

Transfert de chaleur dans les fluides

par Rafic YOUNES

ULFG – S9
Département Mécanique



Plan

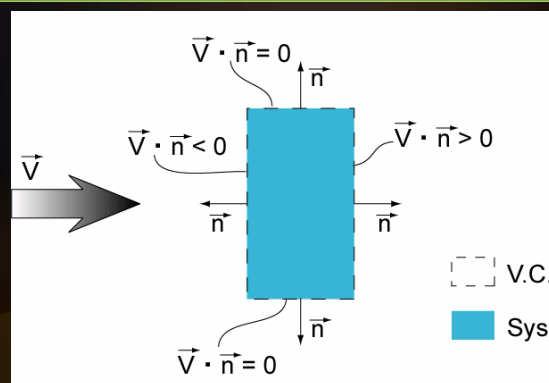
- 1 - Introduction
- 2 - Équation de continuité
- 3 - Principe fondamentale de la dynamique
- 4 - Équation de l'énergie
- 5 - Écoulement de Couette
- 6 - Applications numériques
- 7 - Groupements Adimensionnels et Similitude
- 8 - Applications sur la théorie de la similitude
- 9 - Corrélations sur le nombre de Nusselt

1 - Introduction

- Convection naturelle et forcée.
- Couches limites. Régimes laminaires et turbulents. Les effets de la turbulence.
- Équations et Approximations. Paramètres sans dimensions. Analogies.
- Taux de transfert de chaleur sur une surface externe ou interne sans changement de phase.
- Considérations hydrodynamique et thermique.
- Bilan énergétique. Thermique mixte (conduction, convection et rayonnement).
- Corrélations diverses
- Thermique mixte numérique

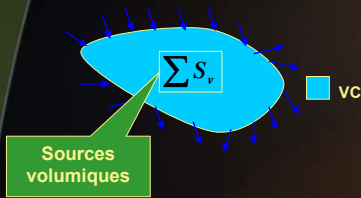
1 - Introduction

Théorème de transport de Reynolds



$$\left. \frac{dG}{dt}(\vec{P}, t) \right|_{\text{sys}} = \left. \frac{\partial G}{\partial t}(\vec{P}, t) \right|_{\text{V.C.}} + \int_{\text{sc}} \rho \cdot \frac{\partial G}{\partial M} \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

2 - Équation de continuité



Soit $G(\vec{P}, t) = M(\vec{P}, t)$

$$\frac{dM}{dt} = \sum S_v = \int_{vc} d\tau \cdot \sum s_v$$

Forme intégrale de l'équation de continuité

$$\int_{vc} \frac{\partial \rho}{\partial t} (\vec{P}, t) d\tau + \int_{sc} \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dA = \int_{vc} d\tau \cdot \sum s_v$$

Théorème d'Ostogradski :

$$\int_{sc} \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dA = \int_{vc} \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) \cdot d\tau$$

$$\int_{vc} \frac{\partial \rho}{\partial t} (\vec{P}, t) \cdot d\tau + \int_{vc} \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) \cdot d\tau = \int_{vc} d\tau \cdot \sum s_v$$

$$\int_{vc} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} (\vec{P}, t) + \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) \right] \cdot d\tau = \int_{vc} (\sum s_v) \cdot d\tau$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) = \sum s_v$$

Forme différentielle de l'équation de continuité

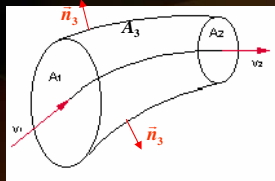
2 - Équation de continuité

Cas particuliers :

Régime permanent : $\Rightarrow \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) = 0$

Fluide incompressible : $\text{div}(\vec{V}) = 0$

Écoulement monodirectionnel : $\Rightarrow \int_{sc} \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dA = 0$



$$\int_{A_1} \rho \cdot \vec{V}_1 \cdot \vec{n}_1 \cdot dA + \int_{A_2} \rho \cdot \vec{V}_2 \cdot \vec{n}_2 \cdot dA + \int_{A_3} \rho \cdot \vec{V}_3 \cdot \vec{n}_3 \cdot dA = 0$$

