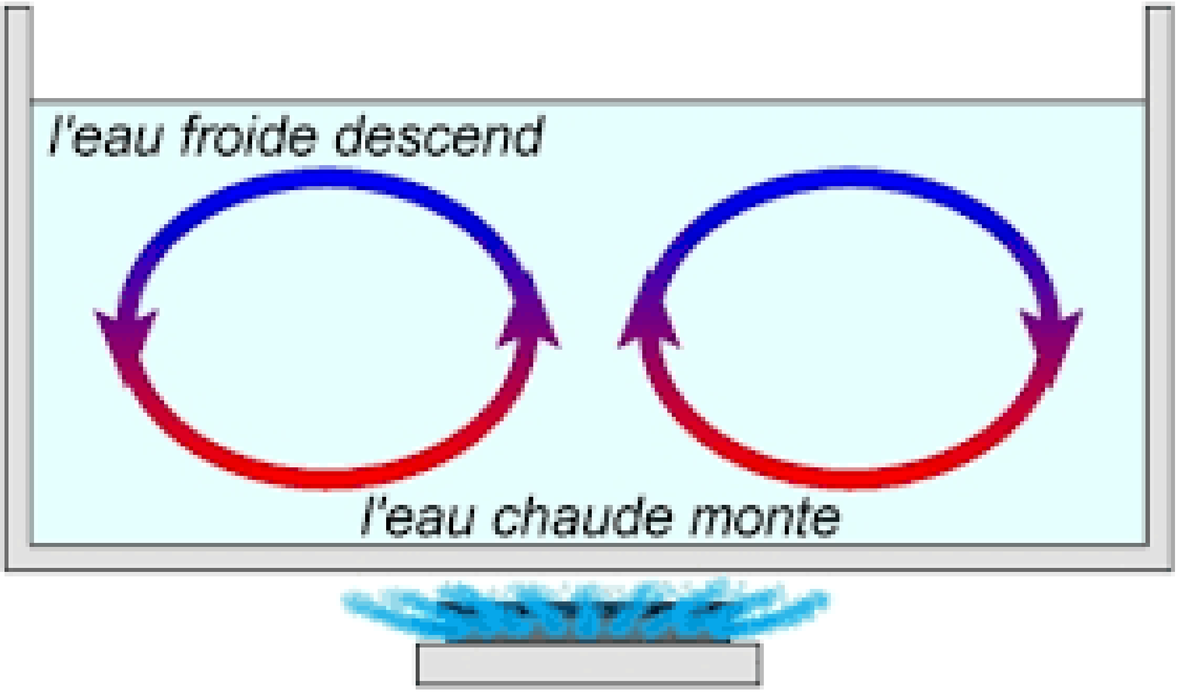
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA 2

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de mécanique

Transferts de chaleur par Convection.



Polycopié de cours destiné aux étudiants de la licence Energétique.

Elaboré par:

Pr. Samir RAHAL

Convection thermique

I. Introduction

Le transfert thermique s'effectue spontanément dès qu'il existe une différence de température entre deux points d'un système ou de deux systèmes différents en absence de changement de phase. Le mécanisme de cette transmission de chaleur s'effectue suivant trois modes : conduction, convection et rayonnement.

S'il y a changement de phase, le transfert se fait à température constante suivant un processus réversible. Dans ce cas, la chaleur de changement de phase est prise en considération (chaleur latente de vaporisation, chaleur latente de condensation, etc.).

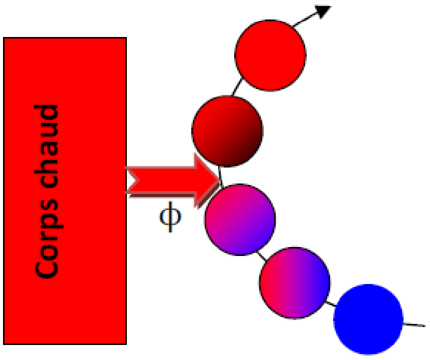
Ce chapitre est consacré à la convection thermique.

En plus au transfert de chaleur par conduction toujours présent dans la matière, il y a dans les fluides un transfert de chaleur provoqué par l'écoulement du fluide, c'est-à-dire par le mouvement d'ensemble des particules qui le composent : ce phénomène est appelé advection.

On peut donc définir la convection comme la réunion de deux modes de transfert de chaleur : la conduction qui s'effectue à l'échelle microscopique et l'advection qui est de nature macroscopique.

Remarque :

- Lorsque le transfert de chaleur s'accompagne d'un transfert de matière, il est appelé transfert par convection.
- Le transfert de chaleur qui s'effectue au sein d'un milieu opaque (généralement des solides) sans déplacement de matière sous l'influence d'une différence de température est la conduction.
- Dans un fluide, il est pratiquement impossible d'assister à de la conduction pure car le moindre gradient de température entraîne des courants de convection, c'est-à-dire un transport de masse.
- L'échange de chaleur par convection existe au sein des milieux fluides ou lorsque un fluide circule autour d'un solide.

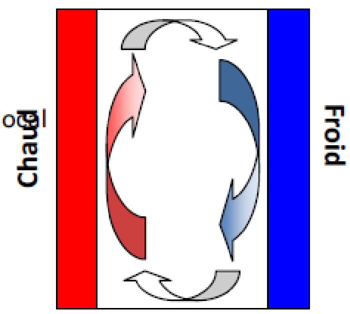


On distingue deux types de convection :

- Convection naturelle ou libre :

La convection naturelle apparaît spontanément. Elle se produit dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température. C'est le cas, dans une pièce où l'air chaud produit au niveau du sol par un convecteur ou un radiateur va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'une force dite poussée d'Archimède.

Convection naturelle dans un local



(Autre exemple : mouvement de l'eau dans une casserole chauffée par une plaque électrique.).

- Convection forcée :

Ce 2ème type de convection se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure indépendante de la différence de température. Par exemple : une pompe ou un ventilateur ou un agitateur ou même le vent.

En convection forcée, la poussée d'Archimède est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement. C'est le cas par exemple du refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau pousse le liquide de refroidissement à travers le moteur puis dans l'échangeur.

Remarque :

Il existe un 3ème type de convection : La convection mixte : se produit s'il y a une cause externe au mouvement du fluide mais insuffisante pour que la poussée d'Archimède puisse être négligée.

I. Détermination du coefficient thermique par convection h entre le fluide et la paroi

1. Echanges convectifs entre un fluide et une paroi

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

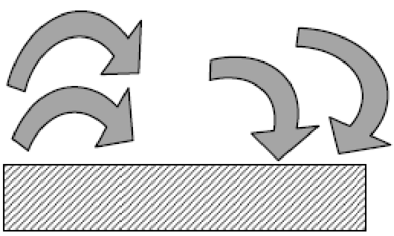
Exemple : transfert de chaleur des parois du moteur vers le liquide de refroidissement ; refroidissement d'un microprocesseur d'un ordinateur ; etc.

En effet, la quantité de chaleur échangée par unité de temps (le flux thermique ϕ) 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.

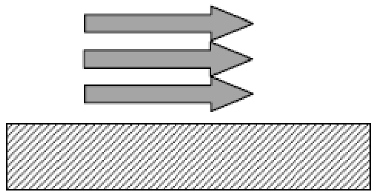
Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement.

On distingue :



- Ecoulement en régime turbulent :
  - ⇨ Pas de direction privilégiée
  - ⇨ Pas unidirectionnel

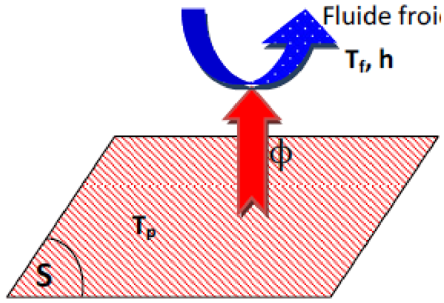
- Ecoulement en régime laminaire :
  - ⇨ Il est unidirectionnel
  - ⇨ Les lignes de courants sont parallèles



2. Loi de Newton

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur ϕ extrait par le fluide froid de température T_f à une paroi de surface S et de température T_p telle que $T_p > T_f$, est donnée par la loi de Newton :

$$\phi = h.S(T_p - T_f)$$



La valeur de h peut dans certains cas s'obtenir analytiquement mais dans beaucoup de cas l'analyse devient extrêmement ardu, voire impossible. On a alors recours à des relations empiriques, c'est-à-dire fondées sur des expériences.

