

Annexe B

Corrélations pour le calcul du coefficient de transfert

Étude de quelques cas de convection

Le présent paragraphe a pour but de fournir et commenter les relations adimensionnelles qui sont le plus fréquemment utilisés en pratique. Nous ne pouvons donner ici une énumération exhaustive de toutes les relations adimensionnelles qui ont été déterminées par des essais sur modèle. Les cas traités ne sont donc que des exemples qui permettent de mettre en lumière l'utilisation rationnelle des notions vues dans les paragraphes précédents.

Or, ce qui importe en général, c'est de connaître le flux thermique qui passe à la paroi du solide vers le fluide, ou le contraire.

$$\phi_p = h (T_p - T_M)$$

Avec

T_p : Température de paroi.

T_P : Température du fluide loin de la paroi.

T_M : Température moyenne du fluide $T_M = \frac{T_P + T_\infty}{2}$

On est donc en bonne voie pour connaître le coefficient de transfert convectif. On a établi que la connaissance de h passe par l'intermédiaire d'un nombre dit de Nusselt dont l'expression, encore à déterminer, n'est fonction que du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl (convection forcée) ou du nombre de Grashofet du nombre de Prandtl (convection naturelle).

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

Convection forcée

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

Convection libre(naturelle)

En raison de la différence dans les caractéristiques d'écoulements pour les régimes *laminaire* et *turbulent*, nous présentons des corrélations propres à chaque cas.

Propriétés physiques de l'eau et de l'air

Propriétés de l'eau à saturation							Propriétés de l'air à 1 atm						
θ	ρ	c_p	λ	$10^4 \cdot \mu$	$10^7 \cdot \alpha$	Pr	θ	ρ	c_p	λ	$10^5 \cdot \mu$	$10^5 \cdot \alpha$	Pr
(°C)	(kg/m ³)	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m ² /s)		(°C)	(kg/m ³)	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m ² /s)	
0	1002	4218	0,552	17,90	1,31	13,06	0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1001	4182	0,597	10,10	1,43	7,02	20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	995	4178	0,628	6,55	1,51	4,34	40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	985	4184	0,651	4,71	1,55	3,02	60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	974	4196	0,668	3,55	1,64	2,22	80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	960	4216	0,680	2,82	1,68	1,74	100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	945	4250	0,685	2,33	1,71	1,45	120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	928	4283	0,684	1,99	1,72	1,24	140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	910	4342	0,680	1,73	1,73	1,10	160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	889	4417	0,675	1,54	1,72	1,00	180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	867	4505	0,665	1,39	1,71	0,94	200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	842	4610	0,652	1,26	1,68	0,89	220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	816	4756	0,635	1,17	1,64	0,88	240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	786	4949	0,611	1,08	1,58	0,87	260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	753	5208	0,580	1,02	1,48	0,91	280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	714	5728	0,540	0,96	1,32	1,02	300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68

Corrélations entre 0 et 100 °C

(θ : température en °C , T température en K)

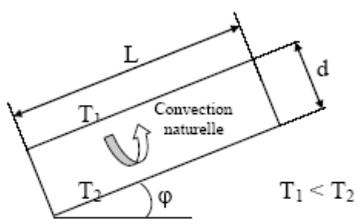
Pour l'air

- $\rho = \frac{353}{(\theta + 273)}$ kg m⁻³
- $c_p = 1008$ J kg⁻¹ °C⁻¹
- $\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \theta + 0,0242$ W m⁻¹ °C⁻¹ $r^2 = 0,9999$
- $\mu = 10^{-5} (0,0046 \theta + 1,7176)$ Pa s $r^2 = 0,9997$
- $\alpha = 10^{-5} (0,0146 \theta + 1,8343)$ m² s⁻¹ $r^2 = 0,9986$
- $Pr = -2,54 \cdot 10^{-4} \theta + 0,7147$ $r^2 = 0,9767$
- $\beta \approx \frac{1}{T}$ K⁻¹