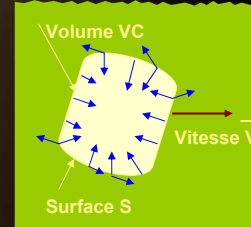
$$\rho_1 \cdot \vec{V}_1 \cdot \vec{n}_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot \vec{V}_2 \cdot \vec{n}_2 \cdot A_2 = 0$$

$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2 \quad \text{Fluide compressible}$$

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad \text{Fluide incompressible}$$

3 - Principe de la dynamique

Soit un volume VC d'un fluide parfait animé d'une accélération γ , délimité par une surface S dans un repère Galiléen R.



$$\sum \vec{F} = \vec{F}_S + \vec{F}_V = m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Soit σ le tenseur des forces surfaciques et f_v le champ des forces volumiques

$$\vec{F}_S = \oint_S \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad \& \quad \vec{F}_V = \int_{VC} \vec{f}_v \cdot d\tau$$

$$\iint_S \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \cdot dS + \iiint_{VC} \vec{f}_v \cdot d\tau = \iiint_{VC} \rho \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\tau$$

3 - Principe de la dynamique

La formule d'Ostogradski permet de passer d'une intégrale de surface à une intégrale de volume :

$$\iint_S f \cdot \vec{n} \cdot dS = \iiint_{VC} \text{div}(f) \cdot d\tau$$

D'où

$$\iint_S \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \cdot dS + \iiint_{VC} \vec{f}_v \cdot d\tau = \iiint_{VC} \rho \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\tau$$

$$\iiint_{VC} \nabla(\vec{\sigma}) \cdot d\tau + \iiint_{VC} \vec{f}_v \cdot d\tau = \iiint_{VC} \rho \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\tau$$



$$\vec{\nabla}(\vec{\sigma}) + \vec{f}_v = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

3 - Principe de la dynamique

La loi de comportement d'un milieu fluide newtonien est :

$$\bar{\sigma} = -p \cdot \bar{I} + 2 \cdot \mu \cdot \bar{D} - \frac{2}{3} \mu \cdot \text{tr}(\bar{D})$$

AVEC $\bar{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$ ET $\text{tr}(\bar{D}) = \text{div}(\vec{V})$

$$\vec{\nabla}(\bar{\sigma}) = -\vec{\nabla}(p) + 2\mu \cdot \vec{\nabla}(\bar{D}) - \frac{2}{3} \mu \cdot \vec{\nabla}[\nabla(\vec{V})]$$

3 - Principe de la dynamique

AINSI :

$$\vec{\nabla}(\bar{\sigma}) = -\vec{\nabla}(p) + 2\mu \cdot \vec{\nabla}(\bar{D}) - \frac{2}{3} \mu \cdot \vec{\nabla}[\nabla(\vec{V})] \quad \text{ET} \quad \vec{\nabla}(\bar{\sigma}) + \vec{f}_v = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

$$\vec{\nabla}(\bar{\sigma}) + \vec{f}_v = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

$$-\vec{\nabla}(p) + \mu \cdot \nabla^2(\vec{V}) + \frac{1}{3} \mu \cdot \vec{\nabla}[\nabla(\vec{V})] + \vec{f}_v = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Cas particulier : Écoulement d'un fluide incompressible dans le champ de pesanteur :

$$-\vec{\nabla}(p) + \mu \cdot \nabla^2(\vec{V}) + \rho \cdot \vec{g} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

