse latérale
      - Cas d):Re=1200



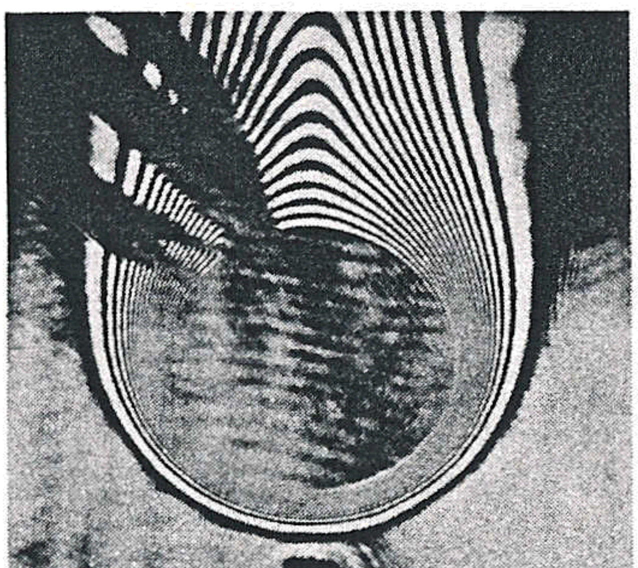
CONVECTION MIXTE

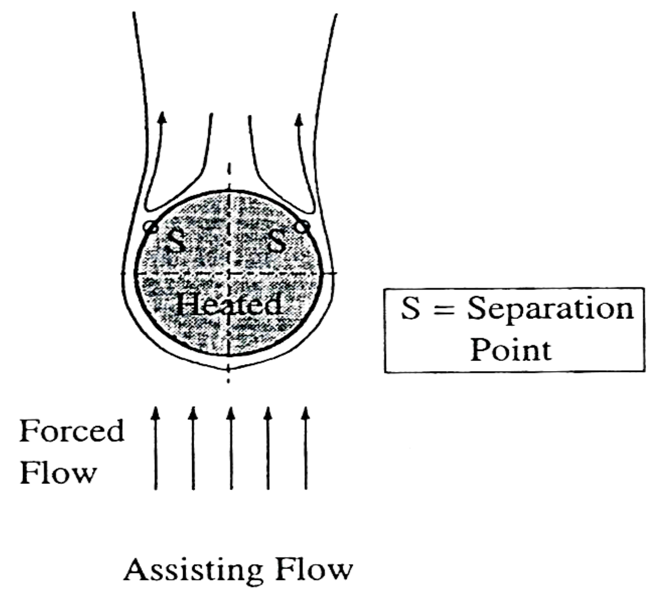
- Exemple:
  - Ecoulement autour d’un cylindre
    - Convection forcée:
      - Imposition d’une vitesse latérale



CONVECTION MIXTE

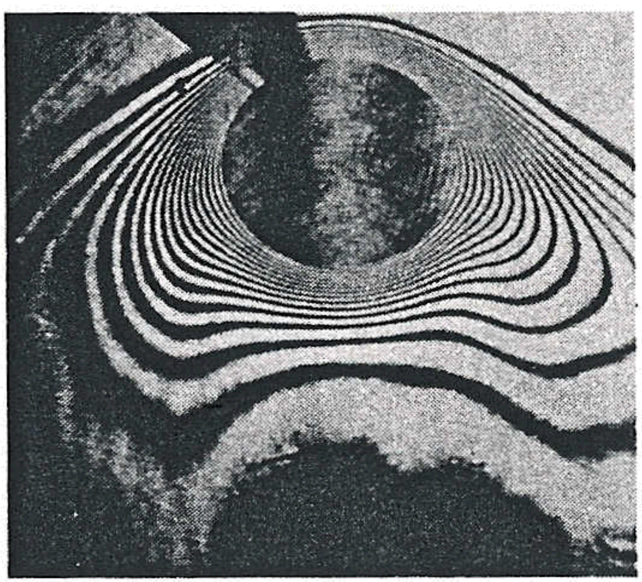
- Exemple 2:
  - Ecoulement autour d'un cylindre
  - Vitesse imposée dans la direction de l'écoulement due à la convection naturelle
  - Sens assisté:

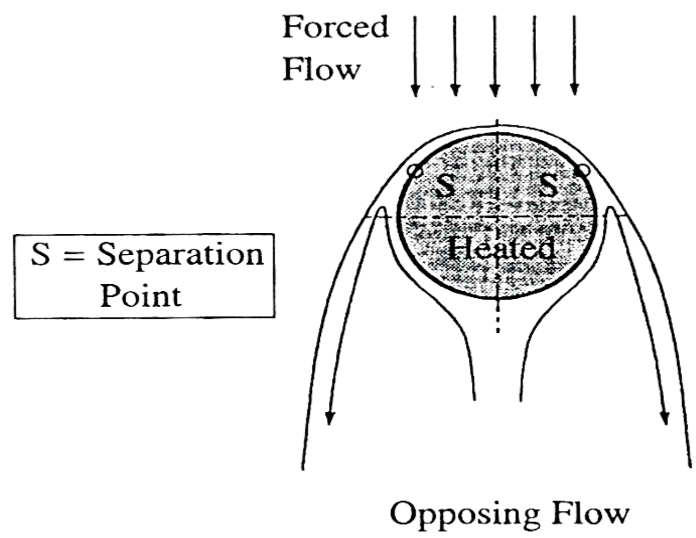




CONVECTION MIXTE

- Exemple 2:
  - Ecoulement autour d'un cylindre
  - Vitesse imposée dans la direction de l'écoulement due à la convection naturelle
  - Sens opposée:





CONVECTION MIXTE

- Ecoulement très complexe
- Nécessite généralement une étude spécifique

- Règle simplifiée :

$$Nu = \left(Nu_F^n \pm Nu_N^n \right)^{1/n}$$

  - Nu_F nombre de Nusselt de convection forcée(corrélation)
  - Nu_N nombre de Nusselt de convection naturelle(corrélation).
  - Signe + pour
    - convection mixte assistée
    - convection mixte transverse
  - Signe - pour convection mixte contraire

  - n généralement de l'ordre de n = 3

CONVECTION MIXTE

- Ordre de grandeur: