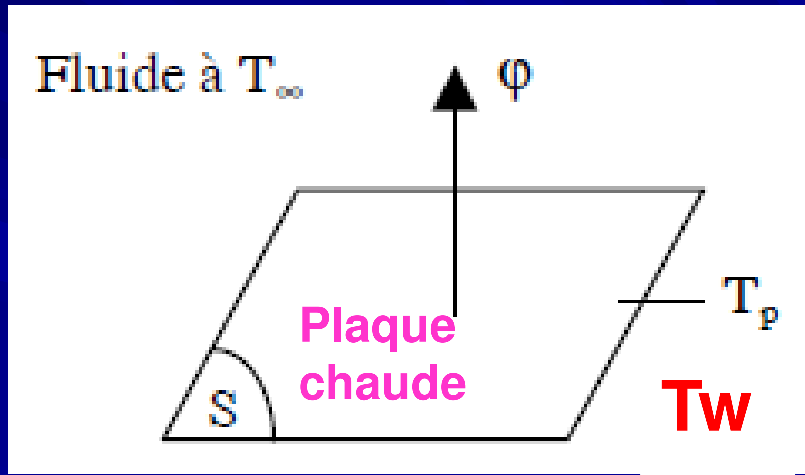
Partie
Transfert
par convection:

Convection

- Soit une **plaque chaude** horizontale à la température T_W en contact avec **un fluide** (air par exemple)

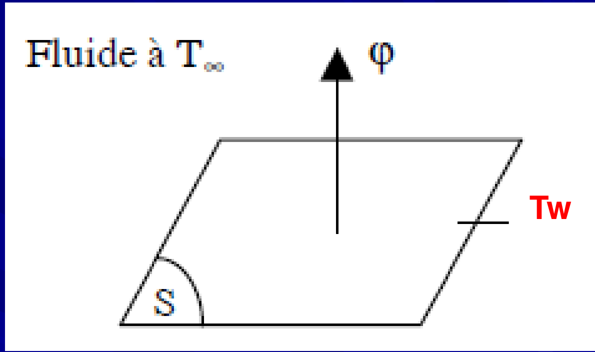
- Il y'a un **transfert** de chaleur causé par le **mouvement du fluide**, ce transfert est **par convection.**



Convection

- **Pour** les **deux types de convection**, le **taux** de **chaleur** (chaleur par unité de temps) **transférée** est donnée par la **loi** de **Newton:**

$$Q = h\,A\,(T_w - T_\infty)\ en\ W$$



- **Tw**: la température de la paroi
- T_∞: température du fluide loin de plaque
- **A** ou **S** : **surface d'échange** (plaque ici)
- **h** : **coefficient de transfert convectif** (**W/m2/k**): **à déterminer**
- En terme de **flux** de **chaleur**: $q = h\ (T_w - T_\infty)\ en\ W / m^2$

Ordre de grandeur du coefficient h pour différentes configurations.

Configurations	$h (W.m^{-2}.K^{-1})$
Convection naturelle: • Plaque verticale de hauteur 0,3 m dans l'air • Cylindre horizontal de diamètre 5 cm dans l'air	• 4.5 • 6.5
Convection forcée: **Cas de plaque** • Courant d'air à 2m/s sur plaque carrée de 2m de coté • Courant d'air à 35m/s sur plaque carrée de 0.75m de coté **Cas de cylindre** • Eau à 0,5 kg/s dans un tube de diamètre 2,5 cm. • Courant d'air à 50m/s perpendiculaire/tube de 5 cm de diamètre	• 12 • 75 • 3500 • 189

Conclusion:

h: est beaucoup plus important dans le cas de la convection forcée

Convection

- **En fait**, **pour déterminer** ce coefficient h, **la méthode** la **plus utilisée** est celle qui fait appelle à des corrélations empiriques utilisant **les nombres adimensionnelle.**

La convection

- le nombre de **Nusselt**

$$Nu = \frac{h\,D}{k}$$

- **Où:**
  - **h:** le coefficient de transfert convectif
  - **k:** est la conductivité thermique du **fluide**
  - **D:** longueur caractéristique

La convection

- Que **signifie** le nombre de **Nusselt?**

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{h}{\frac{k}{D}} = \frac{h\Delta T}{k\frac{\Delta T}{D}} = \frac{q_{conv}}{q_{cond}}$$

- **Nu** compare l'importance de la convection par rapport à la conduction à travers une même couche de fluide.

- Plus le **Nu est grand**, plus la convection est efficace.

La convection

- le nombre de **Prandtl**

- L'épaisseur relative:
  - de la **couche limite dynamique**
  - et la **couche limite thermique** est mieux décrite par le nombre adimensionnel de Prandtl.

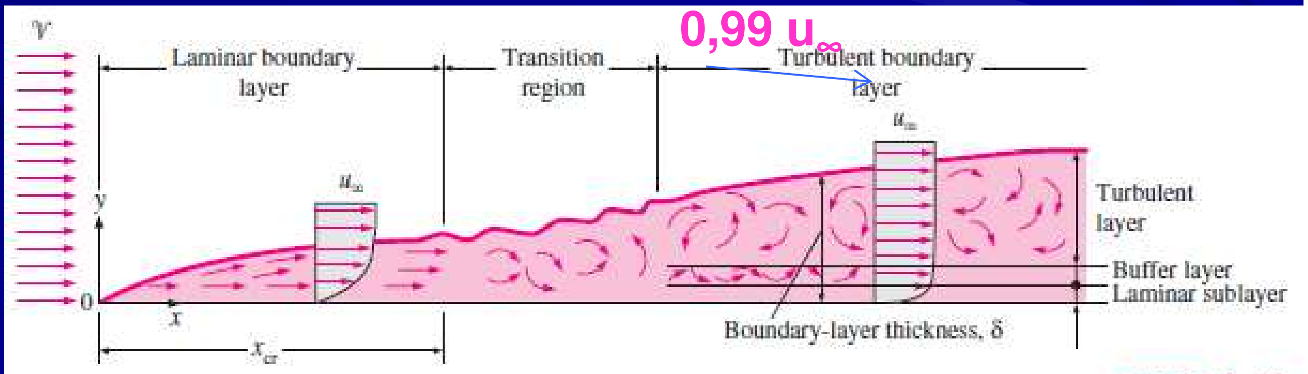
Couche limite dynamique?

- On considère l'écoulement parallèle d'un fluide sur une plaque plane, comme indiqué dans la figure ci-dessous.

- La coordonnée x est mesurée le long de la surface de la plaque à partir du bord d'attaque de la plaque dans la direction de l'écoulement et y est mesurée à partir de la surface dans la direction normale.

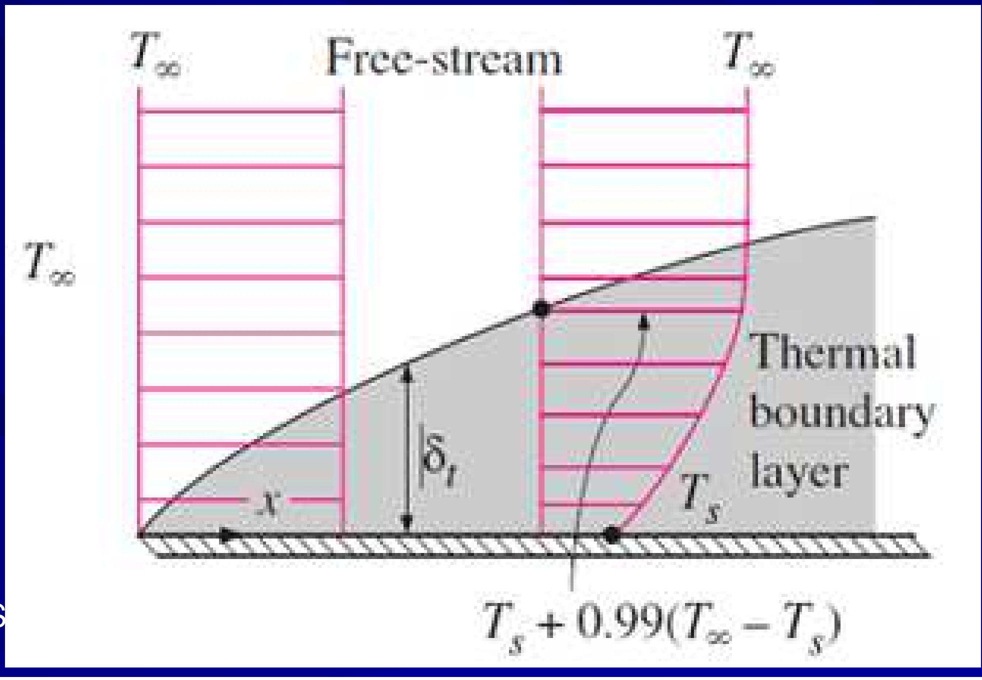
Source: Cengel

$$\begin{cases} y = 0; & u = 0 \\ y = \delta & u = u_\infty \end{cases}$$



Couche limite thermique?

- De même, une couche limite thermique se développe lorsqu'un fluide à une température spécifiée s'écoule sur une surface à une température différente, comme le montre la figure ci-dessous



Source: Cengel

La convection

- Le nombre de fluides **Prandtl** **varie** de:

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu c}{k} = \frac{\gamma}{\alpha}$$

  - **Moins** de **0,01** pour les **métaux liquides**
  - à **plus** de **100 000** pour les **huiles** lourdes
  - pour **l'eau**, le nombre de Prandtl est de l'ordre de **10**
  - **Gaz,** le nombre de Prandtl tend vers **1.**

Typical ranges of Prandtl numbers for common fluids

Fluid	Pr
Liquid metals	0.004–0.030
Gases	0.7–1.0
Water	1.7–13.7
Light organic fluids	5–50
Oils	50–100,000
Glycerin	2000–100,000

La convection

- Le nombre de **Reynolds**
-
-

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

μ **Viscosité dynamique**

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho}$$

Viscosité cinématique

- Le nombre de Reynolds permet de distinguer un régime **laminaire** d'un régime **turbulent.**

Convection naturelle

- **Le nombre de Grashof**
- Le nombre **Grashof** GrL:

$$\mathrm{Gr}_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2}$$

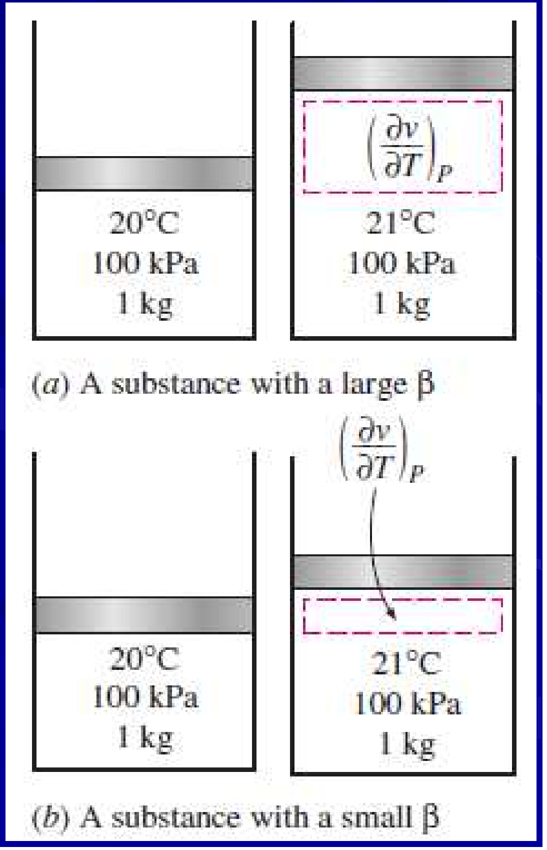
- **g:** accélération gravitationnelle, m / s2
- **β:** coefficient de dilatation volumique en K^{-1}
- **Ts:** température de la surface, ° C
- **T_∞:** température du fluide suffisamment éloignée de la surface, en ° C
- **Lc**: longueur caractéristique de la géométrie, m
- **ν:** viscosité cinématique du fluide, m2 / s

Convection naturelle

- **Mécanisme physique de la convection naturelle**
- β, est défini par:

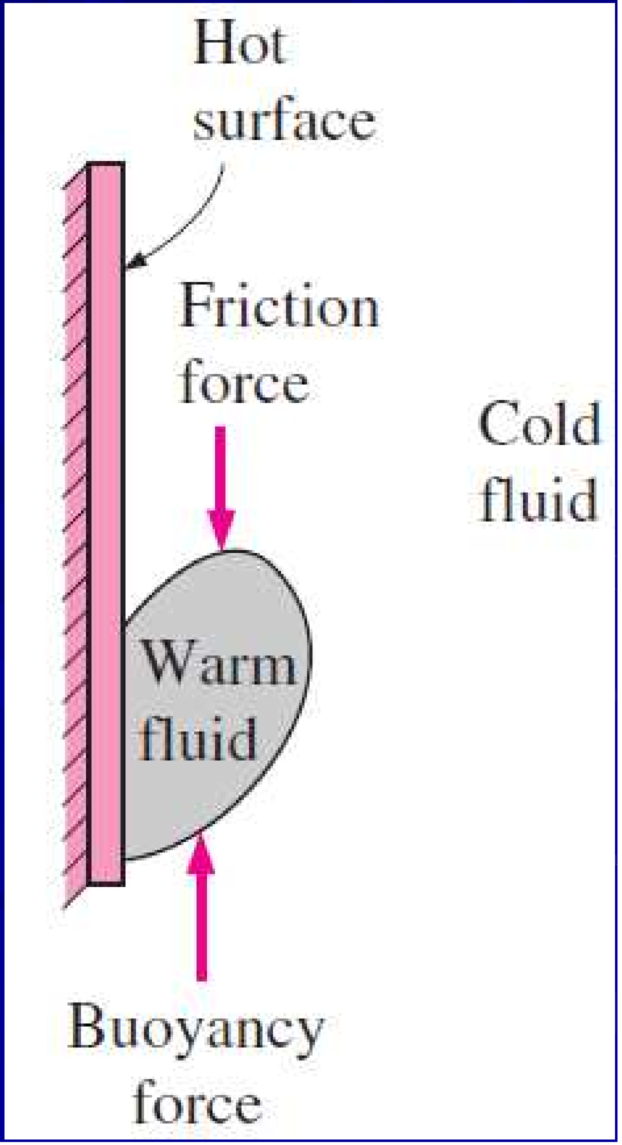
$$\beta = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

- Pour un GP: **β= 1/T**



Convection naturelle

- **Le nombre de Grashof**
- **Signification**?
- Le nombre de Grashof représente le **rapport** entre:
  - la force de **flottabilité**
  - et la **force visqueuse** agissant sur le fluide (figure)



- Gr permet aussi de régi le type d'écoulement (laminaire ou turbulent)en convection naturelle (joue le rôle du nombre de Reynolds).

La convection: h?

- Le **coefficient de convection** est ainsi **déterminé** à partir du nombre de Nusselt (pour les **deux types de convection**):

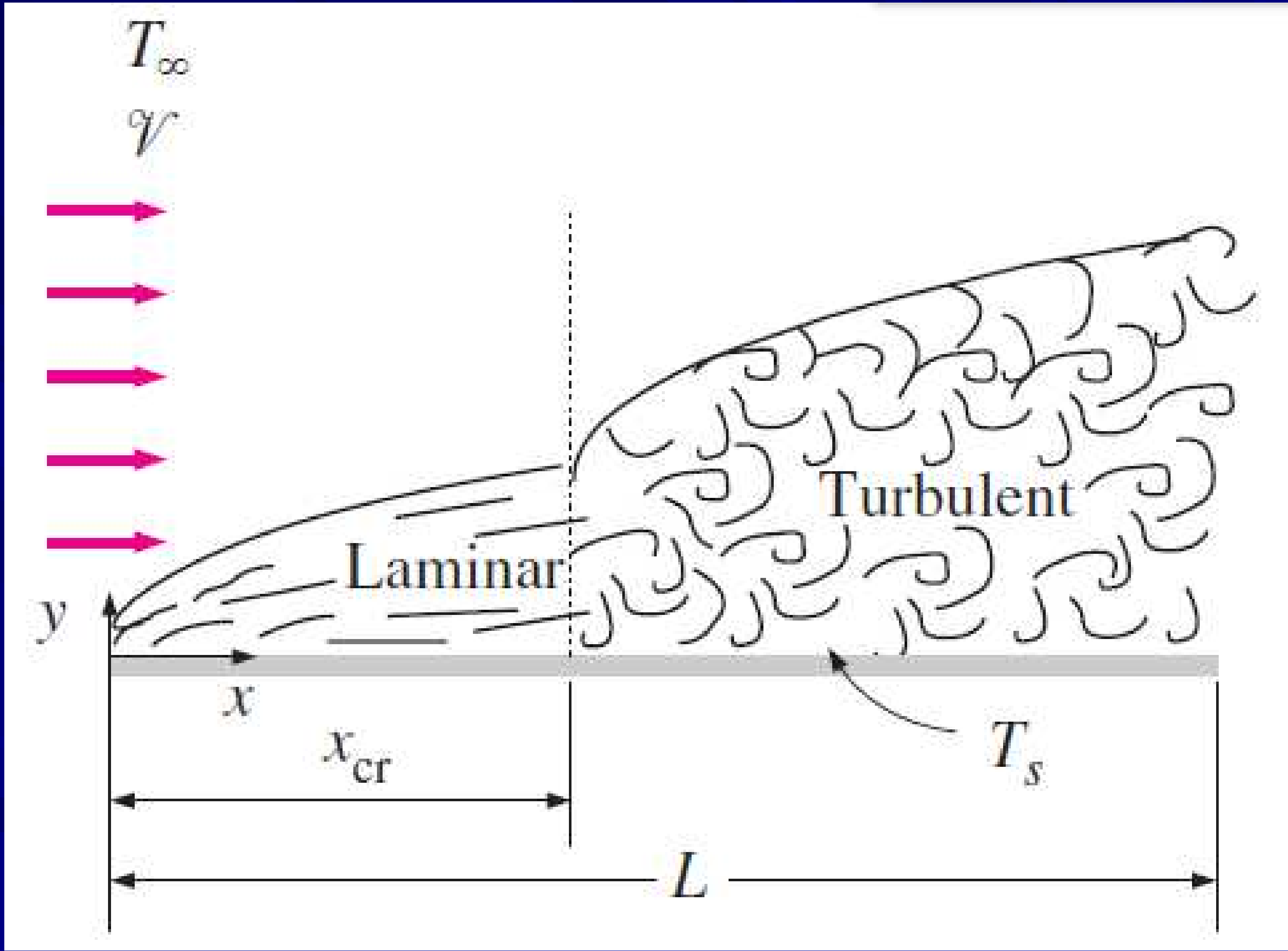
$$h = Nu \frac{k}{D}$$

- Ce nombre de **Nusselt** dépend de:
  - **la nature du fluide**
  - la configuration **géométrique** de l'écoulement

$$Nu = f(R_e, \mathrm{Pr}, Gr)$$

Exemple: Écoulement parallèle sur une plaque plane: Coefficient de transfert de chaleur

Écoulement externe



la traînée et le transfert de chaleur dans l'écoulement externe

- **Écoulement parallèle sur une plaque plane: Coefficient de transfert de chaleur**
- On a (En effectuant les intégrations sur toute la plaque):

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} = 0.664\,\text{Re}_L^{0.5}\,\text{Pr}^{1/3} \qquad \text{Re}_L < 5 \times 10^5$$

En laminaire: Recr = $5\ 10^5$

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} = 0.037\,\text{Re}_L^{0.8}\,\text{Pr}^{1/3} \qquad \begin{array}{l} 0.6 \le \text{Pr} \le 60 \\ 5 \times 10^5 \le \text{Re}_L \le 10^7 \end{array}$$

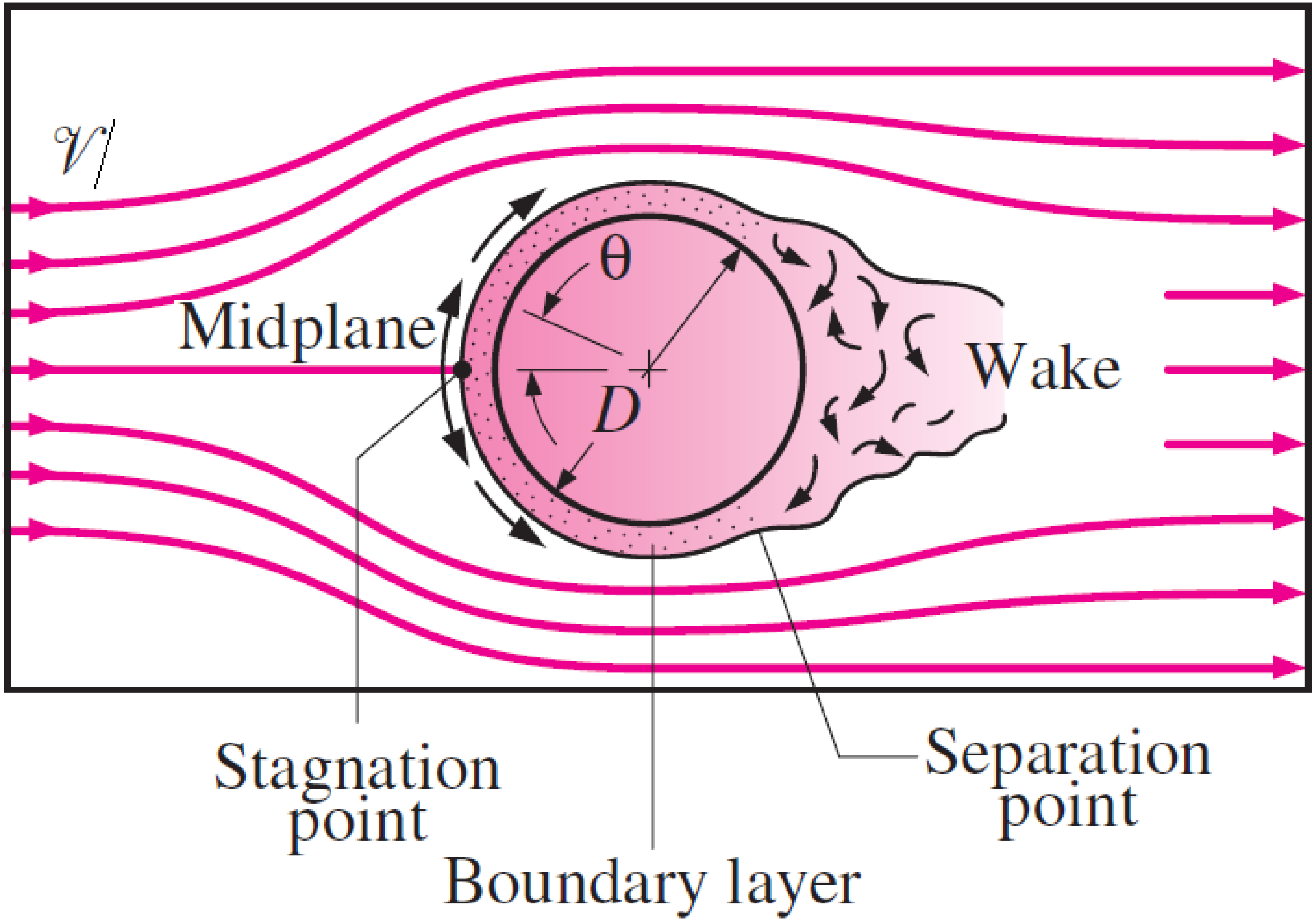
En turbulent

- Une valeur moyenne de **Nu** est obtenue par l'expression

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} = (0.037\,\text{Re}_L^{0.8} - 871)\text{Pr}^{1/3} \qquad \begin{array}{l} 0.6 \le \text{Pr} \le 60 \\ 5 \times 10^5 \le \text{Re}_L \le 10^7 \end{array}$$

Exemple: Écoulement à travers un cylindre:
Coefficient de transfert de chaleur

Écoulement externe



Exemple: Écoulement à travers un cylindre: Coefficient de transfert de chaleur

- Parmi les nombreuses relations de ce type disponibles dans la littérature pour le nombre moyen de Nusselt pour un écoulement transversal sur un cylindre, on peut utiliser celle proposée par **Churchill** et **Bernstein**:

$$\mathrm{Nu}_{\mathrm{cyl}} = \frac{hD}{k} = 0.3 + \frac{0.62\,\mathrm{Re}^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3}}{[1 + (0.4/\mathrm{Pr})^{2/3}]^{1/4}}\left[1 + \left(\frac{\mathrm{Re}}{282{,}000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

Convection naturelle

- **Convection naturelle sur les surfaces**
- Les corrélations empiriques simples pour le nombre de Nusselt Nu moyen en convection naturelle sont de la forme:

$$\mathrm{Nu} = \frac{hL_c}{k} = C(\mathrm{Gr}_L\,\mathrm{Pr})^n = C\,\mathrm{Ra}_L^n$$

- où **Ra_L** est le nombre de Rayleigh, qui est le produit des nombres de Grashof et de Prandtl:

$$\mathrm{Ra}_L = \mathrm{Gr}_L\,\mathrm{Pr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2}\,\mathrm{Pr}$$

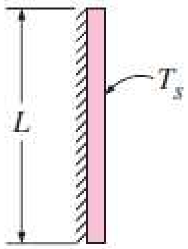
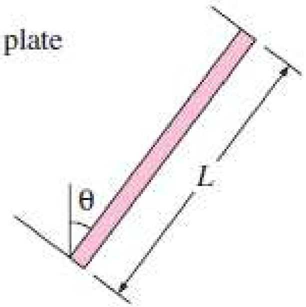
Convection naturelle

- **Convection naturelle sur les surfaces**

- Des relations simples pour le nombre moyen de Nusselt pour diverses géométries sont données dans le Tableau suivant; ainsi que des formes des géométries.

TABLE 9–1

Empirical correlations for the average Nusselt number for natural convection over surfaces

Geometry	Characteristic length L_c	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	L	10^4–10^9 10^9–10^{13} Entire range	$\mathrm{Nu} = 0.59\mathrm{Ra}_L^{1/4}$ (9-19) $\mathrm{Nu} = 0.1\mathrm{Ra}_L^{1/3}$ (9-20) $\mathrm{Nu} = \left\{0.825 + \frac{0.387\mathrm{Ra}_L^{1/6}}{[1 + (0.492/\mathrm{Pr})^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2$ (9-21) (complex but more accurate)
Inclined plate 	L		Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate Replace g by $g \cos\theta$ for $\mathrm{Ra} < 10^9$
Horiontal plate (Surface area A and perimeter p) (*a*) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate) 	A_s/p	10^4–10^7 10^7–10^{11}	$\mathrm{Nu} = 0.54\mathrm{Ra}_L^{1/4}$ (9-22) $\mathrm{Nu} = 0.15\mathrm{Ra}_L^{1/3}$ (9-23)
(*b*) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 		10^5–10^{11}	$\mathrm{Nu} = 0.27\mathrm{Ra}_L^{1/4}$ (9-24)

Convection naturelle

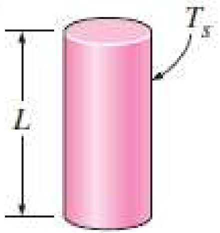
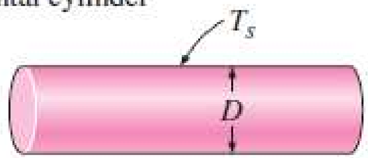
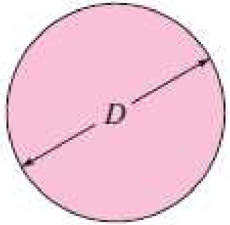
Vertical cylinder 	L		A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when $D \geq \dfrac{35L}{\mathrm{Gr}_L^{1/4}}$
Horizontal cylinder 	D	$\mathrm{Ra}_D \leq 10^{12}$	$\mathrm{Nu} = \left\{0.6 + \dfrac{0.387\mathrm{Ra}_D^{1/6}}{[1 + (0.559/\mathrm{Pr})^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2$ (9-25)
Sphere 	D	$\mathrm{Ra}_D \leq 10^{11}$ ($\mathrm{Pr} \geq 0.7$)	$\mathrm{Nu} = 2 + \dfrac{0.589\mathrm{Ra}_D^{1/4}}{[1 + (0.469/\mathrm{Pr})^{9/16}]^{4/9}}$ (9-26)

Tableau 9-1 (suite)

Partie
Transfert
par rayonnement

Emission de rayonnement

- **Le flux maximal émis** par un corps à la température **T** est donné par:

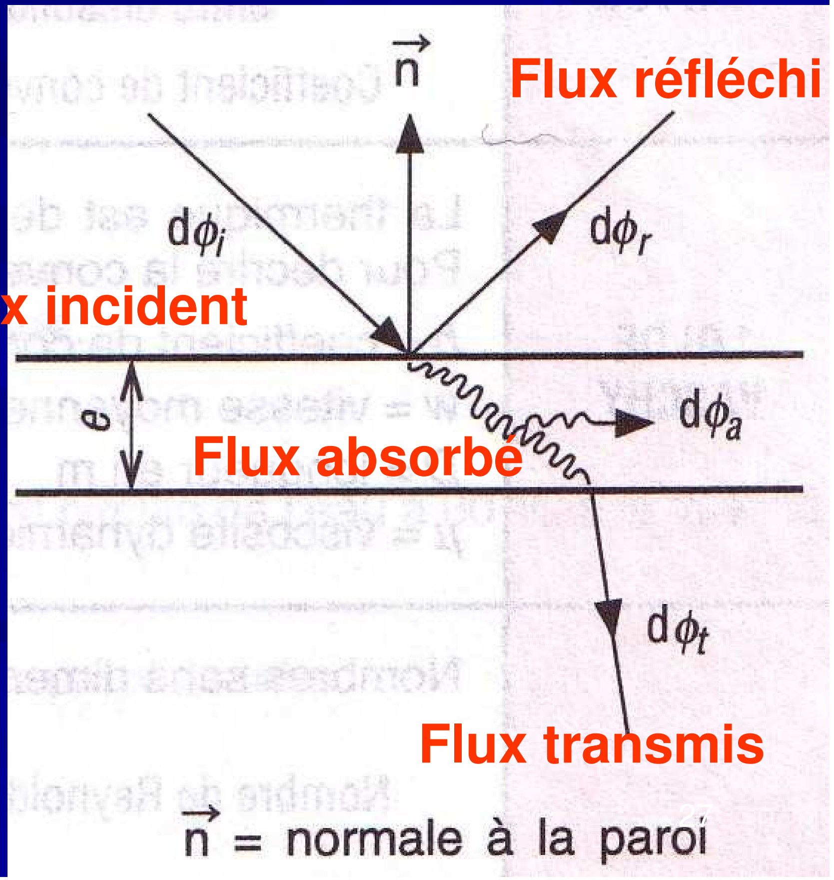
$$E_b = \sigma T^4 \quad en\, W/m^2$$

la **loi de Stephan-Boltzman:**

- $\sigma = 5{,}67\,10^{-8}\, W/m^2/K^4$:constante de Stephan-Boltzman
- **T**: température du corps
- Le corps capable d'émettre cette quantité est appelé: **corps noir**

Rayonnement

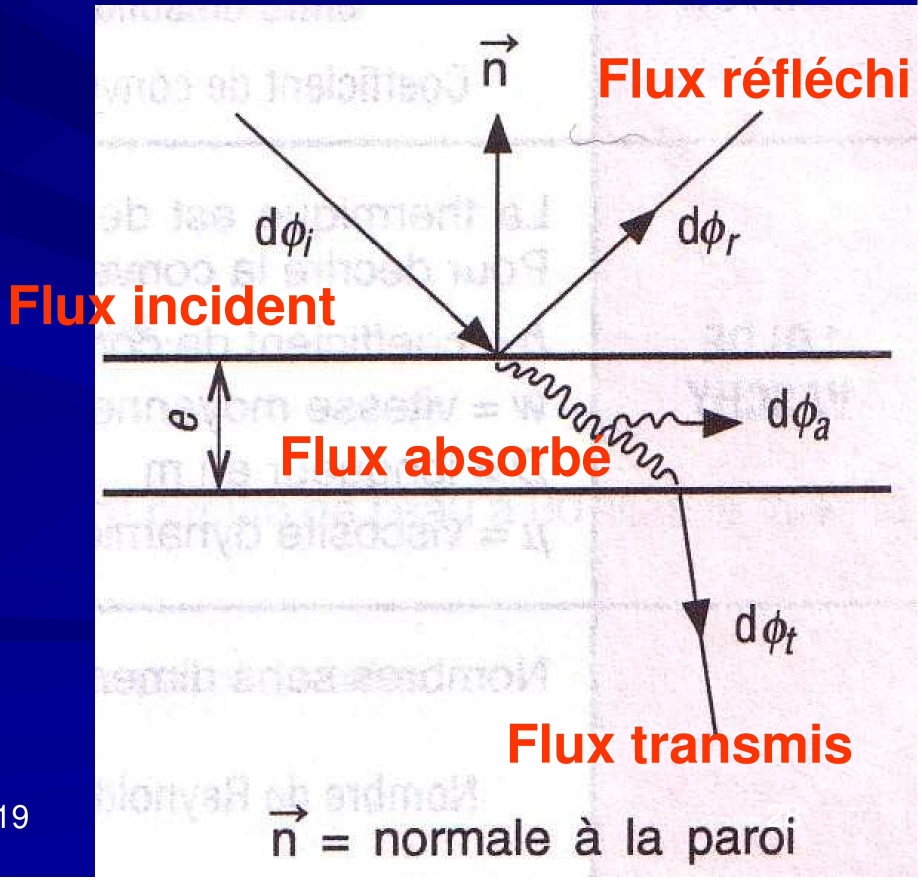
- Un corps **reçoit aussi** du **rayonnement** incident:
  - une partie est **réfléchie;**
  - une partie est **absorbée;**
  - une partie est **transmise.**



Rayonnement

- On utilise les **coefficients d'absorption**, de **réflexion** et de **transmission** par:

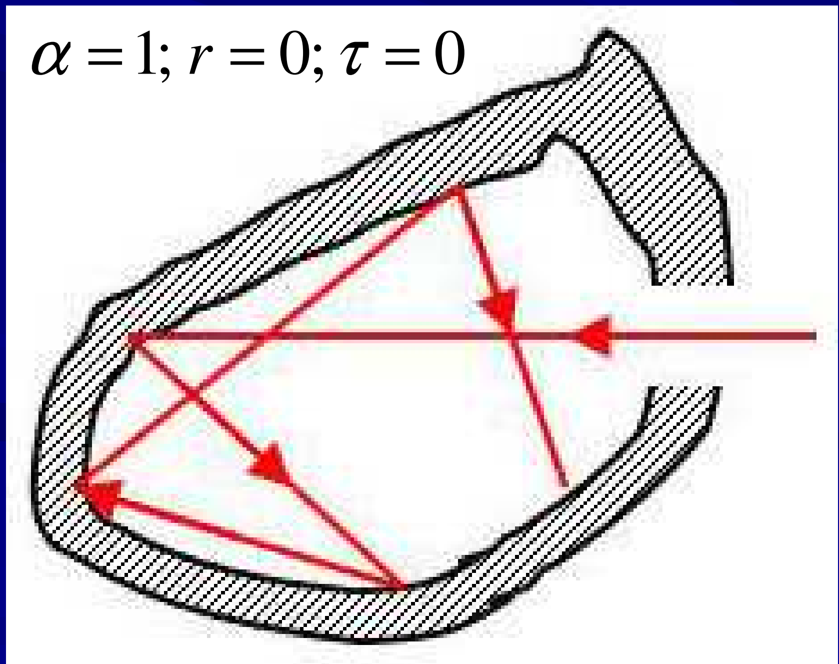
α	**Coef. absorption**
r	**Coef. Réflexion**
τ	**Coef. transmission**



$$\alpha + r + \tau = 1$$

Emission de rayonnement

- **Définition:**
- **Un corps noir** est un corps capable **d'absorber** tout rayonnement incident sur sa surface sans réfléchir ni transmettre:



Emission de rayonnement

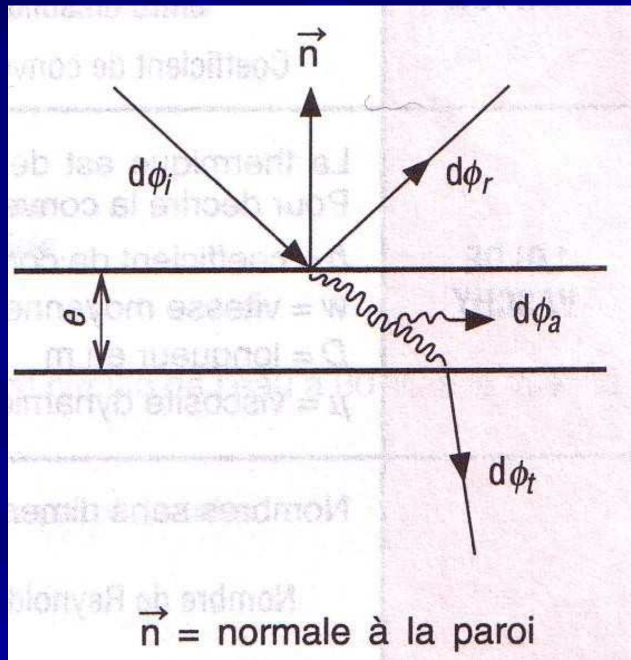
- **Définition:**
- **Un corps gris:** un corps gris émet un flux de rayonnement:

$$q = \varepsilon \sigma T^4 \quad ; 0 < \varepsilon < 1$$

- ε émissivité du corps

absorption de rayonnement

- Le **flux absorbé** par un corps est:



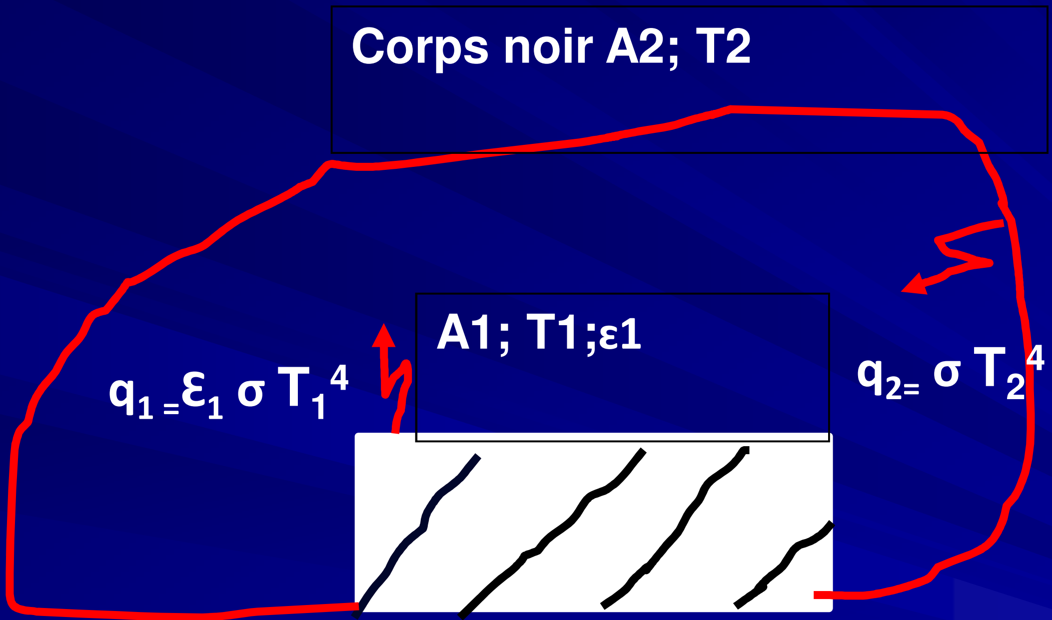
$$q_{abs} = \alpha \; q_{incident}$$

- Il est **pratique** sous certaines conditions que l'émissivité d'un corps soit voisine de son coefficient d'absorption:

$$\varepsilon \approx \alpha$$

absorption de rayonnement

- Soit un petit **corps gris** entouré d'une grande surface (**corps noir**):



- **Question**:
  - Quelle est l'énergie nette échangée par le corps gris A1?

$$Q_1 = \varepsilon_1\ A_1\ \sigma\,(T_1^{\ 4} - T_2^{\ 4})$$

III- Rayonnement du corps noir

- **5- intensité de rayonnement**
- Pour un corps noir, le **flux spectrale** émis par une longueur d'onde **λ** donnée est:

$$E_{b,\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1 \right)} \quad en W / m^2 / (\mu m)$$

$$c_1 = 3{,}743\,10^8 \quad W\,\mu m^4 / m^2$$

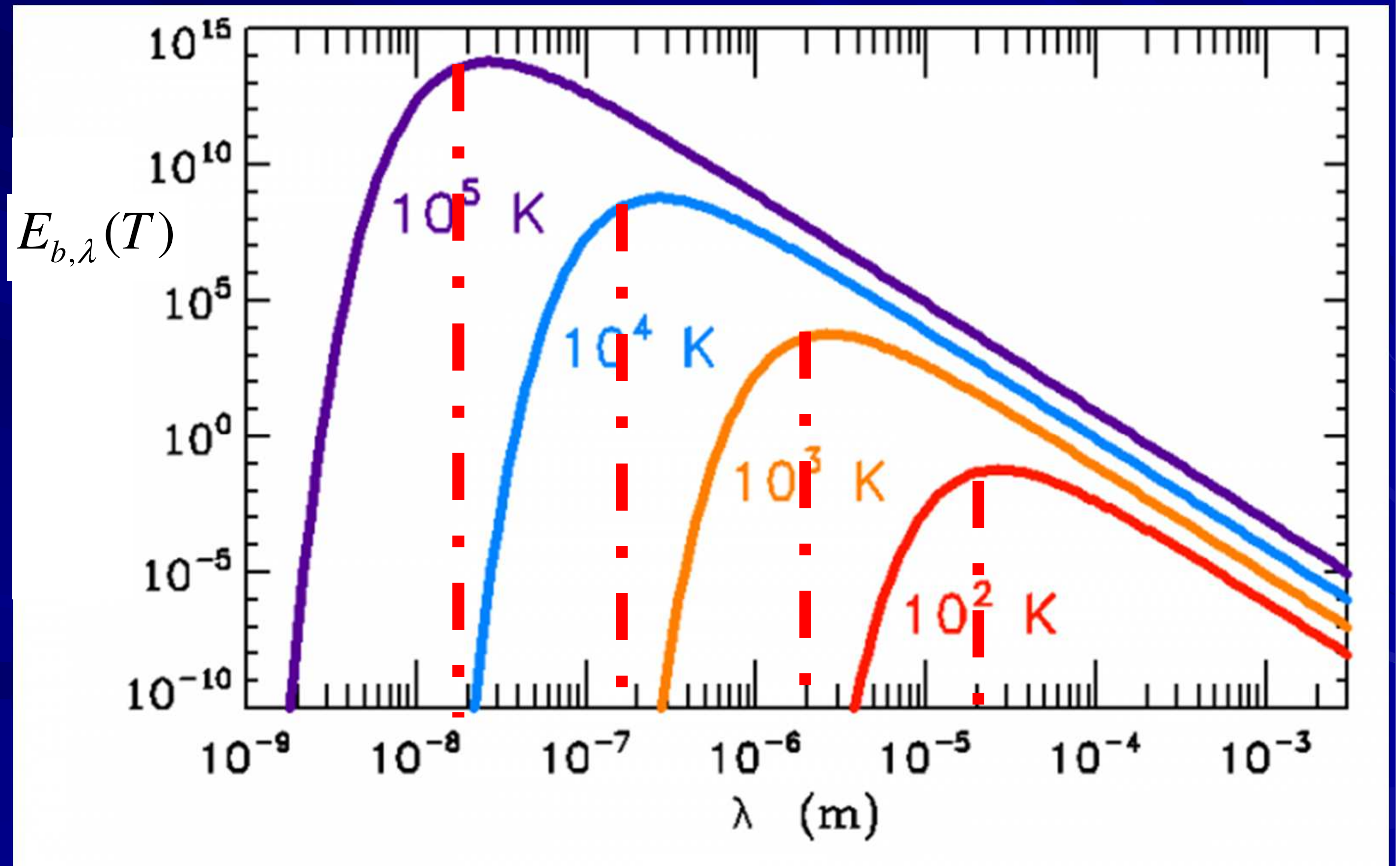
$$c_2 = 1{,}4387\,10^4 \quad \mu m.K$$

- Le flux total:

$$E_b = \int_0^\infty E_{b,\lambda}(T)\,d\lambda = \sigma T^4$$

III- Rayonnement du corps noir

- **5- intensité de rayonnement**
- **Courbe**



III- Rayonnement du corps noir

- **5- intensité de rayonnement**
- **Courbe**
- La position de ces maximum λ_m est obtenue en résolvant l'équation:

$$\frac{dE_{b,\lambda}}{d\lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_m T = 2898 \ \mu m.K$$

Loi de Wien