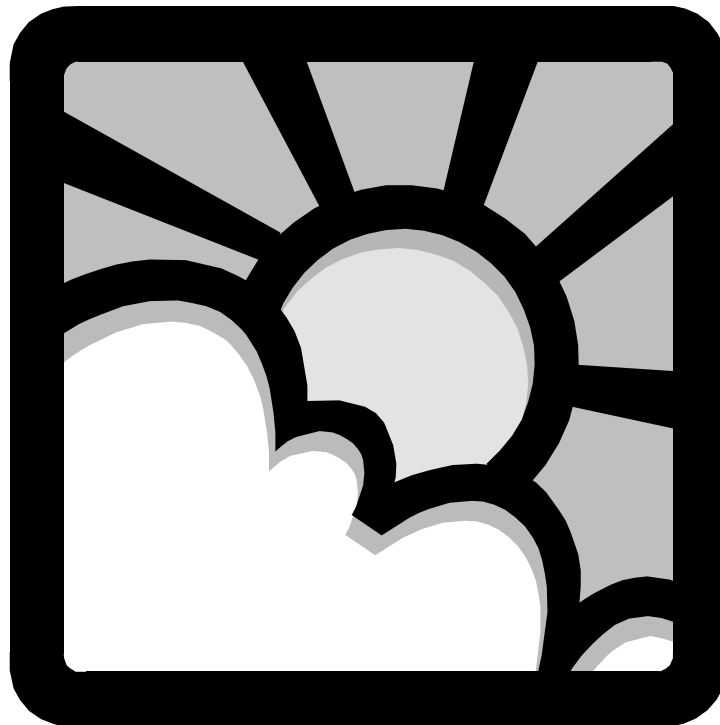


THERMIQUE SOLAIRE

THERMIQUE SOLAIRE



ANNEXES

ANNEXES

Yves JANNOT

Janvier 2008

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| A.1.1 : Propriétés physiques de certains corps | 3 |
| A.1.1 : Propriétés physiques de l'air et de l'eau | 4 |
| A.1.2 : Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée | 5 |
| A.1.3 : Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection naturelle | 7 |
| A.1.4 : Emissivité de certains corps | 8 |
| A.1.5 : Fraction d'énergie $F_{0-\lambda T}$ rayonnée par un corps noir entre 0 et λ | 9 |
| A.1.6 : Facteurs de forme géométrique de rayonnement | 10 |
| A.2.2 : Valeurs de l'albédo..... | 14 |
| A.3.1 : Formules de calcul des pertes de charge singulières..... | 15 |
| A.3.2 : Courbe caractéristique de fonctionnement d'un ventilateur..... | 16 |
| A.5.1 : Activité de l'eau dans certains produits | 17 |
| A.5.3 : Températures maximales de séchage de certains produits..... | 19 |
| A.5.4 : Séchoirs directs couverts à convection naturelle | 21 |
| A.5.5 : Séchoirs solaires indirects à convection naturelle..... | 22 |
| A.5.6 : Séchoirs solaires indirects ventilés | 23 |
| A.5.7: Données météorologiques de Ouagadougou (moyennes 1982-1987)..... | 25 |
| A.5.8 : Données météorologiques de Cotonou | 26 |
| EXERCICES | 27 |

A.1.1 : Propriétés physiques de certains corps

| Nature | θ | ρ | c_p | λ | Nature | θ | ρ | c_p | λ |
|---------------------------------------|----------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | °C | kg m ⁻³ | J kg ⁻¹ °C ⁻¹ | W m ⁻¹ °C ⁻¹ | | °C | kg m ⁻³ | J kg ⁻¹ °C ⁻¹ | W m ⁻¹ °C ⁻¹ |
| Métaux, alliages et céramiques | | | | | Matériaux de construction | | | | |
| Acier au carbone | 20 | 7833 | 465 | 54 | Ardoise | 20 | 2400 | 879 | 2,2 |
| | 200 | | | 48 | Basalte | 20 | 2850 | 881 | 1,6 |
| | 600 | | | 35 | Béton caverneux | 20 | 1900 | 879 | 1,4 |
| Acier inox 15%Cr, 10%Ni | 20 | 7864 | 460 | 20 | Béton plein | 20 | 2300 | 878 | 1,75 |
| Acier inox 18%Cr, 8%Ni | 20 | 7816 | 460 | 16,3 | Bitume (cartonné) | 20 | 1050 | 1305 | 0,23 |
| | 600 | | | 22 | Bois feuillus légers | 20 | 525 | 3143 | 0,15 |
| Acier inox 25%Cr, 20%Ni | 20 | 7864 | 460 | 13 | Bois feuillus mi-lourds | 20 | 675 | 3156 | 0,23 |
| Alumine | 20 | | | 29 | Bois feuillus très légers | 20 | 375 | 3147 | 0,12 |
| Aluminium | 20 | 2707 | 896 | 204 | Bois résineux légers | 20 | 375 | 3147 | 0,12 |
| | 400 | | | 249 | Bois résineux mi-lourds | 20 | 500 | 3160 | 0,15 |
| Argent | 20 | 10525 | 234 | 407 | Bois résineux très légers | 20 | 375 | 3147 | 0,12 |
| Bronze 75%Cu, 25%Sn | 20 | 8666 | 343 | 26 | Brique terre cuite | 20 | 1800 | 878 | 1,15 |
| Carbone | 20 | | | 147 | Calcaire dur | 20 | 2450 | 882 | 2,4 |
| Carbure de silicium | 20 | | | 13 | Calcaire tendre | 20 | 1650 | 879 | 1 |
| Chrome | 20 | 2118 | 7160 | 449 | Carrelage | 20 | 2400 | 875 | 2,4 |
| Constantan 60% Cu, 40%Ni | 20 | 8922 | 410 | 22,7 | Contre-plaqué okoumé | 20 | 400 | 3000 | 0,12 |
| Cuivre | 20 | 8954 | 383,1 | 386 | Contre-plaqué pin | 20 | 500 | 3000 | 0,15 |
| | 400 | | | 363 | Granite | 20 | 2600 | 881 | 3 |
| Duralumin | 20 | 2787 | 883 | 164 | Gravier (vrac) | 20 | 1800 | 889 | 0,7 |
| Etain | 20 | 7304 | 226 | 64 | Grès | 20 | 2500 | 880 | 2,6 |
| Fer | 20 | 7870 | 452 | 73 | Lave | 20 | 2350 | 881 | 1,1 |
| Fonte | 20 | 7849 | 460 | 59 | Marbre | 20 | 2700 | 881 | 2,9 |
| Laiton 70%Cu, 30%Zn | 20 | 8522 | 385 | 111 | Parquet | 20 | 700 | 3143 | 0,2 |
| | 400 | | | 147 | Plâtre | 20 | | | 0,48 |
| Magnésie | 38 | 270 | | 0,067 | Schiste | 20 | 2400 | 879 | 2,2 |
| Or | 20 | 1336 | 19300 | 129 | Matériaux isolants | | | | |
| Platine | 20 | | | 72 | Balsa | 20 | 85 | | 0,054 |
| Plomb | 20 | 11373 | 130 | 35 | Copeaux bois | 23 | | | 0,059 |
| Sodium liquide | 100 | | | 81,5 | Coton | 20 | 80 | 1300 | 0,06 |
| Titane | 20 | | | 16 | Kapok | 30 | | | 0,035 |
| Tungstène | 20 | 19350 | 134 | 163 | Laine de roche | 20 | 20 | 880 | 0,047 |
| Zinc | 20 | 7144 | 384 | 112 | | 20 | 55 | 880 | 0,038 |
| Zircone | 20 | | | 4 | | 20 | 135 | 880 | 0,041 |
| Matériaux divers | | | | | Laine de verre | 20 | 8 | 875 | 0,051 |
| Amiante | 20 | | | 0,16 | | 20 | 10 | 880 | 0,045 |
| Asphalte | 20 | 2115 | 920 | 0,062 | | 20 | 15 | 880 | 0,041 |
| Caoutchouc (naturel) | 20 | 1150 | | 0,28 | | 20 | 40 | 880 | 0,035 |
| Caoutchouc (vulcanisé) | 20 | 1100 | 2010 | 0,13 | Liège expansé | 20 | 120 | 2100 | 0,044 |
| Carton | 20 | 86 | 2030 | 0,048 | Moquette | 20 | 200 | 1300 | 0,06 |
| Cuir | 20 | 998 | | 0,159 | Polyuréthane (mousse rigide) | 20 | 32 | 1300 | 0,03 |
| Glace | 0 | 920 | 2040 | 1,88 | | 20 | 50 | 1360 | 0,035 |
| Papier | 20 | | | 0,48 | | 20 | 85 | 1300 | 0,045 |
| Plexiglass | 20 | 1190 | 1465 | 0,19 | PVC (mousse rigide) | 20 | 30 | 1300 | 0,031 |
| Sable | 20 | 1515 | 800 | 0,2-1,0 | | 20 | 40 | 1300 | 0,041 |
| Sciure | 20 | | | | Polystyrène expansé | 20 | 12 | 1300 | 0,047 |
| Terre mouillée | 20 | 1900 | 2000 | 2 | | 20 | 14 | 1300 | 0,043 |
| Terre sèche | 20 | 1500 | 1900 | 1 | | 20 | 18 | 1300 | 0,041 |
| Verre | 20 | 2700 | 840 | 0,78 | | 20 | 28 | 1300 | 0,037 |

A.1.1 : Propriétés physiques de l'air et de l'eau

| 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

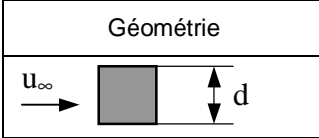
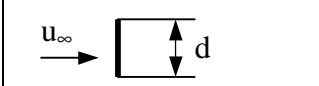
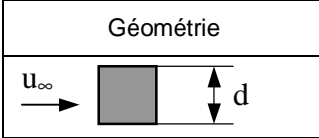
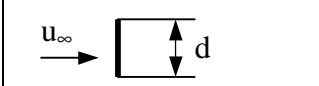
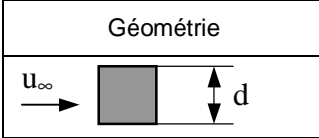
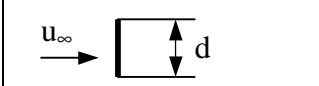
- $\rho = \frac{353}{(\theta + 273)}$ kg m⁻³
- $c_p = 1008$ J kg⁻¹ °C⁻¹
- $\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \theta + 0,0242$ W m⁻¹ °C⁻¹ $r^2 = 0,9999$
- $\mu = 10^{-5} (0,0046 \theta + 1,7176)$ Pa s $r^2 = 0,9997$
- $\alpha = 10^{-5} (0,0146 \theta + 1,8343)$ m² s⁻¹ $r^2 = 0,9986$
- $Pr = -2,54 \cdot 10^{-4} \theta + 0,7147$ $r^2 = 0,9767$
- $\beta \approx \frac{1}{T}$ 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 $-50^\circ\text{C} < \theta < 200^\circ\text{C}$
- $Lv = 2495 - 2,346 \theta$ kJ.kg⁻¹ $0^\circ\text{C} < \theta < 100^\circ\text{C}$