Le coefficient h dépend de plusieurs paramètres et l'échange de chaleur est d'autant plus actif (h plus grand) lorsque :

- La vitesse v d'écoulement du fluide est plus grande [ms^{-1}].
- Sa masse volumique ρ est plus grande [$kg.m^{-3}$].
- Sa chaleur spécifique C_p est plus grande [$J.kg^{-1}.K^{-1}$].
- Sa conductivité thermique est forte [$W.m^{-1}.K^{-1}$].
- Sa viscosité cinématique ν est plus faible [$m^2.s^{-1}$]. Avec $\nu = \mu/\rho$ et μ est la viscosité dynamique [$kg.m^{-1}.s^{-1}$] ~ Po (Poise).

Le coefficient h dépend aussi des dimensions de la paroi, de sa nature et de sa forme.

3. Nombres adimensionnels

La méthode utilisant l'analyse dimensionnelle est la méthode la plus aisée dans sa mise en œuvre pour déterminer l'expression du coefficient de convection h.

Cette analyse dimensionnelle fait apparaitre des nombres sans dimension très utiles dans l'étude de la mécanique des fluides et en particuliers dans les phénomènes convectifs.

Ces nombres sont en particulier :

① Le nombre de Reynolds (Re)

② Le nombre de Nusselt (Nu)

③ Le nombre de Grashof (Gr)

④ Le nombre de Prandtl (Pr)

a. 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 :

$$Re = \frac{v.d}{\vartheta} = \frac{\rho d v}{\mu}$$

v: vitesse du fluide [ms^{-1}].

d: dimension caractéristique de la conduite [m]

$\boldsymbol{\nu}$: viscosité cinématique du fluide [$m^2.s^{-1}$]

ρ: masse volumique du fluide [$kg.m^{-3}$]

$\boldsymbol{\mu}$: viscosité dynamique du fluide [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]

Remarque :

d est le diamètre s'il s'agit d'une conduite circulaire ou diamètre hydraulique dans les autres cas : $\mathbf{d_h=4S/P}$ avec S la surface et P le périmètre.

b. Nombre de Nusselt

Ce nombre 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 $\lambda.S\frac{\Delta T}{d}$

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

Remarque :

Nu est fonction directe de h. Sa connaissance permet de déterminer la valeur de h.

c. Nombre de Grashof

Il caractérise la force de viscosité du fluide :

$$Gr = \frac{g d^3 \beta \, \Delta T}{\vartheta^2}$$

Avec :

- g: accélération de la pesanteur $[m.s^{-2}]$.
- d: dimension caractéristique de la paroi [m].
- $\Delta T = T_p - T_f$: différence de température entre la paroi et le fluide.
- β: facteur de dilatation volumique du fluide $[°C^{-1}]$.

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P$$

Pour un gaz parfait :

$$\beta = \frac{1}{T}$$

d. Nombre de Prandtl

Il caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température.

$$Pr = \frac{\mu \, C_p}{\lambda}$$

- Cp : chaleur spécifique du fluide.

II. Application de la loi de Newton : Convection naturelle, Convection forcée

1. Convection naturelle

a. Méthode pratique de calcul du flux de chaleur en convection naturelle

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels : **Nu = f (Gr, Pr)**

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante :

❶ Calcul des nombres adimensionnels de Gr et de Pr.

❷ Suivant la valeur de Gr, choisir une corrélation expérimentale correspondante à la configuration étudiée.

❸ Calcul de Nu par application de cette corrélation.

❹ Calcul de $h = \frac{\lambda . Nu}{d}$

❺ Calculer le flux chaleur échangé à partir de la relation de Newton

$$\phi = h. S\left(T_p - T_f\right)$$

Remarque :

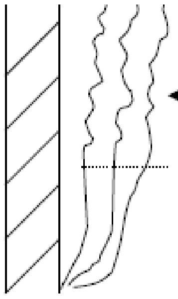
Avant de procéder au calcul de h, il faut bien savoir :

- Si le fluide est liquide ou gaz.
- L'intervalle de température du fluide.
- S'il s'agit d'une convection naturelle ou forcée.
- Si le régime d'écoulement est laminaire ou turbulent.
- Si le fluide est en contact avec une surface plane, ou circule entre deux surfaces planes, ou circule dans un tube, … .

b. Différentes corrélations pour le calcul de h

Nous avons vu que les relations décrivant un problème de convection naturelle peuvent s'écrire sous la forme : Nu = f (Re, Pr). La relation entre ces trois nombres adimensionnels ne peut pas être établie théoriquement mais doit être déterminée expérimentalement. De nombreux résultats obtenus par des scientifiques ont été rassemblés dans la littérature. Ils sont appelés « corrélations expérimentales ». Dans cette partie nous présenterons les corrélations expérimentales les plus usuelles en convection naturelle.

