

Transferts de chaleur Rayonnement

Pierre Le Cloirec

Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes

11 allée de Beaulieu, CS 50837

35708 Rennes cedex 07, France

Tel 33 (0) 2 23 23 80 00

e-mail Pierre.Le-Cloirec@ensc-rennes.fr

Trois modes de transfert de la chaleur :

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

RAYONNEMENT

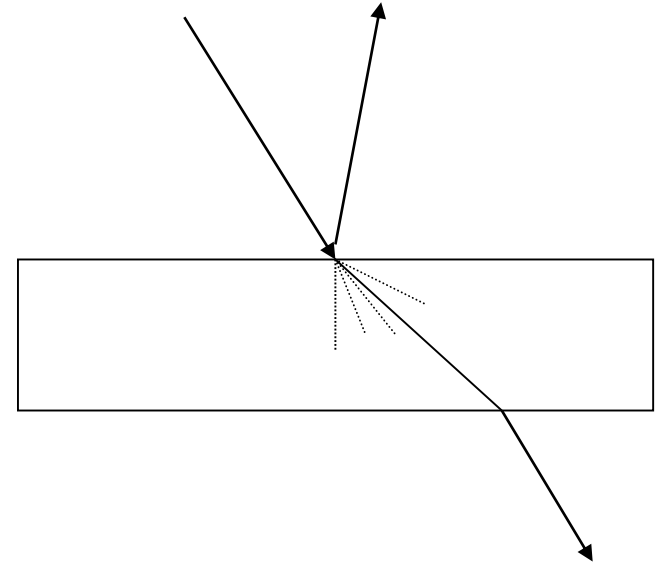
Définition

Définition

**Mode d'échange de chaleur
par absorption et émission de radiations**

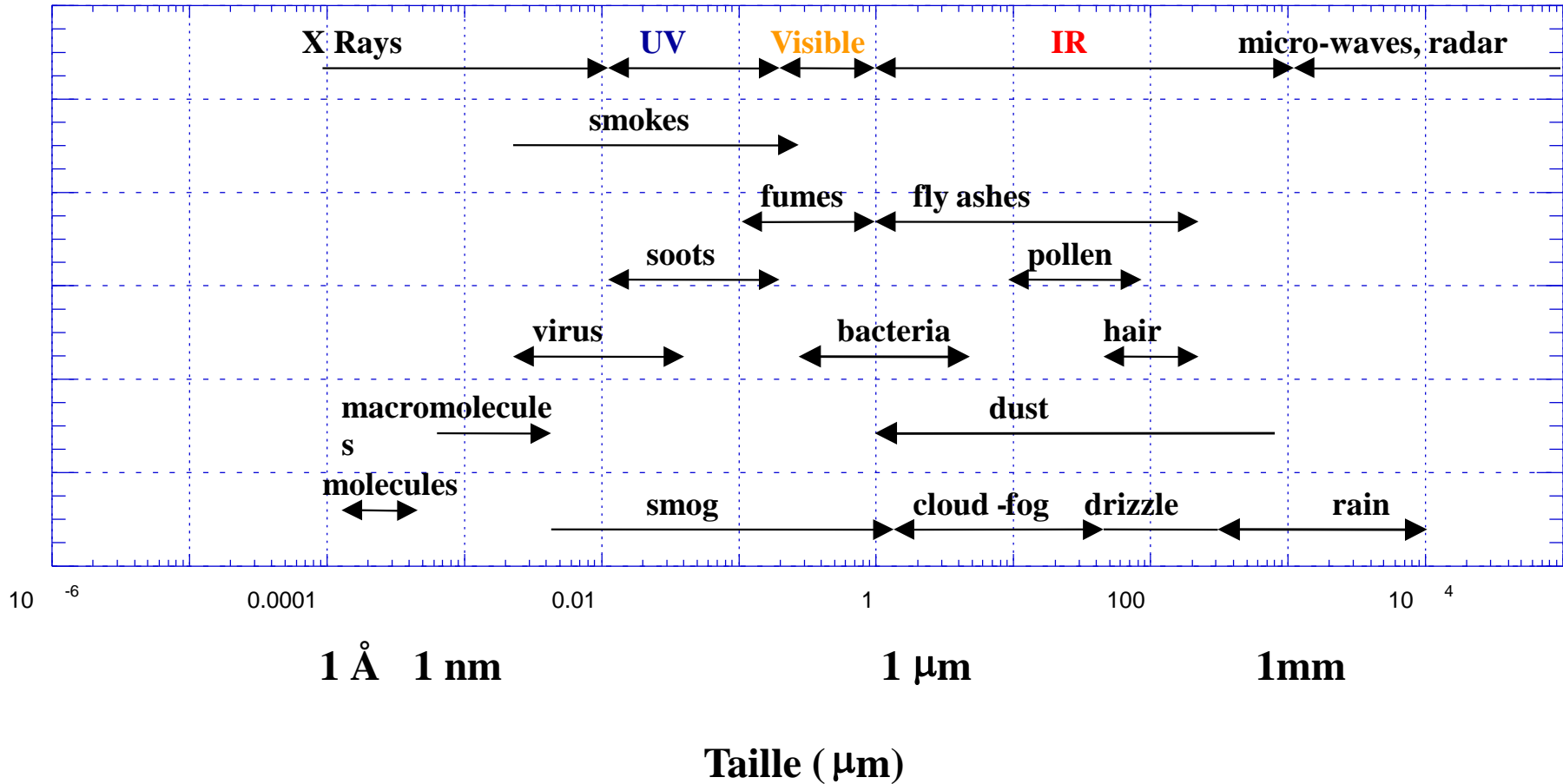
**La propagation de l'énergie suit les mêmes
Lois que la propagation de la lumière
(réflexion, réfraction, transmissions...)**