A.1.2 : Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée

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

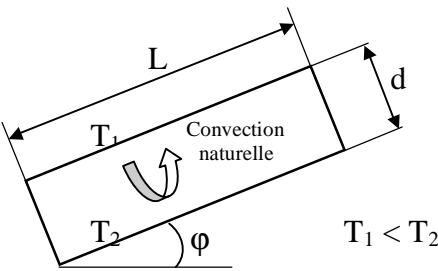
| Géométrie | Corrélation | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----------|-------|---|---------|---|-----------------------|--------|-------|---|---------------------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|----------------|--------|-------|
| <p>Écoulement sur un plan</p> | <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>Écoulement turbulent</u> :</p> <p>$Nu(x) = 0,0288 Re(x)^{0,8} Pr^{1/3}$ $Re > 5 \cdot 10^5$ et $Pr \geq 0,5$ $\overline{Nu}_L = 0,035 Re_L^{0,8} Pr^{1/3}$</p> <p><u>Écoulement laminaire</u> :</p> <p>$Nu(x) = 0,324 Re(x)^{0,5} Pr^{1/3}$ $Re < 5 \cdot 10^5$ et $10 \geq Pr \geq 0,5$ $\overline{Nu}_L = 0,628 Re_L^{0,5} Pr^{1/3}$</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Écoulement dans un tube</p> | <p><u>Écoulement turbulent</u> : $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n$</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>Écoulement 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>Écoulement perpendiculaire à un cylindre circulaire</p> | <p>$Nu = C Re^n Pr^{1/3}$, 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>Écoulement 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>$5 \cdot 10^3 - 10^5$</td> <td>0,102</td> <td>0,675</td> </tr> <tr> <td></td> <td>$4 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4$</td> <td>0,228</td> <td>0,731</td> </tr> </tbody> </table> | Géométrie | Re | C | n |  | $5 \cdot 10^3 - 10^5$ | 0,102 | 0,675 |  | $4 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4$ | 0,228 | 0,731 | | | | | | |
| Géométrie | Re | C | n | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | $5 \cdot 10^3 - 10^5$ | 0,102 | 0,675 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | $4 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4$ | 0,228 | 0,731 | | | | | | | | | | | | | | | | |

A.1.2 : Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée

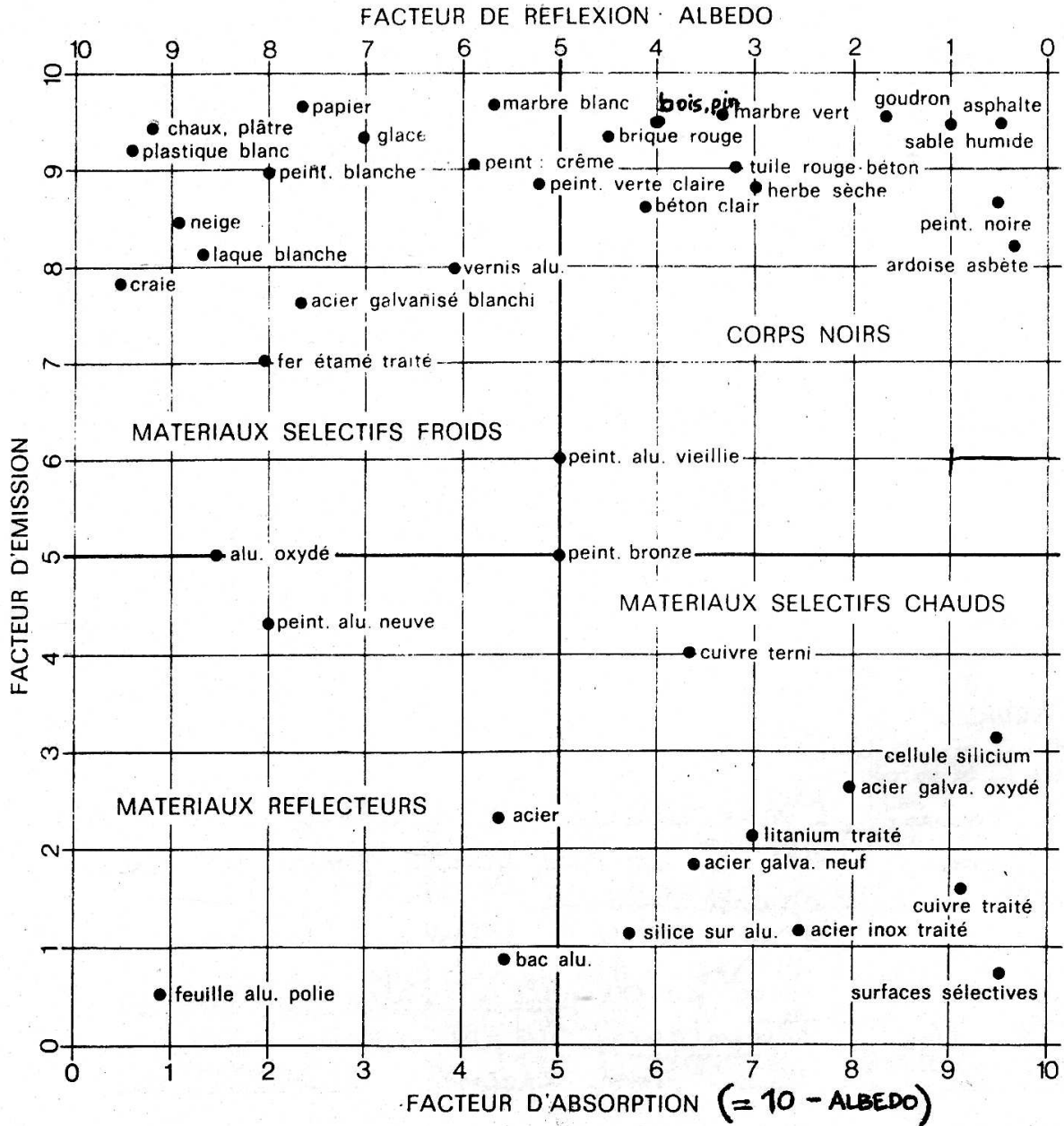
Caractéristiques du fluide calculée à $\theta_f = \frac{\theta_p + \theta_\infty}{2}$

| Géométrie | Corrélation | | | | | | | | | | |
|---|--|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Ecoulement perpendiculaire à un faisceau de 10 tubes | $\frac{S_n}{d}$ | | | | | | | | | | |
| | $\frac{S_p}{d}$ | 1,25 | | 1,5 | | 2,0 | | 3,0 | | | |
| | | C | n | C | n | C | n | C | n | | |
| | Disposition en ligne | | | | | | | | | | |
| | 1,25 | 0,38 6 | 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 | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Disposition en ligne Disposition en quinconce </div> | | | | | | | | | | |
| Ecoulement perpendiculaire à un faisceau de n rangées de tubes (n ≤ 10) | $N = \frac{h_n}{h_{10}}$ | | | | | | | | | | |
| | 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 |

A.1.3 : Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection naturelle

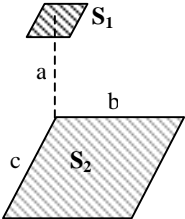
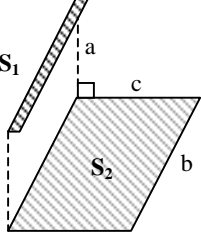
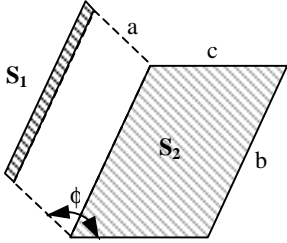
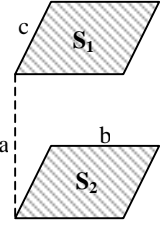
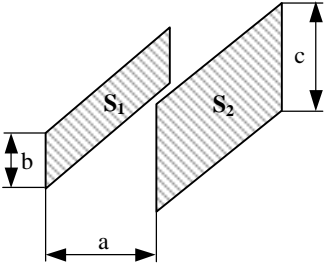
| Corrélations valables pour tous fluides : $Nu = C (Gr Pr)^m$ | | | |
|--|--|--|---|
| Géométrie | Gr Pr | C | m |
| Plaques et cylindres verticaux | $10^4 - 10^9$ $10^9 - 10^{13}$ | 0,59 0,021 | 1/4 2/5 |
| Cylindres horizontaux | $10^{-10} - 10^{-2}$ $10^{-2} - 10^2$ $10^2 - 10^4$ $10^4 - 10^7$ $10^7 - 10^{12}$ | 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 | $h = 0,59 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$ | $h = 0,59 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$ | |

A.1.4 : Emissivité de certains corps

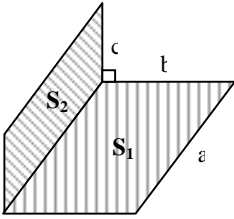
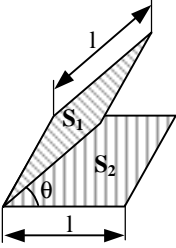
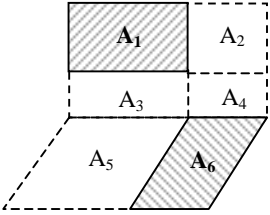
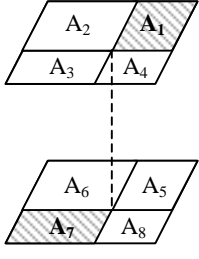
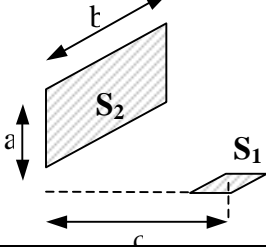


Albédo = facteur de réflexion par rapport au rayonnement solaire ($\lambda < 3 \mu\text{m}$)

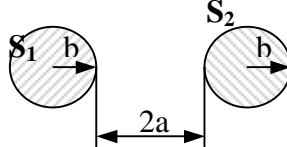
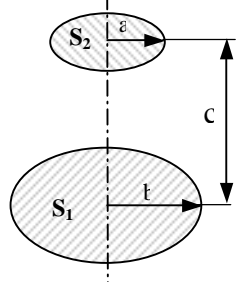
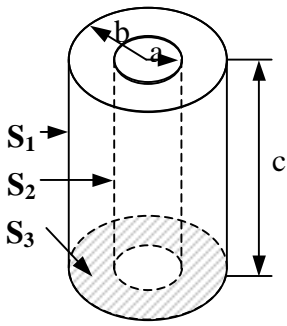
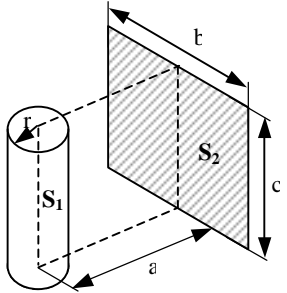
A.1.6 : Facteurs de forme géométrique de rayonnement

| Configuration | Schéma | Valeur du facteur de forme |
|---|---|--|
| Surface élémentaire parallèle à un plan rectangulaire |  | $F_{1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{B}{\sqrt{1+B^2}} \tan^{-1} \frac{C}{\sqrt{1+B^2}} + \frac{C}{\sqrt{1+C^2}} \tan^{-1} \frac{C}{\sqrt{1+C^2}} \right]$ $B = \frac{b}{a}, \quad C = \frac{c}{a}$ |
| Source linéaire parallèle à un plan rectangulaire |  | $F_{1-2} = \frac{1}{\pi B} \left[\sqrt{1+B^2} \tan^{-1} \left(\frac{C}{\sqrt{1+B^2}} \right) - \tan^{-1}(C) + \frac{BC}{\sqrt{1+C^2}} \tan^{-1} \left(\frac{B}{\sqrt{1+C^2}} \right) \right]$ $B = \frac{b}{a}, \quad C = \frac{c}{a}$ |
| Source linéaire parallèle et plan rectangulaire se coupant avec un angle ϕ |  | $F_{1-2} = \frac{1}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & \tan^{-1} B + \frac{\sin^2 \phi}{2B} \ln \left[\frac{B^2 + X^2}{(1+B^2)X^2} \right] \\ & - \frac{\sin 2\phi}{2B} \left[\frac{\pi}{2} - \phi + \tan^{-1} \left(\frac{C - \cos \phi}{\sin \phi} \right) \right] \\ & + \frac{Y}{B} \left[\tan^{-1} \left(\frac{C - \cos \phi}{Y} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi}{Y} \right) \right] \\ & \times \cos \phi + \frac{C \cos \phi - 1}{X} \tan^{-1} \left(\frac{B}{X} \right) \end{aligned} \right\}$ $B = \frac{b}{a}, \quad C = \frac{c}{a}, \quad X = \sqrt{C^2 - 2C \cos \phi + 1}, \quad Y = \sqrt{B^2 + \sin^2 \phi}$ |
| Deux plans parallèles rectangulaires de même aire |  | $F_{1-2} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{BC} \ln \left(\frac{XY}{X+Y-1} \right) + \frac{2\sqrt{X}}{B} \tan^{-1} \left(\frac{C}{\sqrt{X}} \right) + \frac{2\sqrt{Y}}{C} \tan^{-1} \left(\frac{B}{\sqrt{Y}} \right) - \frac{2}{C} \tan^{-1}(B) - \frac{2}{B} \tan^{-1}(C) \right]$ $B = \frac{b}{a}, \quad C = \frac{c}{a}, \quad X = 1+B^2, \quad Y = 1+C^2$ |
| Deux bandes parallèles infinies de largeurs différentes |  | $F_{1-2} = \frac{1}{2B} \left[\sqrt{(B+C)^2 + 4} - \sqrt{(C-B)^2 + 4} \right]$ $F_{2-1} = \frac{1}{2C} \left[\sqrt{(B+C)^2 + 4} - \sqrt{(B-C)^2 + 4} \right]$ $F_{1-2} = F_{2-1} = \frac{1}{B} \left[\sqrt{B^2 + 1} - 1 \right] \quad \text{si } b = c$ $B = \frac{b}{a}, \quad C = \frac{c}{a}$ |

A.1.6 : Facteurs de forme géométrique de rayonnement

| Configuration | Schéma | Valeur du facteur de forme |
|---|---|---|
| Deux plans rectangulaires perpendiculaires ayant un côté commun |  | $F_{1-2} = \frac{1}{\pi B} \left[\frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{\left[\frac{(1+B^2)(1+C^2)}{1+B^2+C^2} \right] \left[\frac{B^2(1+B^2+C^2)}{(1+B^2)(B^2+C^2)} \right]^{B^2}}{\left[\frac{C^2(1+B^2+C^2)}{(1+C^2)(B^2+C^2)} \right]^{C^2}} \right\} + B \tan^{-1} \frac{1}{B} + C \tan^{-1} \frac{1}{C} - \sqrt{B^2+C^2} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{B^2+C^2}} \right) \right]$ $B = \frac{b}{a}, C = \frac{c}{a} ; F_{1-2} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{c}{b} - \sqrt{1 + \left(\frac{c}{b} \right)^2} \right] \text{ si } a \rightarrow \infty$ |
| Deux plans identiques ayant un côté commun |  | $F_{1-2} = F_{2-1} = 1 - \sin \frac{\theta}{2}$ |
| Deux rectangles perpendiculaires |  | $F_{1-6} = \frac{A_6}{A_1} \left\{ \frac{1}{2 A_6} \left[(A_1 + A_2 + A_3 + A_4) F_{1234-56} - A_6 F_{6-24} \right] - A_5 F_{5-13} \right. \\ \left. - \frac{1}{2 A_6} \left[(A_3 + A_4) F_{34-56} - A_6 F_{6-4} - A_5 F_{5-3} \right] \right\}$ |
| Deux rectangles parallèles |  | $F_{1-7} = \frac{1}{4 A_1} \left(A_{1234} F_{1234-5678} + A_1 F_{1-5} \right) + \frac{1}{4 A_1} \left(A_2 F_{2-6} + A_3 F_{3-7} + A_4 F_{4-8} \right) - \frac{1}{4 A_1} \left(A_{12} F_{12-56} + A_{14} F_{14-58} + A_{34} F_{34-78} + A_{23} F_{23-67} \right)$ |
| Surface élémentaire perpendiculaire à une surface |  | |

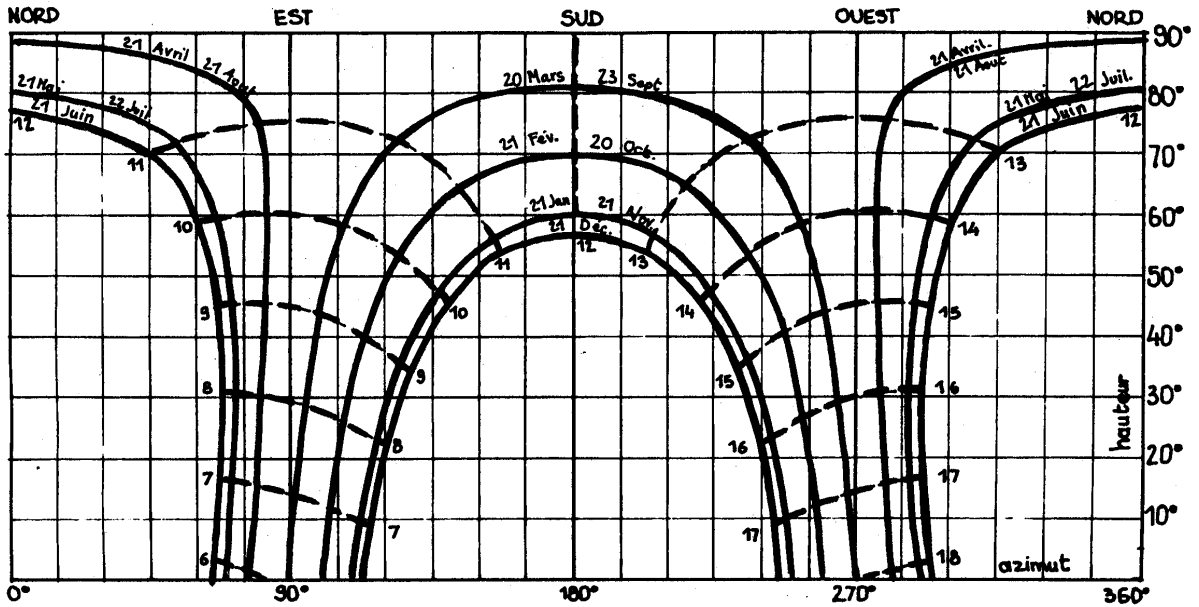
A.1.6 : Facteurs de forme géométrique de rayonnement

| Configuration | Schéma | Valeur du facteur de forme |
|---|---|---|
| Deux cylindres infinis à axes parallèles |  | $X = 1 + \frac{a}{b}$ $F_{1-2} = \frac{2}{\pi} \left[\sqrt{X^2 - 1} - X + \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) \right]$ |
| Deux disques parallèles |  | $F_{1-2} = \frac{1}{2} \left[Z - \sqrt{Z^2 - 4X^2 Y^2} \right]$ $X = \frac{a}{c} ; Y = \frac{c}{b} ; Z = 1 + (1 + X^2) Y^2$ |
| Deux cylindres finis coaxiaux |  | $X = \frac{b}{a} ; Y = \frac{c}{a} ; A = Y^2 + X^2 - 1 ; B = Y^2 - X^2 + 1$ $F_{1-2} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \left(\frac{B}{A} \right) - \frac{1}{2Y} \left(\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \left(\frac{B}{XA} \right) \right) \right]$ $F_{1-1} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left(\frac{2\sqrt{X^2 - 1}}{Y} \right) - \left[\frac{Y}{2\pi X} \left(\frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left(\frac{4(X^2 - 1) + \frac{Y^2}{X^2}(X^2 - 2)}{Y^2 + 4(X^2 - 1)} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{X^2 - 2}{X^2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} - 1 \right) \right) \right]$ $F_{1-3} = \frac{1}{2} (1 - F_{1-2} - F_{1-1})$ |
| Un plan rectangulaire et un cylindre à axe situé dans le plan médian au rectangle |  | $F_{1-2} = \frac{2}{Y} \int_0^{Y/2} \frac{X}{X^2 + \beta^2} - \frac{X}{\pi(X^2 + \beta^2)} \left[\cos^{-1} \left(\frac{W}{V} \right) - \frac{1}{2Z} \left[\sqrt{V^2 + 4Z} \right] \right] \times \cos^{-1} \left(\frac{W}{V \sqrt{X^2 + \beta^2}} \right) + W \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{X + \beta^2}} \right) - \frac{\pi V}{2} \right] d\beta$ $X = \frac{a}{r}, Y = \frac{b}{r}, Z = \frac{c}{r}, V = X^2 + Z^2 + \beta^2 - 1, W = Z^2 - X^2 - \beta^2 + 1$ |

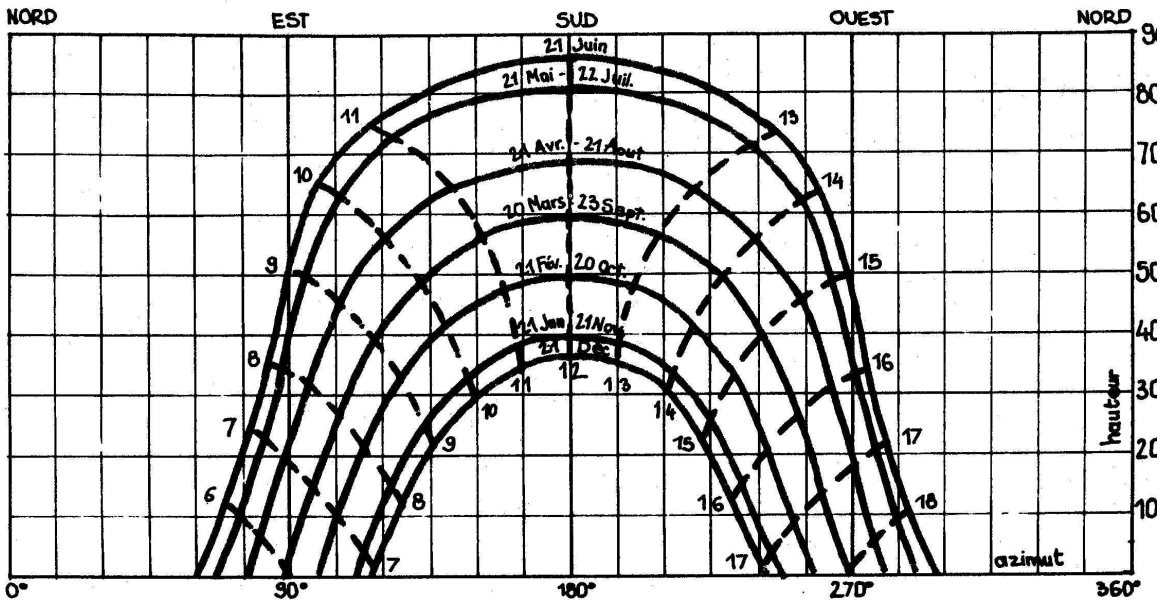
A.2.1 : DIAGRAMME SOLAIRE CYLINDRIQUE

Détermination de l'azimut a et de la hauteur h en fonction de la latitude L

Latitude : 10° Nord



Latitude : 30° Nord



A.2.2 : Valeurs de l'albédo

(Coefficient de réflexion global vis-à-vis du rayonnement solaire)

Valeurs de l'albedo pour le rayonnement solaire global

| | Albedo |
|---|-------------|
| TERRE (Planète) | 0,20 à 0,60 |
| SOL | |
| Couverture de neige fraîche | 0,80 à 0,90 |
| Couverture de neige tassée et vieillie | 0,50 à 0,70 |
| Terre cultivée nue | 0,08 à 0,25 |
| Prairie et herbages verts | 0,12 à 0,25 |
| Terre sableuse | 0,15 à 0,25 |
| Sable clair, sec ou mouillé | 0,25 à 0,45 |
| Forêts d'arbres à feuilles caduques en été | 0,10 à 0,20 |
| Forêts d'arbres à feuillage persistant en été | 0,05 à 0,15 |
| Forêt et neige | 0,25 à 0,50 |
| Herbe et végétation sèche | 0,28 à 0,33 |
| ETENDUES D'EAU (MERS, LACS) | |
| Eau parfaitement calme, $h > 30^\circ$ | 0,06 à 0,02 |
| Eau parfaitement calme, $h < 10^\circ$ | 0,35 à 0,60 |
| Mers et océans, $h > 30^\circ$ | 0,02 à 0,05 |
| Mers et océans, $h < 10^\circ$ | 0,02 à 0,20 |
| Vastes surfaces glacées | 0,25 à 0,40 |
| MATERIAUX DIVERS | |
| Argent poli | 0,94 |
| Argent oxydé | 0,50 |
| Aluminium poli | 0,97 |
| Aluminium oxydé | 0,85 |
| Béton | 0,50 |
| Charbon | 0,15 |
| Graviers | 0,25 |
| Asphalte | 0,18 |
| Chaux blanche | 0,75 |
| Papier blanc | 0,85 |
| Peintures blanches | 0,90 |
| Peintures noires mates | 0,07 |
| Verre à vitres | 0,10 |
| Plâtre blanc sec | 0,90 |
| Fibrociment | 0,20 |
| NUAGES | |
| Stratiformes | 0,40 à 0,75 |
| Cumuliformes | 0,60 à 0,85 |

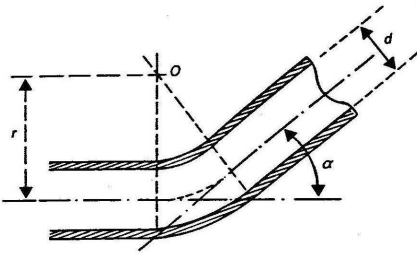
A.3.1 : Formules de calcul des pertes de charge singulières

Pertes de charges par changement de direction

$$\Delta p = R \frac{\rho u^2}{2}$$

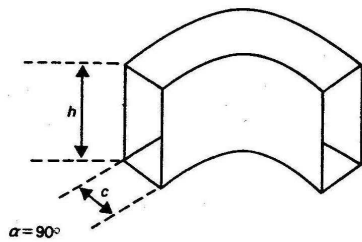
Avec : ρ masse volumique du fluide
 u vitesse du fluide
 R coefficient donné dans les tableaux ci-dessous.

Conduites circulaires



| $\frac{r}{d}$ \ α | 10° | 20° | 45° | 60° | 90° | 120° |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0,5 | 0,18 | 0,33 | 0,59 | 0,70 | 0,86 | 0,97 |
| 0,6 | 0,13 | 0,26 | 0,48 | 0,55 | 0,68 | 0,72 |
| 0,8 | 0,10 | 0,19 | 0,33 | 0,39 | 0,48 | 0,52 |
| 1 | 0,07 | 0,15 | 0,27 | 0,32 | 0,38 | 0,43 |
| 2 | 0,04 | 0,09 | 0,17 | 0,19 | 0,23 | 0,26 |
| 5 | 0,03 | 0,05 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,16 |
| 10 | 0,03 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,14 |

Conduites rectangulaires



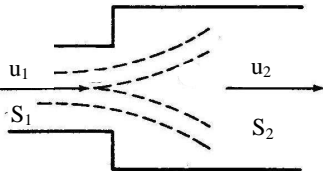
| $\frac{h}{c}$ \ $\frac{r}{d}$ | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,5 |
|-------------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| 0,5 | 1,3 | 0,8 | 0,55 | 0,41 | 0,3 | 0,2 |
| 1 | 1 | 0,65 | 0,44 | 0,35 | 0,25 | 0,16 |
| 2 | 0,8 | 0,5 | 0,35 | 0,28 | 0,2 | 0,13 |

Coefficient multiplicateur k à appliquer à R pour $\alpha \neq 90^\circ$

| α | 15° | 30° | 45° | 60° | 90° | 135° | 180° |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| k | 0,31 | 0,53 | 0,69 | 0,81 | 1,00 | 1,21 | 1,34 |

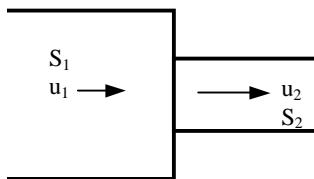
Pertes de charges par changement brusque de direction

Elargissement brusque



$$\Delta p = \rho \frac{(u_1 - u_2)^2}{2} = \rho \left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right) \frac{u_1^2}{2}$$

Rétrécissement brusque



$$\Delta p = R \frac{\rho u_2^2}{2}$$

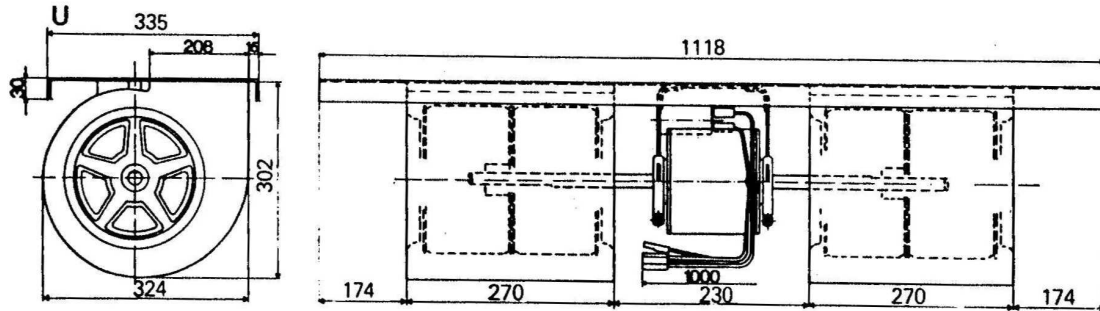
| S_1/S_2 | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-----------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|---|
| R | 1,5 | 1,45 | 1,35 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 0,5 | 0 |

A.3.2 : Courbe caractéristique de fonctionnement d'un ventilateur

Série 3FGB - CO - 370 - 70 - 3V/4



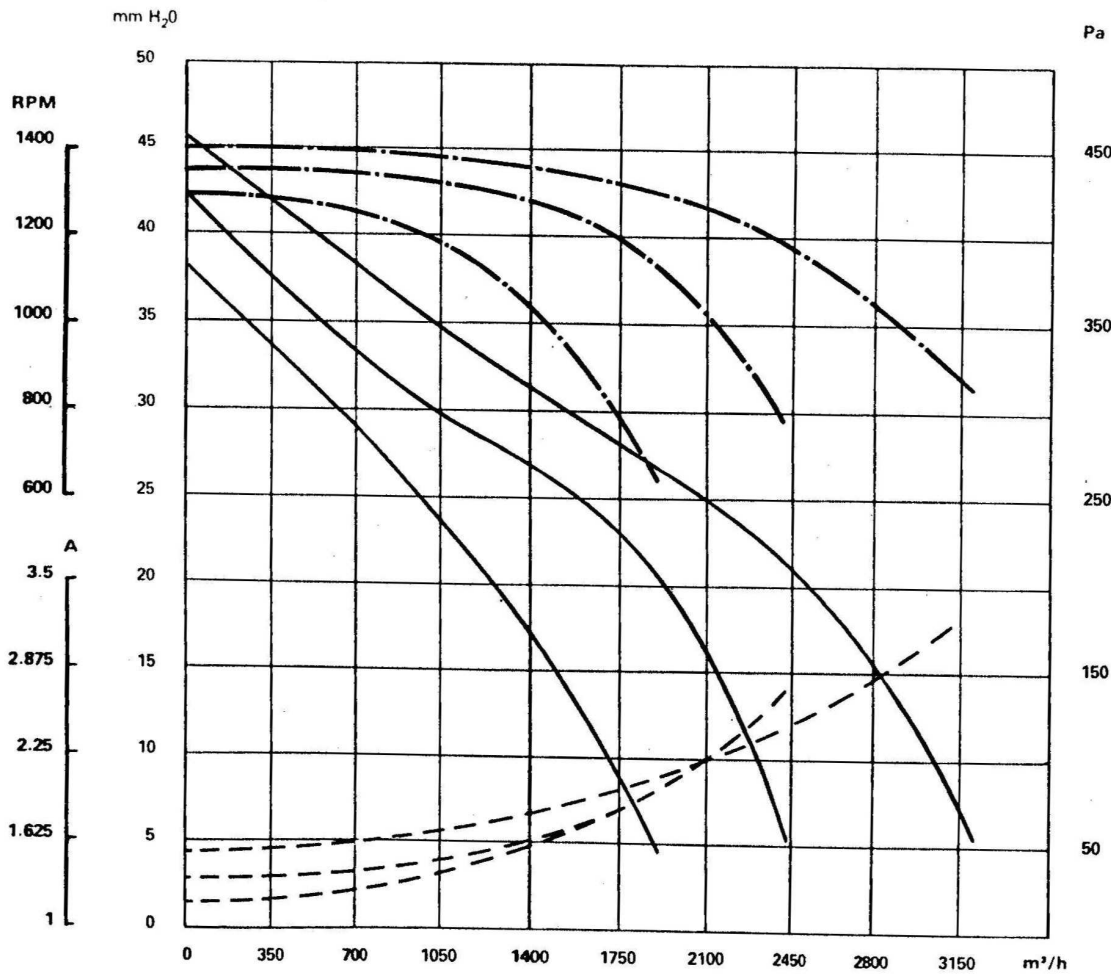
12.21.1032



Moteur : 3FGB-370-70/4
 Isolation : Classe F
 Tension : 220 V 50 Hz
 Intensité : 2,6 A

Construction : ouverte
 Puissance : 350 W
 Tours/mn : 1300

Turbines : 2 x 215 x 220
 Type : 2 VPR Tôle galvanisée
 Volute : Tôle galvanisée



A.5.1 : Activité de l'eau dans certains produits

| Valeur de a_w | Germes inhibés à la limite inférieure de chaque intervalle | Exemples d'aliments se situant dans l'intervalle correspondant de a_w |
|-----------------|--|---|
| 1,00-0,95 | Bacilles gramspores bactériennes, quelques levures | Aliments contenant 40% en poids de saccharose ou 7% de NaCl, par ex. diverses saucisses cuites, miettes de pain |
| 0,95-0,91 | La plupart des coques : lactobacille, forme végétatives de Bacillaceae, quelques moisissures | Aliments à 5% de saccharose ou à 12% de NaCl, par ex ; jambon cru sec, fromage type Hollande mi-vieux |
| 0,91-0,87 | La plupart des levures | Aliments à 65% de saccharose (à saturation) ou à 15% de NaCl par ex. saucisson sec, fromage type Hollande vieux |
| 0,87-0,80 | La plupart des moisissures, Staph. Aureus | Farine, riz, légumes secs... renfermant 15 à 17% d'humidité, cake, lait concentré sucré |
| 0,80-0,75 | La plupart des bactéries halophiles | Aliments à 26% de NaCl (à saturation), pâte d'amandes renfermant 15 à 17% d'humidité, confitures et marmelades |
| 0,75-0,65 | Moisissures xérophiles | Flocons d'avoine renfermant environ 10% d'humidité |
| 0,65-0,60 | | Fruits déshydratés renfermant 15 à 20% d'humidité, caramels mous et bonbons renfermant environ 8% d'humidité |
| 0,50 | | Pâtes alimentaires avec environ 12% d'humidité, épices avec environ 10% d'humidité |
| 0,40 | | Œufs entiers en poudre avec environ 5% d'humidité |
| 0,30 | | Biscuits, chapelure, croûte de pain avec 3 à 5% d'humidité |
| 0,20 | | Lait entier en poudre à 2 à 3% d'humidité, légumes déshydratés avec 5% d'humidité, flocons de maïs avec 5% d'humidité |

A.5.2 : Humidité relative imposée par des solutions salines saturées

| T (°C) | CeF | LiBr | KOH | LiCl | KCH ₃ CO | KF | MgCl ₂ | K ₂ CO ₃ |
|--------|-----|------|------|------|---------------------|------|-------------------|--------------------------------|
| 0 | | 7,8 | | 11,2 | | | 33,7 | 43,1 |
| 5 | 5,5 | 7,4 | 14,3 | 11,3 | | | 33,6 | 43,1 |
| 10 | 4,9 | 7,1 | 12,3 | 11,3 | 23,4 | | 33,5 | 43,1 |
| 15 | 4,3 | 6,9 | 10,7 | 11,3 | 23,4 | | 33,3 | 43,2 |
| 20 | 3,8 | 6,6 | 9,3 | 11,3 | 23,1 | | 33,1 | 43,2 |
| 25 | 3,4 | 6,4 | 8,2 | 11,3 | 22,5 | 30,9 | 32,8 | 43,2 |
| 30 | 3,0 | 6,2 | 7,4 | 11,3 | 21,6 | 27,3 | 32,4 | 43,2 |
| 35 | 2,7 | 6,0 | 6,7 | 11,3 | | 24,6 | 32,1 | |
| 40 | 2,4 | 5,8 | 6,3 | 11,2 | | 22,7 | 31,6 | 42,3 |
| 45 | 2,2 | 5,7 | 5,9 | 11,2 | | 21,5 | 31,1 | |
| 50 | 2,1 | 5,5 | 5,7 | 11,1 | | 20,8 | 30,5 | 45,6 |
| 55 | 2,0 | 5,4 | 5,6 | 11,0 | | 20,6 | 29,9 | |
| 60 | 2,0 | 5,3 | 5,5 | 11,0 | | 20,8 | 29,3 | 45,0 |
| 65 | 2,1 | 5,3 | 5,4 | 10,9 | | 21,2 | 28,5 | |
| 70 | 2,2 | 5,2 | 5,3 | 10,8 | | 21,7 | 27,8 | |
| 75 | 2,4 | 5,2 | | 10,6 | | 22,3 | 26,9 | |
| 80 | 2,6 | 5,2 | | 10,5 | | 22,9 | 26,1 | |
| 85 | | 5,2 | | 10,4 | | 23,2 | 25,1 | |
| 90 | | 5,3 | | 10,2 | | 23,3 | 24,1 | |
| 95 | | 5,3 | | | | | 23,1 | |
| 100 | | 5,4 | | | | | 21,1 | |

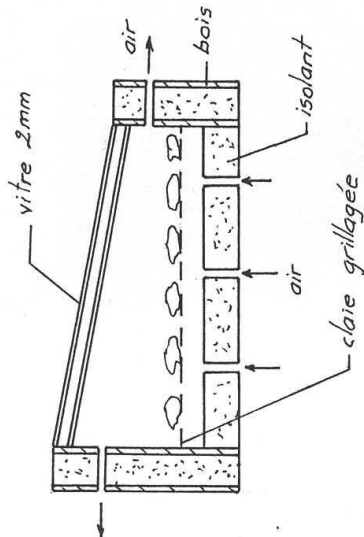
| T (°C) | Mg(NO ₃) ₂ | NaBr | CuCl ₂ | CoCl ₂ | KI | NaCl | KCl | K ₂ SO ₄ |
|--------|-----------------------------------|------|-------------------|-------------------|-------|------|------|--------------------------------|
| 0 | 60,3 | | | | | 75,5 | 88,6 | 98,8 |
| 5 | 58,9 | 63,5 | | | 73,3 | 75,7 | 87,7 | 98,5 |
| 10 | 57,4 | 62,2 | | | 72,11 | 75,7 | 86,8 | 98,2 |
| 15 | 55,9 | 60,7 | | | 70,98 | 75,6 | 85,9 | 97,9 |
| 20 | 54,4 | 59,1 | 68,4 | | 69,9 | 75,5 | 85,1 | 97,6 |
| 25 | 52,9 | 57,6 | | 64,9 | 68,86 | 75,3 | 84,3 | 97,3 |
| 30 | 51,4 | 56,0 | 68,6 | 61,8 | 67,89 | 75,1 | 83,6 | 97,0 |
| 35 | 49,9 | 54,6 | | 58,6 | 66,96 | 74,9 | 83,0 | 96,7 |
| 40 | 48,4 | 53,2 | 68,0 | 55,5 | 66,09 | 74,7 | 82,3 | 96,4 |
| 45 | 46,9 | 52,0 | | 52,6 | 65,26 | 74,5 | 81,7 | 96,1 |
| 50 | 45,4 | 50,9 | 65,5 | 50,0 | 64,49 | 74,4 | 81,2 | 95,8 |
| 55 | | 50,2 | | 48,0 | 63,78 | 74,4 | 80,7 | |
| 60 | | 49,7 | 63,3 | 46,7 | 63,11 | 74,5 | 80,3 | 95,7 |
| 65 | | 49,5 | | 46,3 | 62,5 | 74,7 | 79,9 | |
| 70 | | 49,7 | | 47,0 | 61,93 | 75,1 | 79,5 | |
| 75 | | 50,3 | | 48,8 | 61,43 | 75,6 | 79,2 | |
| 80 | | 51,4 | | 52,0 | 60,97 | 76,3 | 78,9 | |
| 85 | | | | | 60,56 | | 78,7 | |
| 90 | | | | | 60,21 | | 78,5 | |

A.5.3 : Températures maximales de séchage de certains produits

| Produits | Humidité initiale (%) base humide | Humidité finale (%) base humide | Température maximale (°C) | Prétraitements |
|---------------------------------------|--|--|------------------------------|------------------------|
| 1. Paddy, cru | 22-24 | 11 | 50 | Cuisson à demi |
| 2. Paddy demi-cuit | 30-35 | 13 | 50 | |
| 3. Maïs | 35 | 15 | 60-80 | |
| 4. Blé | 20 | 16 | 45 | |
| 5. Millet | 21 | 14 | | |
| 6. Haricots | | 15 | | |
| 7. Pois verts | 80 | 5 | 65 | Blanchiment |
| 8. Choux fleurs | 80 | 6 | 65 | Découpage |
| 9. Carottes | 70 | 5 | 75 | Découpage, Blanchiment |
| 10. Haricots verts | 70 | 5 | 75 | Blanchiment |
| 11. Oignons, ail | 80 | 4 | 55 | Découpage |
| 12. Choux | 80 | 4 | 55 | Eminçage, Blanchiment |
| 13. Patates douces | 75 | 7 | 75 | Morceaux |
| 14. Pommes de terre | 75 | 13 | | Morceaux |
| 15. Légumes feuilles (épinards...) | 80 | 10 | | |
| 16. Piment | | | 65 | |
| 17. Manioc | 62 | 5 | | Morceaux |
| 18. Prunes | | 17 | 77 | Soufrage |
| 19. Pommes | | 25 | 70 | Découpage |
| 20. Abricot, pêche | 85 | 24 | 55 | Découpage, Soufrage |
| 21. Raisin | 80 | 18 | 70 | Soufrage |
| 22. Banane | | 15-20 | 70 | Coupe longitudinale |
| 23. Goyave | | 15 | 65 | Découpe, Egrenage |
| 24. Figue | | 7 | 45-50-65-70 | Soufrage |
| 25. Thé | | 24 | 36 | |
| 26. Café | 50-52 | | | Trempage, Pelage |
| 27. Fèves de cacao | 50 | 11 | 55 | Fermentation |
| 28. Coton | | 7-8 | | |
| 29. Graines de coton | | 9 | | |
| 30. Copra | 30 | 8 | | Découpage |
| 31. Arachides | 40 | 5 | | |
| 32. Epices | | 9 | 90 | |
| 33. Noix de cajou | | | 90 | |
| 34. Poissons | | | 45-50 | |
| 35. Cocon de ver à soie | 68-70 | 10-12 | 80 | |
| 36. Briques | 16 | | 70 | |
| 37. Bois : | | | | |
| Feuillus | 25-35 | 17-20 | 40-50 | |
| Conifères | 30-40 | 10-15 | 40-50 | |
| Bois trempé | 60 | 12 | 40-50 | |
| 38. Cuir | 50-65 | 18 | 30-35 | Tannage |
| 39. Tissu, fil | 50 | | 75 | |

A.5.4 : Séchoirs directs couverts à convection naturelle

Séchoir expérimenté à Barbade
par l'institut Brace :



surface : 0,72 m²

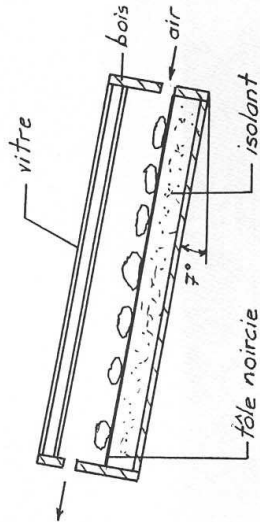
capacité : 1,5 à 2 kg produit

frais / jour

température : jusqu'à 88 °C

contrôle par ouverture
des portes.

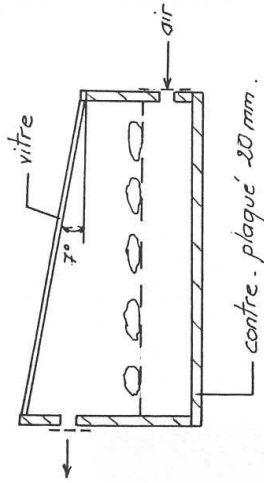
Séchoir expérimenté au Brésil
par l'institut Brace :



surface : 2 m²

coût : 20 000 FCFA (1978).

Séchoir réalisé à l'EN5IAAC
Ngaoundéré, Cameroun.



surface : 0,32 m²

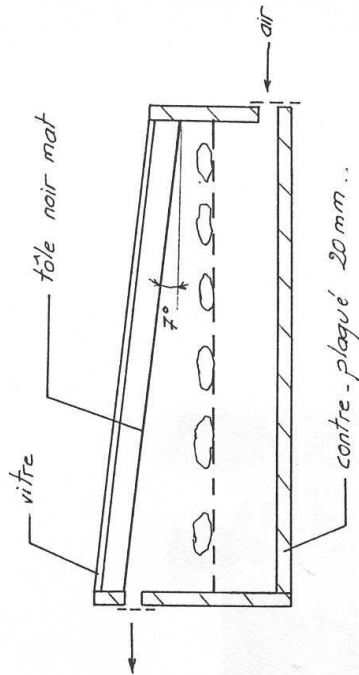
coût : 45 000 FCFA / m²

capacité : 5 à 6 kg de produit
frais / m² séché en
3 jours.

température : jusqu'à 65 °C.

A.5.5 : Séchoirs solaires indirects à convection naturelle

Séchoir réalisé à l'ENSIAC, Cameroun.



surface : claie : $0,32 \text{ m}^2$

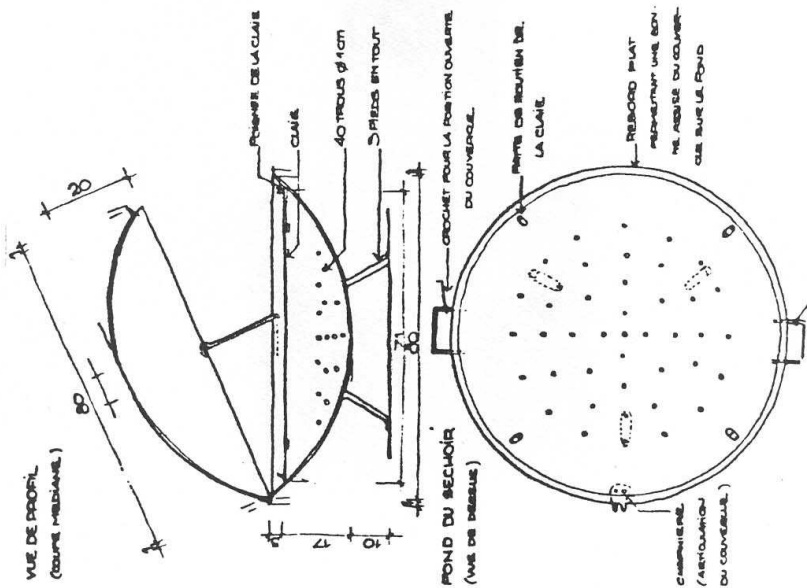
coût : $\approx 50000 \text{ FCFA/m}^2$

capacité : séchage de 5 à 6 kg de produit frais / m^2 en 3 jours

température : produit : $< 55^\circ\text{C}$

plaque : $80 - 90^\circ\text{C}$

Séchoir coquille du GRET

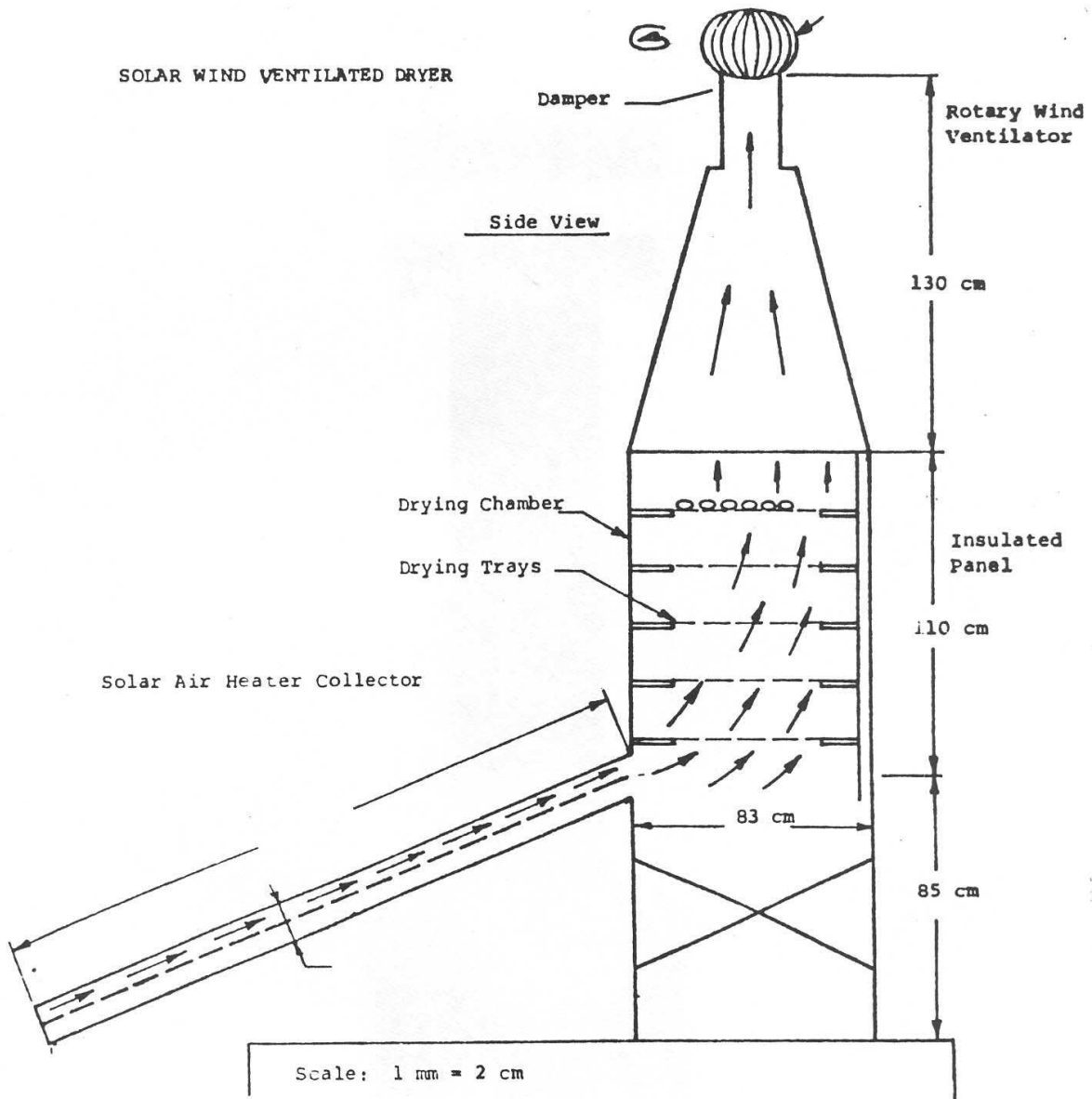


surface : claie : $0,25 \text{ m}^2$, captair : $0,32 \text{ m}^2$

capacité : $0,5$ à 1 kg produit frais / jour.

température : $+15^\circ\text{C}$ max. / air ambiant.

A.5.6 : Séchoirs solaires indirects ventilés

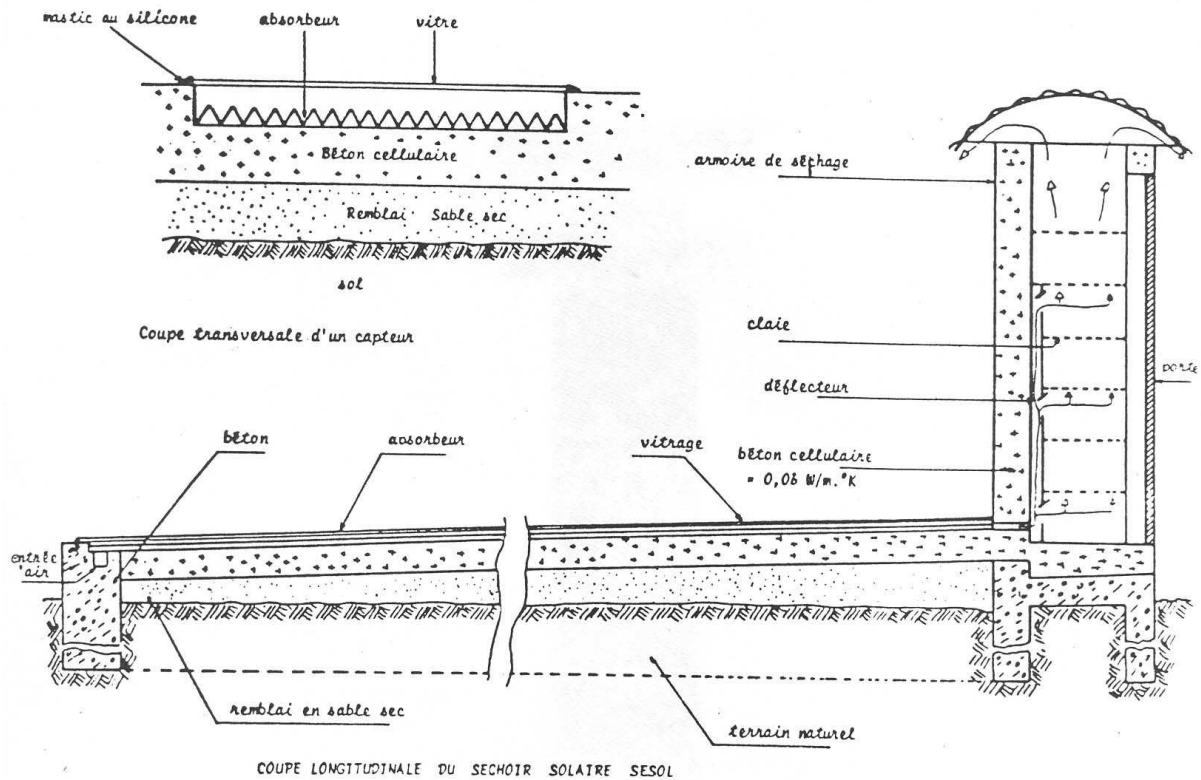


Surface de capteur : 2m²

La température en sortie de capteur varie 36 à 58°C si la température extérieure varie entre 30 et 34°C

Les faces Est, Sud et Ouest de l'enceinte sont vitrées.

Séchoirs solaires indirects ventilés (suite)



Installation destinée au séchage du poisson par un groupe de pêcheurs

Capacité : séchage de 250kg de poisson frais en 2 jours

Surface du capteur solaire : 100 m²

Débit d'air : 12 000 m³.h⁻¹ assuré par un ventilateur électrique

A.5.7: Données météorologiques de Ouagadougou (moyennes 1982-1987)

| | | Température sèche (°C) | | | | | | | |
|------|----|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | heure | | | | | | | |
| | | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| Mois | 1 | 21 | 18,9 | 17,2 | 22,5 | 29,8 | 32,1 | 29 | 23,9 |
| | 2 | 24,5 | 22,4 | 20,7 | 26,2 | 33,4 | 35,4 | 33,4 | 27,4 |
| | 3 | 28,2 | 26,3 | 24,8 | 29,9 | 35,5 | 37,3 | 35,2 | 30,7 |
| | 4 | 30,7 | 29 | 27,6 | 32,1 | 37,5 | 39,2 | 37,1 | 32,9 |
| | 5 | 30,4 | 28,9 | 27,8 | 30,3 | 34,9 | 37,2 | 35,3 | 32,5 |
| | 6 | 27,9 | 26,6 | 25,6 | 28,9 | 32,1 | 33,4 | 31,9 | 29,8 |
| | 7 | 26,3 | 25,2 | 24,3 | 26,7 | 29,9 | 31,5 | 30,3 | 27,6 |
| | 8 | 25,1 | 24,4 | 23,8 | 26,3 | 29,4 | 30,2 | 28,9 | 26,5 |
| | 9 | 25,4 | 24,5 | 23,7 | 26,8 | 30,3 | 31,7 | 29,5 | 26,9 |
| | 10 | 26,3 | 24,7 | 23,7 | 28,8 | 33,8 | 34,8 | 31,5 | 28,1 |
| | 11 | 24,1 | 22 | 20,4 | 28,3 | 34,4 | 35,6 | 31,4 | 26,7 |
| | 12 | 21,2 | 19,2 | 17,6 | 24,4 | 30,4 | 32,1 | 28,2 | 23,7 |

| | | Température humide (°C) | | | | | | | |
|------|----|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | heure | | | | | | | |
| | | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| Mois | 1 | 11,7 | 10,7 | 9,9 | 11 | 13,8 | 14,9 | 14,5 | 12,9 |
| | 2 | 13,7 | 12,7 | 12,6 | 12,7 | 15,6 | 16,6 | 16,5 | 14,9 |
| | 3 | 16,5 | 15,8 | 15,3 | 16,2 | 17,8 | 18,5 | 18,2 | 17,5 |
| | 4 | 19,7 | 19,6 | 19,6 | 21 | 21,6 | 21,2 | 20,6 | 20,3 |
| | 5 | 22,9 | 22,7 | 22,8 | 23,5 | 24,1 | 23,8 | 23,1 | 23,1 |
| | 6 | 23,3 | 22,8 | 22,6 | 23,3 | 24 | 24 | 23,7 | 23,6 |
| | 7 | 23,2 | 22,8 | 22,4 | 23 | 23,8 | 24 | 23,9 | 23,4 |
| | 8 | 23,3 | 22,9 | 22,6 | 23,2 | 24 | 24,1 | 24,1 | 23,5 |
| | 9 | 23,2 | 22,6 | 22,3 | 23,2 | 24 | 24,4 | 23,9 | 23,6 |
| | 10 | 21,3 | 20,9 | 20,8 | 22,3 | 22,9 | 22,3 | 22 | 21,5 |
| | 11 | 16,5 | 15,7 | 15,3 | 16,7 | 18,1 | 18,4 | 18,3 | 17,1 |
| | 12 | 12,4 | 13,3 | 10,7 | 12,4 | 14,5 | 15,4 | 15 | 13,6 |

| | | Humidité relative (%) | | | | | | | |
|------|----|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| | | heure | | | | | | | |
| | | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| Mois | 1 | 32 | 36 | 39 | 22 | 14 | 13 | 19 | 27 |
| | 2 | 29 | 32 | 40 | 19 | 13 | 12 | 16 | 27 |
| | 3 | 30 | 33 | 37 | 24 | 16 | 15 | 18 | 27 |
| | 4 | 37 | 42 | 48 | 37 | 24 | 20 | 22 | 32 |
| | 5 | 54 | 60 | 66 | 57 | 41 | 34 | 36 | 46 |
| | 6 | 68 | 73 | 78 | 63 | 52 | 47 | 51 | 61 |
| | 7 | 78 | 82 | 86 | 74 | 61 | 65 | 59 | 71 |
| | 8 | 86 | 88 | 91 | 77 | 64 | 61 | 68 | 78 |
| | 9 | 84 | 86 | 89 | 74 | 60 | 56 | 64 | 76 |
| | 10 | 65 | 72 | 78 | 58 | 40 | 34 | 44 | 57 |
| | 11 | 47 | 53 | 59 | 30 | 19 | 18 | 28 | 39 |
| | 12 | 36 | 39 | 43 | 22 | 15 | 15 | 23 | 32 |

| | | Vitesse vent (m.s ⁻¹) | | | | | | | |
|------|----|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | heure | | | | | | | |
| | | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| Mois | 1 | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 3,7 | 4,3 | 3,2 | 2,1 | 1,5 |
| | 2 | 1,1 | 1,4 | 1 | 3,4 | 4,1 | 3,1 | 2,2 | 1,3 |
| | 3 | 1,1 | 1,4 | 1,3 | 3,5 | 3,6 | 2,6 | 2 | 1,1 |
| | 4 | 2,1 | 2,2 | 1,6 | 3 | 3,5 | 2,9 | 2,6 | 1,7 |
| | 5 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| | 6 | 2,7 | 2,2 | 2,1 | 3,3 | 3,1 | 2,6 | 2,4 | 2,4 |
| | 7 | 2 | 2 | 1,7 | 3 | 2,9 | 2,6 | 2,3 | 1,8 |
| | 8 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 2,6 | 2,9 | 2,5 | 2,1 | 1,7 |
| | 9 | 1,7 | 1,3 | 1,3 | 2,5 | 2,5 | 2,2 | 2,1 | 1,3 |
| | 10 | 1,2 | 1 | 0,7 | 1,9 | 2,3 | 2,4 | 1,5 | 1,2 |
| | 11 | 1 | 0,4 | 0,4 | 2,1 | 3,1 | 2,5 | 1 | 0,6 |
| | 12 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 3,6 | 3,9 | 3,1 | 1,6 | 1,1 |