Convection naturelle le long d'une plaque verticale :



Les relations sont de la forme : $\mathbf{Nu = C\ .\ (G_r.P_r\ )^n}$

Avec n= 1/4 pour la convection laminaire
n= 1/3 pour la convection turbulente

Le coefficient C dépend du régime de convection et de la géométrie
convection laminaire $0{,}2 < C < 0{,}6$
convection turbulente $0{,}07 < C < 0{,}15$

Géométrie et Orientation de la paroi	Coefficient de convection laminaire h_c (W/m².°C)	Dimension caractéristique (m)
Plaque verticale dont la hauteur est inférieur à 30 cm (ou cylindre vertical)	$h_c = 1{,}42\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25}$	H : hauteur de la plaque
Plaque verticale dont la hauteur est supérieure à 30 cm (ou cylindre vertical)	$h_c = 1{,}78\ \Delta T^{0.25}$	
Cylindre horizontal	$h_c = 1{,}32\left(\frac{\Delta T}{D_e}\right)^{0,25}$	D_e : diamètre extérieur du cylindre
Plaque horizontale chauffant vers le haut	$h_c = 1{,}32\left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0,25}$	L : largeur de la plaque
Plaque horizontale chauffant vers le bas	$h_c = 0{,}66\left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0,25}$	L : largeur de la plaque
Sphère	$h_c = \left(1{,}14 + \frac{0{,}17}{D}\right)\Delta T^{0,25}$	D : diamètre de la sphère

ΔT = écart de température paroi-air

Autres corrélations :

Les corrélations expérimentales les plus usuelles en convection naturelle sont généralement de la forme :

$Nu = C.Ra^n$ Avec Ra= Gr. Pr

Remarque :

Ra est le nombre de Rayleigh qui est un nombre adimensionnel. En pratique, on utilise le nombre de Rayleigh pour déterminer le régime d'écoulement en convection naturelle.

La valeur du coefficient C dépend de la nature du régime et des fluides. Elle se détermine en calculant Ra, selon la valeur trouvée on choisit les valeurs de c et de n convenables qui sont données dans le tableau suivant :

Géométrie et orientation de la paroi	Dimension caractéristique d	C en convection laminaire : n=1/4	C en convection turbulente : n=1/3
Plaque verticale	Hauteur	0,59 $\mathbf{Ra \leq 10^9}$	0,10 $\mathbf{Ra > 10^9}$
Plaque horizontale chauffant vers le haut	Largeur	0,54 $\mathbf{10^4 \leq Ra \leq 10^7}$	0,15 $\mathbf{10^7 < Ra \leq 10^{11}}$
Plaque horizontale chauffant ver le bas	Largeur	0,27 $\mathbf{10^5 \leq Ra \leq 10^{10}}$	0,54 $\mathbf{10^{10} < Ra \leq 10^{13}}$
Cylindre horizontal	Diamètre extérieur	C = 1,02 et n = 0,148 $\mathbf{10^{-2} \leq Ra \leq 10^2}$	0,135 $\mathbf{2.10^7 < Ra \leq 10^{13}}$
		0,54 $\mathbf{5.10^2 \leq Ra \leq 2 \times 10^7}$	

Corrélations valables pour tous fluides : Nu = C (Gr Pr)^m			
Géométrie	**Gr Pr**	**C**	**m**
Plaques et cylindres verticaux	10^4 - 10^9 10^9 - 10^{13}	0,59 0,021	1/4 2/5
Cylindres horizontaux	10^{-10} - 10^{-2} 10^{-2} - 10^2 10^2 - 10^4 10^4 - 10^7 10^7 - 10^{12}	0,675 1,02 0,850 0,480 0,125	0,058 0,148 0,188 0,25 0,33
Face supérieure d'une plaque chaude ou face inférieure d'une plaque froide	2.10^4 - 8.10^6 8.10^6 - 10^{11}	0,54 0,15	0,25 0,33
Face inférieure d'une plaque chaude ou face supérieure d'une plaque froide	10^5 - 10^{11}	0,27	0,25