3 - Principe de la dynamique

Viscosité dynamique / cinématique

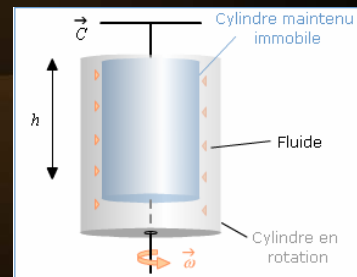
Si $e = R_1 - R_2$, on montre que :

$$\frac{F}{S} = \mu \cdot \frac{V}{e}$$

Or : $V = R_1 \cdot \omega$ et $C = F \cdot \omega$

$$\mu = \frac{C \cdot e}{2\pi \cdot R_2^2 \cdot R_1 \cdot h \cdot \omega}$$

$$[\mu] = M L^{-1} T^{-1} : kg m^{-1} s^{-1}$$



4 - Équation de l'énergie

• On admet le bilan suivant :

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = T \cdot \beta_T \cdot \frac{dp}{dt} + \lambda \cdot \nabla^2 T + \Phi + \sigma_T - \text{div}(\vec{q}_r)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\partial X}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad}(X)$$

Terme
transitoire

Terme
convectif

Diffusion
de chaleur

Frottements
par viscosité

Rayonnement

Source
thermique

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2$$

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p ; \quad c_p = T \left(\frac{\partial S_m}{\partial T} \right)_p$$

5 - Écoulement de Couette

HYPOTHESES :

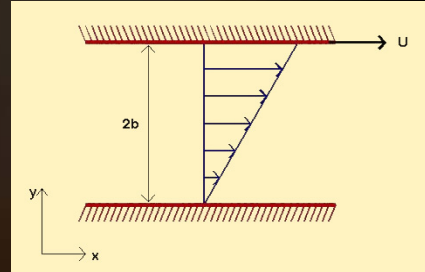
Écoulement à surface libre:

Incompressible ($\rho=Cte$),

Permanent ($\partial/\partial t=0$),

Unidimensionnel ($v=w=0$),

$$\vec{V} = u\vec{i} + 0\vec{j} + 0\vec{k}$$



BILAN DE CONTINUITÉ : $div(\vec{V}) = 0$

BILAN DYNAMIQUE : $-\frac{1}{\rho} \cdot \overrightarrow{grad}(p) + \frac{\mu}{\rho} \cdot \nabla^2 \vec{V} + \vec{g} = [\vec{V} \cdot \overrightarrow{grad}] \cdot \vec{V}$

BILAN D'ÉNERGIE : $\rho \cdot C_p \cdot \vec{V} \cdot \overrightarrow{grad}(T) = T \cdot \beta_T \cdot \vec{V} \cdot \overrightarrow{grad}(p) + \lambda \cdot \nabla^2 T + \Phi$

5 - Écoulement de Couette

BILAN DE CONTINUITÉ : $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \implies \frac{\partial u}{\partial x} = 0$

BILAN DYNAMIQUE :

surface libre

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Or :} \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \implies \mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

Conditions aux limites :

$$u(z=0) = 0 \implies u(z) = \frac{U}{2b} \cdot z$$

$$u(z=2b) = U$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \text{et} \quad -\frac{\partial p}{\partial z} = \rho \cdot g \implies p(z) + \rho \cdot g \cdot z = C^{te}$$

5 - Écoulement de Couette

BILAN D'ÉNERGIE :

$$\rho \cdot C_p \cdot u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = T \cdot \beta_T \cdot u \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$$

On fait l'hypothèse d'une faible variation de T sur l'axe x $\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \overline{T}_p}{\partial x}$

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{U}{2b} \cdot z \cdot \frac{\partial \overline{T}_p}{\partial x} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{U}{2b} \right)^2 \quad \downarrow$$

$$T(z) = \frac{\rho \cdot C_p \cdot U}{12 \cdot b \cdot \lambda} \cdot \frac{\partial \overline{T}_p}{\partial x} \cdot z^3 + \mu \left(\frac{U}{2b} \right)^2 \cdot \frac{z^2}{2} + C \cdot z + D$$

Conditions aux limites 1:

$$T(z=0) = T_p$$

$$T(z=2b) = T_0$$

Conditions aux limites 2:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{z=0} = h \cdot [T_p - T(0)]$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{z=2b} = h \cdot [T(2b) - T_0]$$