| | | Pression atmosphérique (mmHg) | | | | | | | |
|------|----|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | heure | | | | | | | |
| | | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| Mois | 1 | 734 | 734 | 734 | 734 | 734 | 733 | 732 | 733 |
| | 2 | 733 | 732 | 732 | 732 | 732 | 732 | 731 | 732 |
| | 3 | 731 | 731 | 731 | 731 | 731 | 731 | 730 | 731 |
| | 4 | 730 | 730 | 730 | 730 | 731 | 730 | 728 | 729 |
| | 5 | 731 | 731 | 731 | 731 | 731 | 730 | 729 | 730 |
| | 6 | 733 | 733 | 733 | 733 | 733 | 732 | 731 | 732 |
| | 7 | 733 | 733 | 733 | 733 | 734 | 733 | 732 | 733 |
| | 8 | 734 | 733 | 733 | 734 | 734 | 733 | 732 | 733 |
| | 9 | 733 | 733 | 733 | 733 | 734 | 733 | 732 | 733 |
| | 10 | 733 | 733 | 733 | 733 | 733 | 732 | 731 | 732 |
| | 11 | 733 | 733 | 733 | 733 | 732 | 732 | 732 | 732 |
| | 12 | 734 | 734 | 734 | 734 | 734 | 733 | 733 | 733 |

| | | Irradiation journalière | Pluviométrie |
|------|----|--|--------------|
| | | 10 ⁻³ G kJ.m ⁻² .j ⁻¹ | mm |
| Mois | 1 | 20,2 | 0 |
| | 2 | 22,9 | 0 |
| | 3 | 22,6 | 1,2 |
| | 4 | 22,7 | 15,2 |
| | 5 | 22 | 79 |
| | 6 | 21,8 | 93,4 |
| | 7 | 20,9 | 160,6 |
| | 8 | 19,7 | 163,8 |
| | 9 | 21,4 | 122,8 |
| | 10 | 21 | 23,2 |
| | 11 | 20,7 | 0,4 |
| | 12 | 18,7 | 0 |

A.5.8 : Données météorologiques de Cotonou

Latitude : 06°21'N ; Longitude : 02°23'E ; Altitude : 6m

| Mois | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T (°C) | 27.2 | 28.3 | 28.7 | 28.3 | 27.5 | 26.2 | 25.7 | 25.5 | 25.9 | 26.5 | 27.4 | 27.3 |
| HR (%) | 79.3 | 77.9 | 78.9 | 79.4 | 82.5 | 84.9 | 84.6 | 83.9 | 83.7 | 83.6 | 81.7 | 79.5 |
| Insolation (h) | 7.0 | 7.7 | 7.3 | 7.0 | 6.9 | 4.3 | 4.2 | 4.8 | 5.3 | 6.6 | 7.9 | 7.4 |
| Durée jour (h) | 11.7 | 11.8 | 11.9 | 12.1 | 12.3 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.0 | 11.8 | 11.7 | 11.6 |
| Vitesse vent (m.s ⁻¹) | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 4 |
| Pluviométrie (mm) | 14.1 | 40.1 | 65.2 | 126.6 | 190.5 | 292.7 | 123.5 | 87.4 | 74.1 | 88.9 | 46.9 | 20.1 |
| P _{atm} (mbar) | 1008.9 | 1008.4 | 1008.3 | 1008.4 | 1009.7 | 1011.6 | 1012.5 | 1012.2 | 1011.5 | 1010.4 | 1009.5 | 1009.2 |
| G (kWh.m ⁻² .j ⁻¹) | 4.7 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 4.1 | 4.1 | 4.4 | 4.6 | 4.6 | 5.0 | 4.7 |
| D (kWh.m ⁻² .j ⁻¹) | 2.7 | 3.3 | 3.1 | 2.8 | 2.8 | 1.5 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 2.5 | 3.2 | 2.9 |

EXERCICES

1. Calcul de la constante solaire

En supposant que le soleil rayonne comme un corps noir à la température de 5762 K et en ne considérant que les échanges radiatifs Terre / Soleil :

- Calculer la fraction de flux émise dans le domaine du rayonnement visible.
- Montrer que l'on peut considérer que tout le flux solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à 2,5 μm .
- Calculer la constante solaire = éclairement solaire sur 1 m^2 de la surface de la Terre.
- Calculer la température moyenne de la Terre en ne considérant que les échanges radiatifs.
- L'atmosphère émet également un rayonnement que l'on caractérise par la « température du ciel » T_{ciel} : c'est la température du corps noir qui émettrait la même densité de flux que l'atmosphère. On peut prendre en première approximation $T_{\text{ciel}} = T_a - 12$, où T_a est la température de l'air à la surface de la Terre. Calculer la densité de flux émis par l'atmosphère si $T_a = 20^\circ\text{C}$ et si $T_a = 35^\circ\text{C}$ et montrer que ce flux est entièrement émis dans des longueurs d'ondes supérieures à 2,5 μm .

Données : rayon du Soleil : 696 700 km ; distance Terre / Soleil : 149 637 000 km.

2. Calcul de l'éclairement d'une surface quelconque

Calculer la durée du jour et l'irradiation journalière maximale G_0 à Ouagadougou le 25/12 et le 14/07.

Calculer l'heure solaire, la hauteur du Soleil, l'azimut à 12 h (temps civil) ces mêmes jours.

Calculer l'éclairement solaire d'une surface inclinée d'un angle $i = 10^\circ$ et faisant un angle $\gamma = 0^\circ$ avec la direction Sud située à Ouagadougou à 12 h si :

- La fraction d'ensoleillement est de 0,6.
- L'irradiation globale journalière est de 6,5 kWh.m^{-2}

Données : Ouagadougou, latitude = 12,23 N , longitude = 1,30 O

3. Calcul de l'orientation et de l'inclinaison optimale

- Calculer l'inclinaison et l'orientation permettant de maximiser le flux solaire reçu par un capteur. On pourra maximiser soit le flux total reçu sur l'année soit le flux reçu au cours d'une journée du mois le moins ensoleillé.
- Calculer l'orientation permettant de minimiser le flux solaire reçu par un bâtiment parallélépipédique de dimensions 10 x 5 x 3m. On pourra minimiser soit le flux total reçu sur l'année soit le flux reçu au cours d'une journée du mois le plus ensoleillé.

Données :

- Lieu = Ouagadougou, latitude = 12,23 N , longitude = 1,30 O
- Albedo = 0,2
- Données météorologiques :

| mois | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T_a ($^\circ\text{C}$) | 2,5 | 3,5 | 8,0 | 14,0 | 19,5 | 21,0 | 21,5 | 22,0 | 22,0 | 19,0 | 11,0 | 5,0 |
| G ($\text{kJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$) | 20,2 | 22,9 | 22,6 | 22,7 | 22,4 | 21,8 | 20,9 | 19,7 | 21,4 | 21,0 | 20,7 | 18,7 |

4. Etude du refroidissement nocturne

Un récipient de section rectangulaire parfaitement isolé contient une hauteur x cm d'eau à la température initiale de 18°C . Il est ouvert sur sa face supérieure et exposé à l'extérieur à partir de 22h, les conditions atmosphériques sont : $T_a = T_{ra} = 5^\circ\text{C}$ (humidité relative de 100%) et vitesse du vent $v = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$.

- Déterminer l'expression de la température de l'eau en fonction du temps (entre 22h et 6h) si l'on considère les conditions atmosphériques constantes.
- Quelle est l'épaisseur maximale d'eau pour que l'on puisse observer un début de congélation à 6h ?

5. Etude de la formation de la rosée

On se propose d'étudier la formation de rosée sur une toiture que l'on supposera en tôle en acier galvanisé d'épaisseur 1 mm parfaitement isolée sur sa face inférieure avec un isolant de masse nulle. On considérera que les conditions nocturnes extérieures suivantes : $T_a = 20^\circ\text{C}$, $HR_a = 80\%$ que l'on considérera constantes entre 22h et 6h. Calculer le temps au bout duquel de la rosée va apparaître sur la tôle.

6. Calcul du rendement d'un capteur à eau

Calculer le rendement d'un capteur à eau non-couvert fonctionnant dans les conditions suivantes :

- $h = 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$
- $L = 2 \text{ m}$; $l = 1 \text{ m}$
- Absorbeur : tôle acier épaisseur 1mm , tubes diamètres 15/21mm , distance tube/tube = 10cm.
- Facteur d'absorption = 0,9 sur tout le spectre
- Débit d'eau = $0,0035 \text{ kg.s}^{-1}$, température d'entrée = 32°C
- Coefficient d'échange fluide/tube = $1500 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$
- Conditions météorologiques : $T_a = 35\text{°C}$; $HR_a = 40\%$; $V = 2 \text{ m.s}^{-1}$; $G^* = 750 \text{ W.m}^{-2}$

7. Dimensionnement d'un capteur à air

Un capteur à air non-couvert possède les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 4m, largeur : 1,5m
- Distance fond absorbeur : 2,5cm
- Absorbeur : facteur d'absorption = 0,9 sur tout le spectre
- Isolant : 5cm de laine de verre
- Débit d'air : $450 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
- Conditions météorologiques : $T_a = 35\text{°C}$; $HR_a = 40\%$; $V = 2 \text{ m.s}^{-1}$; $G^* = 750 \text{ W.m}^{-2}$

Calculer à l'aide du programme CAPSOL le rendement du capteur et la température de sortie de l'air.

Reprendre le calcul avec :

- Un capteur recouvert d'une vitre : $\tau_{ci} = 0$; $\alpha_{ci} = 0,88$; $\tau_{cs} = 0,85$; $\alpha_{cs} = 0,08$ distante de 3cm de l'absorbeur
- Un capteur recouvert d'un film de polyéthylène : $\tau_{ci} = 0,3$; $\alpha_{ci} = 0,5$; $\tau_{cs} = 0,9$; $\alpha_{cs} = 0,05$ distant de 3cm de l'absorbeur
- Un capteur vitré avec un absorbeur sélectif : $\tau_{ps} = 0,9$; $\tau_{pi} = 0,1$

8. Dimensionnement d'un chauffe-eau solaire

Dimensionner à l'aide du programme SIMSOL un chauffe-eau capable d'assurer la production de 100l d'eau chaude à 50°C par jour à Cotonou. Comparer les résultats avec les valeurs approchées proposées dans le cours. Un appoint électrique est-il nécessaire ? Proposer un schéma et un dimensionnement complet d'une installation.

9. Dimensionnement d'un séchoir solaire

Estimer la surface de capteur nécessaire pour sécher 20 kg de mangues en 3 jours dans un séchoir direct à convection naturelle à Ouagadougou au mois de mai.