2. Convection forcée sans changement de phase

Les corrélations expérimentales les plus usuelles en convection forcée sont généralement de la forme : **Nu = f(Pr, Re).**

Concernant le nombre de Prandtl, qui intervient dans l'expression du nombre de Nusselt, et qui caractérise le fluide en écoulement il doit être déterminé pour une température donnée du fluide. Or, pour qu'il y ait échange de chaleur, la température à la surface et la température du

fluide doivent être différentes, les propriétés du fluide seront tout simplement prises pour la température moyenne T_m :

$$T_m = \frac{T_p + T_f}{2}$$

Exemple (à l'intérieur d'un tube)

Pour $L/D>60$
$10000 < R_e < 120\,000$

pour tous les fluides
$N_u = 0{,}023.R_e^{0,8} . P_r^{0,33}$ Formule de COLBURN

pour un gaz ($P_r \cong 0{,}75$)
$N_u = 0{,}02.R_e^{0,8}$

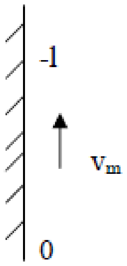
$$R_e = \frac{\rho.v_m.D}{\mu}$$ nombre de REYNOLDS

Caractérise le régime d'écoulement
$R_e < 2000$ écoulement laminaire
$R_e > 3000$ écoulement turbulent

Convection forcée entre un fluide et une plaque

Convection forcée, vitesse v_m , inclinaison quelconque de la plaque :

a) Régime laminaire 1 plaque

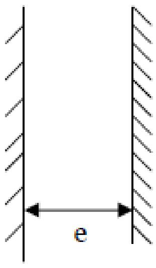


$$\overline{N}_u = \frac{\overline{h}l}{\lambda} \qquad R_e = \frac{\rho.v_m.l}{\mu}$$

$\overline{h}$ = valeur moyenne entre 0 et l

$$\overline{N}_u = \frac{2}{3} . R_e^{\ 0,5} . P_r^{\ 0,33}$$

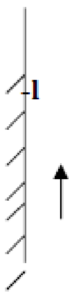
b) Régime laminaire entre 2 plaques



$$N_u = \frac{h.2.e}{\lambda} \qquad R_e = \frac{\rho.v_m.2.e}{\mu}$$

$$\overline{N}_u = 3.4$$

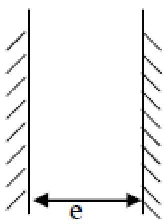
c) Régime turbulent 1 plaque



$$\overline{N}_u = \frac{\overline{h}l}{\lambda}$$

$$\overline{N}_u = \frac{0,036.R_e^{\ 0,8}.P_r}{1 + 0,83\,(P_r^{\ 0,6} - 1)} \qquad \text{avec } R_e = \frac{\rho.v_m.l}{\mu}$$

d) Régime turbulent entre 2 plaques



$$N_u = \frac{h.2.e}{\lambda}$$

$$\overline{N}_u = 0,023.R_e^{\ 0,8}.P_r^{\ 0,33} \qquad \text{avec } R_e = \frac{\rho.v_m.2.e}{\mu}$$

Formule de COLBURN

<u>Autres corrélations :</u>

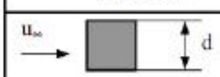
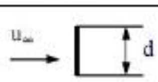
Caractéristiques du fluide calculées à $\theta_f = \dfrac{\theta_p + \theta_\infty}{2}$

<table>
<tr><th>Géométrie</th><th>Corrélation</th></tr>
<tr><td>Ecoulement sur un plan</td><td>
$Nu(x)$: Nu à la distance x du bord du plan
$\overline{Nu_L}$: Nu moyen sur la longueur L du plan

<u>Ecoulement turbulent</u> :
$Nu(x) = 0{,}0288\ Re(x)^{0,8}\ Pr^{1/3}$
$\overline{Nu_L} = 0{,}035\ Re_L^{\ 0,8}\ Pr^{1/3}$ $\quad Re > 5.10^5$ et $Pr \geq 0{,}5$