5 - Écoulement de Couette

Conditions aux limites 1:

$$T(z) = \frac{\rho \cdot C_p \cdot U}{12 \cdot b \cdot \lambda} \cdot \frac{\partial \overline{T}_p}{\partial x} \cdot z^3 + \mu \left(\frac{U}{2b} \right)^2 \cdot \frac{z^2}{2} + \left[\frac{T_0 - T_p}{2b} - \frac{\rho \cdot C_p \cdot U}{3 \cdot \lambda} \cdot \frac{\partial \overline{T}_p}{\partial x} \cdot b - \mu \frac{U^2}{4b} \right] \cdot z + T_p$$

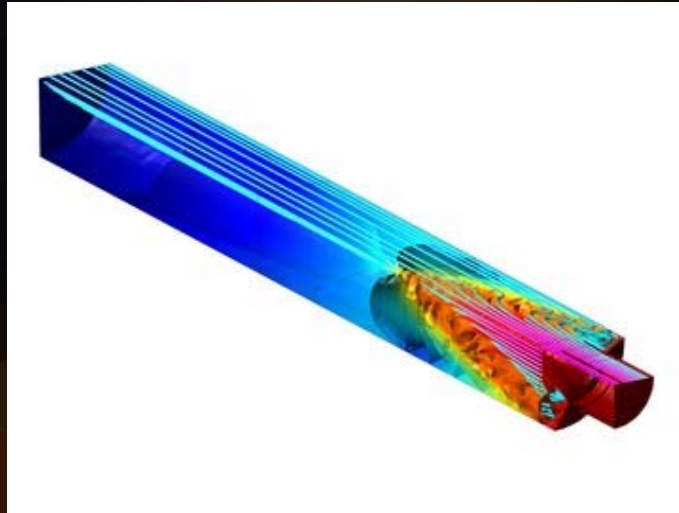
Conditions aux limites 2:

$$T(z) = \frac{\rho \cdot C_p \cdot U}{12 \cdot b \cdot \lambda} \cdot \frac{\partial \overline{T}_p}{\partial x} \cdot z^3 + \mu \left(\frac{U}{2b} \right)^2 \cdot \frac{z^2}{2} + \frac{h}{\lambda} (T_p - D) \cdot z + D$$

$$D(hb - 2\lambda) = \rho C_p U b \frac{\partial \overline{T}_p}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{h} + \frac{2}{3} b \right) + \frac{\mu \lambda U^2}{2} \left(\frac{\lambda}{hb} + 1 \right) - T_p (\lambda + hb) - T_0 \lambda$$