Pour l'eau

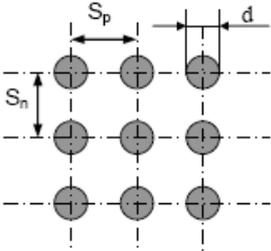
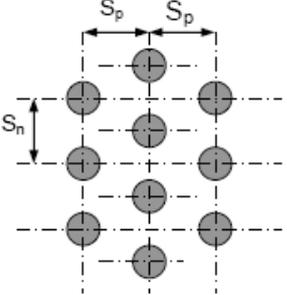
- $\rho = -0,00380 \theta^2 - 0,0505 \theta + 1002,6$ kg m⁻³ $r^2 = 0,9982$
- $c_p = 4180$ J kg⁻¹ °C⁻¹
- $\lambda = -9,87 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 2,238 \cdot 10^{-3} \theta + 0,5536$ W m⁻¹ °C⁻¹ $r^2 = 0,9987$
- $\mu = 10^{-4} (0,00200 \theta^2 - 0,3389 \theta + 17,199)$ Pa s $r^2 = 0,9815$
- $\alpha = 10^{-7} (-0,00360 \theta + 1,340)$ m² s⁻¹ $r^2 = 0,9734$
- $Pr = 1,577 \cdot 10^{-3} \theta^2 - 0,261 \theta + 12,501$ $r^2 = 0,9796$
- $\frac{g\beta\rho^2 c_p}{\mu\lambda} = (0,0105 \theta^2 + 0,477 \theta - 0,0363) 10^9$ °C⁻¹ m⁻³ $r^2 = 0,9992$
- $\log_{10} [p_{sat}(T)] = 20,3182 - \frac{2795}{T} - 3,868 \log_{10}(T)$ mmHg $-50^\circ\text{C} < \theta < 200^\circ\text{C}$
- $L_v = 2495 - 2,346 \theta$ kJ.kg⁻¹ $0^\circ\text{C} < \theta < 100^\circ\text{C}$

Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection naturelle

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	$2 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^6$ $8 \cdot 10^6 - 10^{11}$	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
Cellule fermée rectangulaire inclinée 	$Nu = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708}{Gr Pr \cos \varphi} \right) \left[1 - \frac{1708 (\sin(1,8 \varphi))^{1,6}}{Gr Pr \cos \varphi} \right] +$ $\left[\left(\frac{Gr Pr \cos \varphi}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad \text{si } 0 < \varphi < \varphi^*$ $Nu = (\sin \varphi)^{1/4} Nu(90^\circ) \quad \text{si } \varphi^* < \varphi < 90^\circ$ $Nu = 1 + [Nu(90^\circ) - 1] \sin \varphi \quad \text{si } 90^\circ < \varphi < 180^\circ$ <p style="text-align: center;">Avec $\varphi^* = \tan^{-1}(4800 Pr)$</p>		
Relations simplifiées pour de l'air à pression atmosphérique			
Géométrie	Laminaire $10^4 < Gr Pr < 10^9$	Turbulent $Gr Pr > 10^9$	
Plaque ou cylindre vertical	$h = 1,42 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$	$h = 1,31 (\Delta\theta)^{1/3}$	
Cylindre horizontal	$h = 1,32 \left(\frac{\Delta\theta}{D} \right)^{1/4}$	$h = 1,24 (\Delta\theta)^{1/3}$	
Face supérieure d'une plaque horizontale chaude ou face inférieure d'une plaque froide	$h = 1,32 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$	$h = 1,52 (\Delta\theta)^{1/3}$	
Face inférieure d'une plaque chaude ou face supérieure d'une plaque froide	$h = 0,59 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$	$h = 0,59 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$	

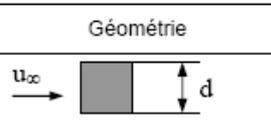
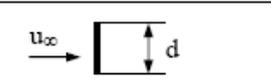
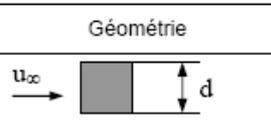
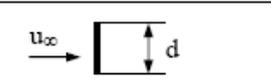
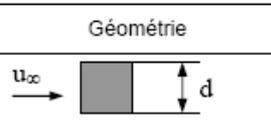
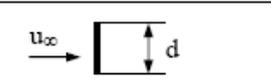
Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée

Caractéristiques du fluide calculée à $\theta_f = \frac{\theta_p + \theta_\infty}{2}$

Géométrie	Corrélation																																																																																																																																						
Ecoulement perpendiculaire à un faisceau de 10 tubes	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">$\frac{S_p}{d}$</th> <th colspan="8">$\frac{S_n}{d}$</th> </tr> <tr> <th colspan="2">1,25</th> <th colspan="2">1,5</th> <th colspan="2">2,0</th> <th colspan="2">3,0</th> </tr> <tr> <th></th> <th>C</th> <th>n</th> <th>C</th> <th>n</th> <th>C</th> <th>n</th> <th>C</th> <th>n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="9" style="text-align: center;">Disposition en ligne</td> </tr> <tr> <td>1,25</td> <td>0,38</td> <td>0,592</td> <td>0,305</td> <td>0,608</td> <td>0,111</td> <td>0,704</td> <td>0,070</td> <td>0,752</td> </tr> <tr> <td>1,5</td> <td>0,407</td> <td>0,586</td> <td>0,278</td> <td>0,620</td> <td>0,112</td> <td>0,702</td> <td>0,075</td> <td>0,744</td> </tr> <tr> <td>2,0</td> <td>0,464</td> <td>0,570</td> <td>0,332</td> <td>0,602</td> <td>0,254</td> <td>0,632</td> <td>0,220</td> <td>0,648</td> </tr> <tr> <td>3,0</td> <td>0,322</td> <td>0,601</td> <td>0,396</td> <td>0,584</td> <td>0,415</td> <td>0,581</td> <td>0,317</td> <td>0,608</td> </tr> <tr> <td colspan="9" style="text-align: center;">Disposition en quinconce</td> </tr> <tr> <td>0,6</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,236</td> <td>0,636</td> </tr> <tr> <td>0,9</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,495</td> <td>0,571</td> <td>0,445</td> <td>0,581</td> </tr> <tr> <td>1,0</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,552</td> <td>0,558</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>1,125</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,531</td> <td>0,565</td> <td>0,575</td> <td>0,560</td> </tr> <tr> <td>1,25</td> <td>0,575</td> <td>0,556</td> <td>0,561</td> <td>0,554</td> <td>0,576</td> <td>0,556</td> <td>0,579</td> <td>0,562</td> </tr> <tr> <td>1,5</td> <td>0,501</td> <td>0,568</td> <td>0,511</td> <td>0,562</td> <td>0,502</td> <td>0,568</td> <td>0,542</td> <td>0,568</td> </tr> </tbody> </table>	$\frac{S_p}{d}$	$\frac{S_n}{d}$								1,25		1,5		2,0		3,0			C	n	C	n	C	n	C	n	Disposition en ligne									1,25	0,38	0,592	0,305	0,608	0,111	0,704	0,070	0,752	1,5	0,407	0,586	0,278	0,620	0,112	0,702	0,075	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	Disposition en quinconce									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
	$\frac{S_p}{d}$		$\frac{S_n}{d}$																																																																																																																																				
		1,25		1,5		2,0		3,0																																																																																																																															
		C	n	C	n	C	n	C	n																																																																																																																														
	Disposition en ligne																																																																																																																																						
	1,25	0,38	0,592	0,305	0,608	0,111	0,704	0,070	0,752																																																																																																																														
	1,5	0,407	0,586	0,278	0,620	0,112	0,702	0,075	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																																																																																																																														
	Disposition en quinconce																																																																																																																																						
	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																																																																																																																															
	 <p style="text-align: center;">Disposition en ligne</p>  <p style="text-align: center;">Disposition en quinconce</p>																																																																																																																																						
Ecoulement perpendiculaire à un faisceau de n rangées de tubes (n ≤ 10)	$N = \frac{h_n}{h_{10}}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nombre rangées</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N en ligne</td> <td>0,64</td> <td>0,80</td> <td>0,87</td> <td>0,90</td> <td>0,92</td> <td>0,94</td> <td>0,96</td> <td>0,98</td> <td>0,99</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>N en quinconce</td> <td>0,68</td> <td>0,75</td> <td>0,83</td> <td>0,89</td> <td>0,92</td> <td>0,95</td> <td>0,97</td> <td>0,98</td> <td>0,99</td> <td>1,0</td> </tr> </tbody> </table>	Nombre rangées	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N en ligne	0,64	0,80	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99	1,0	N en quinconce	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1,0																																																																																																					
Nombre rangées	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																													
N en ligne	0,64	0,80	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99	1,0																																																																																																																													
N en quinconce	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1,0																																																																																																																													

Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée

Caractéristiques du fluide calculée à $\theta_f = \frac{\theta_p + \theta_\infty}{2}$

Géométrie	Corrélation																		
<p align="center">Ecoulement sur un plan</p>	<p>$Nu(x)$: Nu à la distance x du bord du plan \overline{Nu}_L : Nu moyen sur la longueur L du plan</p> <p><u>Ecoulement turbulent</u> :</p> $Nu(x) = 0,0288 Re(x)^{0,8} Pr^{1/3}$ $\overline{Nu}_L = 0,035 Re_L^{0,8} Pr^{1/3}$ <p align="right">Re > 5.10⁵ et Pr ≥ 0,5</p> <p><u>Ecoulement laminaire</u> :</p> $Nu(x) = 0,324 Re(x)^{0,5} Pr^{1/3}$ $\overline{Nu}_L = 0,628 Re_L^{0,5} Pr^{1/3}$ <p align="right">Re < 5.10⁵ et 10 ≥ Pr ≥ 0,5</p>																		
<p align="center">Ecoulement dans un tube</p>	<p><u>Ecoulement turbulent</u> : Nu = 0,023 Re^{0,8} Prⁿ</p> <p>n = 0,3 si $\theta_{fluide} > \theta_{paroi}$ n = 0,4 si $\theta_{fluide} < \theta_{paroi}$ Re > 5000 et 0,6 < Pr < 100</p> <p>Re calculé pour D_H = 4S / P où : S = section de passage du fluide P = périmètre de contact fluide/paroi</p> <p><u>Ecoulement laminaire</u> : Nu = 1,86 (Re Pr)^{1/3} $\left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14}$</p> <p>Valable pour Re Pr $\frac{D}{L} \geq 10$, μ_p calculé à θ_p</p>																		
<p align="center">Ecoulement perpendiculaire à un cylindre circulaire</p>	<p align="center">Nu = C Reⁿ Pr^{1/3} , vitesse u_∞ calculée en amont du tube</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Re</th> <th>C</th> <th>n</th> </tr> </thead> <tbody> <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> </tbody> </table>	Re	C	n	0,4 – 4	0,989	0,330	4 – 40	0,911	0,385	40 – 4000	0,683	0,466	4000 – 40000	0,193	0,618	40000 - 250000	0,0266	0,805
Re	C	n																	
0,4 – 4	0,989	0,330																	
4 – 40	0,911	0,385																	
40 – 4000	0,683	0,466																	
4000 – 40000	0,193	0,618																	
40000 - 250000	0,0266	0,805																	
<p align="center">Ecoulement perpendiculaire à un cylindre non circulaire</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Géométrie</th> <th>Re</th> <th>C</th> <th>n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>5 10³ - 10⁵</td> <td>0,102</td> <td>0,675</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4 10³ - 1,5 10⁴</td> <td>0,228</td> <td>0,731</td> </tr> </tbody> </table>	Géométrie	Re	C	n		5 10 ³ - 10 ⁵	0,102	0,675		4 10 ³ - 1,5 10 ⁴	0,228	0,731						
Géométrie	Re	C	n																
	5 10 ³ - 10 ⁵	0,102	0,675																
	4 10 ³ - 1,5 10 ⁴	0,228	0,731																