<u>Ecoulement laminaire</u> :
$Nu(x) = 0{,}324\ Re(x)^{0,5}\ Pr^{1/3}$
$\overline{Nu_L} = 0{,}628\ Re_L^{\ 0,5}\ Pr^{1/3}$ $\quad Re < 5.10^5$ et $10 \geq Pr \geq 0{,}5$
</td></tr>
<tr><td>Ecoulement dans un tube</td><td>
<u>Ecoulement turbulent</u> : $Nu = 0{,}023\ Re^{0,8}\ Pr^n$
$n = 0{,}3$ si $\theta_{fluide} > \theta_{paroi}$
$n = 0{,}4$ si $\theta_{fluide} < \theta_{paroi}$ $\quad Re > 5000$ et $0{,}6 < Pr < 100$
Re calculé pour $D_H = 4S / P$ où : S = section de passage du fluide
P = périmètre de contact fluide/paroi

<u>Ecoulement laminaire</u> : $Nu = 1{,}86\ (Re\ Pr)^{1/3} \left(\dfrac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\dfrac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14}$

Valable pour $Re\ Pr\ \dfrac{D}{L} \geq 10$, μ_p calculé à θ_p
</td></tr>
<tr><td>Ecoulement perpendiculaire à un cylindre circulaire</td><td>
$Nu = C\ Re^n\ Pr^{1/3}$, vitesse u_∞ calculée en amont du tube
<table>
<tr><th>Re</th><th>C</th><th>n</th></tr>
<tr><td>0,4 – 4</td><td>0,989</td><td>0,330</td></tr>
<tr><td>4 – 40</td><td>0,911</td><td>0,385</td></tr>
<tr><td>40 – 4000</td><td>0,683</td><td>0,466</td></tr>
<tr><td>4000 – 40000</td><td>0,193</td><td>0,618</td></tr>
<tr><td>40000 - 250000</td><td>0,0266</td><td>0,805</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Ecoulement perpendiculaire à un cylindre non circulaire</td><td>
<table>
<tr><th>Géométrie</th><th>Re</th><th>C</th><th>n</th></tr>
<tr><td></td><td>$5\ 10^3 - 10^5$</td><td>0,102</td><td>0,675</td></tr>
<tr><td></td><td>$4\ 10^3 - 1{,}5\ 10^4$</td><td>0,228</td><td>0,731</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

Fluides usuellement utilisés :

AIR

Température	Conductivité thermique	Viscosité (*) dynamique	Masse (**) volumique	Chaleur spécifique
T	λ	μ	ρ	C_p
°C	W/m.°C	Pa.s	kg/m^3	J/kg.°C
-20	0,02256			
0	0,02313	$17{,}19\ 10^{-6}$	1,275	1000
20	0,02512			
40	0,02652			
50	0,02680	$19{,}26\ 10^{-6}$		1005
60	0,02791			
80	0,02931			
100	0,03070	$21{,}34\ 10^{-6}$		1009

(*) La viscosité dynamique dont l'unité est le Pa.s souvent dénommée poiseuille (1 poiseuille = 1 Pa.s) est souvent confondue avec la viscosité cinématique ν qui est égale à μ /ρ.

(**) La masse volumique de l'air qui se comporte comme un gaz parfait peut s'écrire dans les conditions normales de pression (P = 101325 Pa) sous la forme

$\rho = \rho_0\ .\ 273/\ (T+273)$ avec ρ_0 masse volumique à 0°C
T température de l'air en °C

(***) Dans le domaine des températures –20, +100°C les paramètres caractéristiques du nombre de Prandtl varient peu pour tous les gaz usuels à la pression atmosphérique. Aussi, est-il courant de prendre pour le nombre de Prandtl une valeur moyenne de 0,75.

EAU

Température	Conductivité thermique	Viscosité (*) dynamique	Masse (**) volumique	Chaleur spécifique
°C	λ W/m.°C	μ 10^{-3} Pa.s	ρ Kg/m^3	C_p J/kg.°C
0	0,555	1,789	1000	4220
5		1,515		
10		1,306		4183
20	0,598	1,005	998	4178
30		0,802		
40	0,627	0,653	992	4178
50		0,550	988	
60	0,651	0,470	983	4191
70		0,406	977,7	
80	0,669	0,355	971,6	4199
90		0,315	965,1	
100 liquide	0,682	0,282	985,1	4216
100 vapeur	0,025	0,012	0,8 kg/Nm^3	1900

Contrairement aux gaz, les propriétés des liquides, et en particulier de l'eau, varient en fonction de la température. C'est le cas par exemple pour la viscosité dynamique.