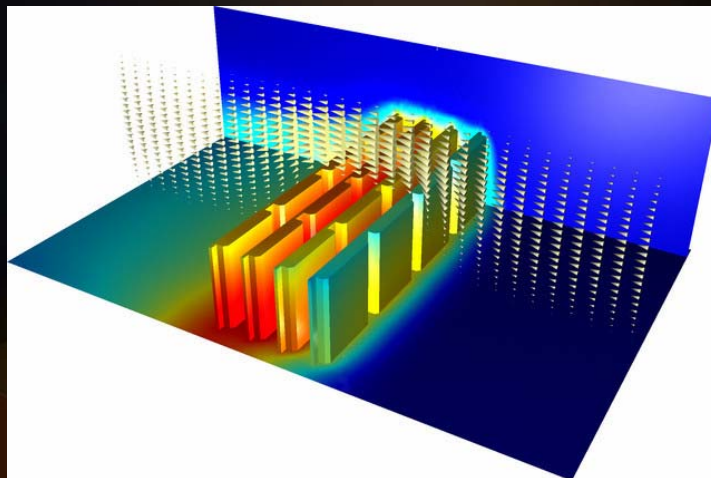
6- Thermique numérique

Moulage d'un barreau carré



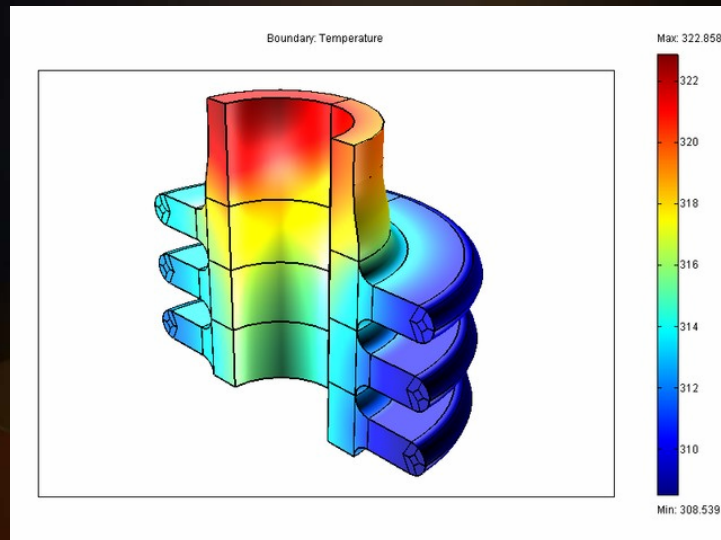
6- Thermique numérique

Refroidissement des cartes électroniques



6- Thermique numérique

Échangeur à ailettes



7 - Théorie de la similitude

- n grandeurs physiques G_i :

$$F(G_1, G_2, \dots, G_i, \dots, G_n) = 0$$

- p le nombre de grandeurs fondamentales indépendantes :

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i, \dots, \pi_{n-p}) = 0$$

⇒ $\pi_p = \varphi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i, \dots, \pi_{n-p-1})$

- Grandeur mécanique G dans le système (M,L,T) :

$$G = M^\alpha \cdot L^\beta \cdot T^\gamma \cdot C^\theta$$

Masse: M ; Longueur: L ; Temps: T ; Température: K ;



7 - Théorie de la similitude

Exemple : $G = F(F_1, F_2, F_3, F_4) \rightarrow G = F_1^x \cdot F_2^y \cdot F_3^z \cdot F_4^u$

$$G = F_1^x \cdot F_2^y \cdot F_3^z$$

$$G = M^\alpha \cdot L^\beta \cdot T^\gamma \cdot K^\theta$$

$$F_1 = M^{\alpha_{11}} \cdot L^{\beta_{12}} \cdot T^{\gamma_{13}} \cdot K^{\theta_{14}}$$

$$F_2 = M^{\alpha_{21}} \cdot L^{\beta_{22}} \cdot T^{\gamma_{23}} \cdot K^{\theta_{24}}$$

$$F_3 = M^{\alpha_{31}} \cdot L^{\beta_{32}} \cdot T^{\gamma_{33}} \cdot K^{\theta_{34}}$$

$$F_4 = M^{\alpha_{41}} \cdot L^{\beta_{42}} \cdot T^{\gamma_{43}} \cdot K^{\theta_{44}}$$

$$\alpha_{11} \cdot x + \beta_{21} \cdot y + \gamma_{31} \cdot z = \alpha$$

$$\alpha_{12} \cdot x + \beta_{22} \cdot y + \gamma_{32} \cdot z = \beta$$

$$\alpha_{13} \cdot x + \beta_{23} \cdot y + \gamma_{33} \cdot z = \gamma$$

$$\alpha_{14} \cdot x + \beta_{24} \cdot y + \gamma_{34} \cdot z = \theta$$



7 - Groupements Adimensionnels

Re (Reynolds)	$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu}$	Nu (Nusselt)	$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}$
Fr (Froude)	$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot L}}$	Pr (Prandtl)	$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda}$
M (Mach)	$M = \frac{U}{\sqrt{\gamma \cdot r \cdot T}}$	Ra (Rayleigh)	$Ra = Pr \cdot Gr$
St (Strouhal)	$St = \frac{L}{U \cdot t}$	Gr (Grashoff)	$Gr = \frac{g \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot D^3}{\nu}$
Eu (Euler)	$Eu = \frac{p}{\rho \cdot U^2}$	Ec (Eckert)	$Ec = \frac{Cp \cdot T}{U^2}$
γ	$\gamma = \frac{Cp}{Cv}$	We (Weber)	$We = \frac{U}{\sqrt{\frac{A}{\rho \cdot U^2}}}$
Biot	$Bi = \frac{h \cdot L}{a} \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C}$		



8 - Applications

- On cherche à formuler le coefficient de convection h par la formule :

$$h = F(U, \rho, L, \mu, \lambda, C_p, g, \dots)$$

$$h = U^x \cdot \rho^y \cdot L^z \cdot \mu^s \cdot \lambda^t \cdot C_p^w \cdot g^q$$

$$\text{kg}^1 \text{s}^{-3} \text{K}^{-1} = \text{m}^x \text{s}^{-x} \text{kg}^y \text{m}^{-3y} \text{m}^z \text{kg}^s \text{m}^{-s} \text{s}^{-s} \text{kg}^t \text{s}^{-3t} \text{m}^t \text{K}^{-t} \text{m}^{2w} \text{s}^{-2w} \text{K}^{-w} \text{m}^q \text{s}^{-2q}$$

$$\text{m}^0 \text{kg}^1 \text{s}^{-3} \text{K}^{-1} = \text{m}^{x-3y+z-s+t+2w+q} \text{kg}^{y+s-t} \text{s}^{-x-s-3t-2w-2q} \text{K}^{-t-w}$$

$$x-3y+z-s+t+2w+q = 0 \quad \longrightarrow \quad z = s-x+3y-t-2w-q$$

$$y+s+t = 1 \quad \longrightarrow \quad s = 1-t-y$$

$$-x-s-3t-2w-2q = -3 \quad \longrightarrow \quad x = 3-s-3t-2w-2q$$

$$-t-w = -1 \quad \longrightarrow \quad t = 1-w$$



8 - Applications

$$\longrightarrow z = -1+y+q$$

$$\longrightarrow s = w-y$$

$$\longrightarrow x = y-2q$$

$$\longrightarrow t = 1-w$$

$$h = U^{y-2q} \cdot \rho^y \cdot L^{-1+y+q} \cdot \mu^{w-y} \cdot \lambda^{1-w} \cdot C_p^w \cdot g^q$$

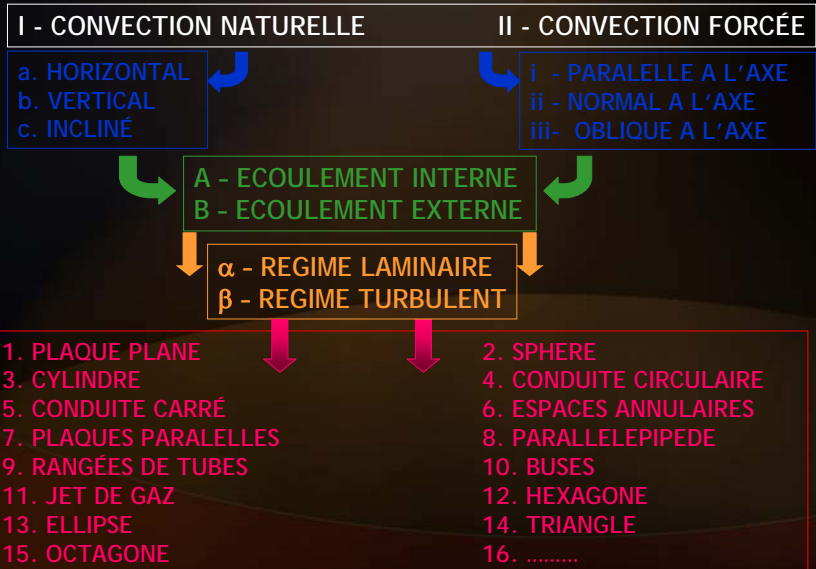
$$\frac{h \cdot L}{\lambda} = U^{y-2q} \cdot \rho^y \cdot L^{y+q} \cdot \mu^{w-y} \cdot \lambda^{-w} \cdot C_p^w \cdot g^q$$

$$\frac{h \cdot L}{\lambda} = \left(\frac{\rho U L}{\mu} \right)^y \cdot \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^w \cdot \left(\frac{L \cdot g}{U^2} \right)^q$$

$$Nu = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Fr})$$

9 - Corrélations sur le nombre de Nusselt

CLASSIFICATION DES CORRÉLATIONS :



9 - Corrélations sur le nombre de Nusselt

Convection naturelle sur une plaque plane à température de paroi imposée

$$Nu = 0.59 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0.25} \quad 10^4 < Pr \cdot Gr < 10^9$$

$$Nu = 0.13 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0.33} \quad Pr \cdot Gr > 10^9$$

Convection forcée dans une conduite en régime laminaire

température de paroi imposée

$$Nu = 3.657 + \frac{0.19 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right)^{0.8}}{\left[1 + 0.117 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right)^{0.467} \right]}$$

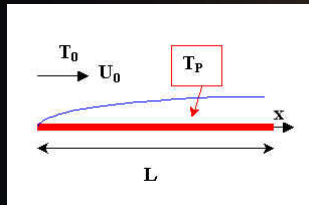
flux de paroi imposée

$$Nu = 1.953 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \geq 33.3$$

$$Nu = 4.364 + 0.0722 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right) \quad Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} < 33.3$$

9 - Corrélations sur le nombre de Nusselt

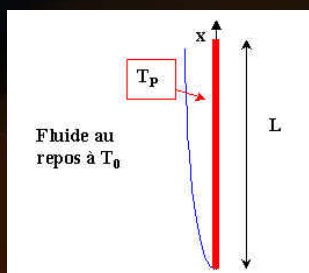
Convection forcée laminaire sur une plaque horizontale à température de paroi imposée



$$Nu = 0.332 \cdot (Re)^{1/2} \cdot (Pr)^{1/3}$$

$$Nu = \frac{0.3387 \cdot (Re)^{1/2} \cdot (Pr)^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.0468}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}}$$

Convection forcée laminaire sur une plaque verticale à température de paroi imposée



$$Nu = 0.707 \cdot (Gr)^{1/4} \frac{0.75 \cdot (Pr)^{1/2}}{\left[0.609 + 1.221(Pr)^{1/2} + 1.238 Pr\right]^{1/4}}$$

9 - Corrélations sur le nombre de Nusselt

Convection forcée dans une conduite en régime turbulent

Conduites lisses :

Corrélation de Dittus-Boelter : $Nu = 0.0243 Re^{0.8} \cdot Pr^n$

Échauffement : $n=0.4$; Refroidissement : $n=0.3$

Applicable pour : $L / D > 60$; $10^4 < Re < 1.2 \cdot 10^5$; $0.7 < Pr < 120$

Corrélation de Colburn : $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3}$

Viscosité évaluée à la température de film et nécessite un calcul itératif

Corrélation de Petukhov :

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{\xi}{8} (Pr^{2/3} - 1)}} \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{2/3}\right]$$

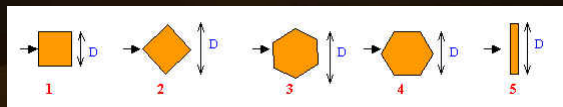
$$\xi = \frac{1}{(182 \log(Re) - 1.64)^2}$$

9 - Corrélations sur le nombre de Nusselt

Convection forcée autour d'un tube cylindrique :

Valeurs de Re	C	m
1 à 40	0,75	0,4
40 à 1000	0,51	0,5
1000 à $2 \cdot 10^5$	0,26	0,6
$2 \cdot 10^5$ à 10^6	0,076	0,7

$$Nu = C \cdot (Re)^m \cdot (Pr)^n \cdot \left(\frac{Pr_0}{Pr_p} \right)^{1/4}$$



10 - Résumé

- Bilan de masse.
- Bilan dynamique.
- Bilan d'énergie.
- Corrélations pour h .
- Applications numériques.