Rayonnement dans l'Infra Rouge



Rayonnement thermique : UV - Visible - IR
 $100 \text{ nm} < \lambda < 100 \text{ }\mu\text{m}$

Les longueurs d'ondes



Longueurs d'ondes (μm)

Rayonnement thermique $0,1 \mu\text{m} < \lambda < 100 \mu\text{m}$

Infra Rouge

$0,7 < \lambda < 500$

Visible

$0,4 < \lambda < 0,7$

rouge

620 – 700

orange

592 – 620

jaune

578 – 592

vert

500 – 570

Bleu

446 – 500

violet

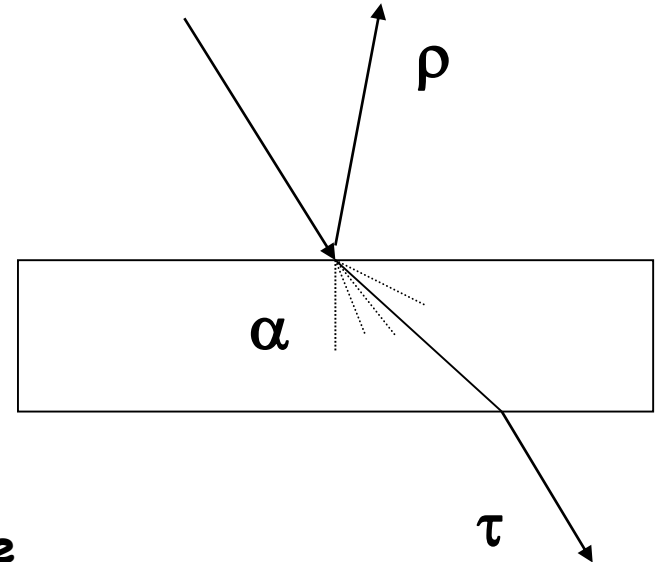
400 – 446

Ultraviolet

$0,01 < \lambda < 0,4$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

α	:	fraction d'énergie absorbée
ρ	:	fraction d'énergie réfléchie
τ	:	fraction d'énergie transmise

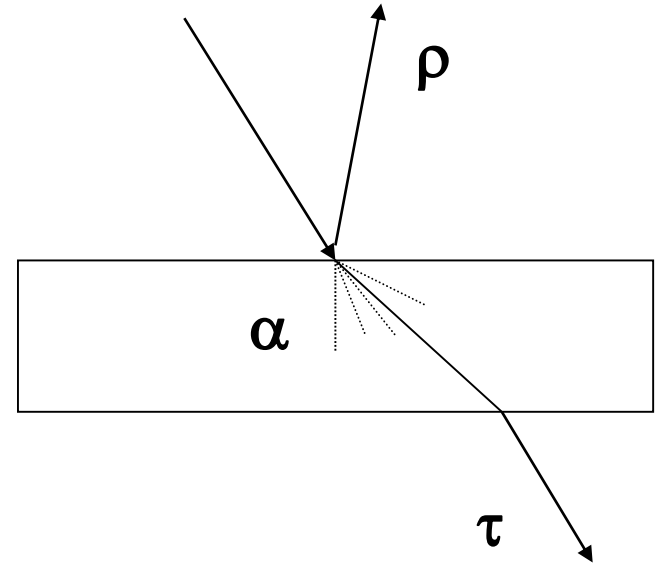


On appelle corps noir, un matériau tel que $\alpha = 1$

Corps noir

$$\alpha = 1$$

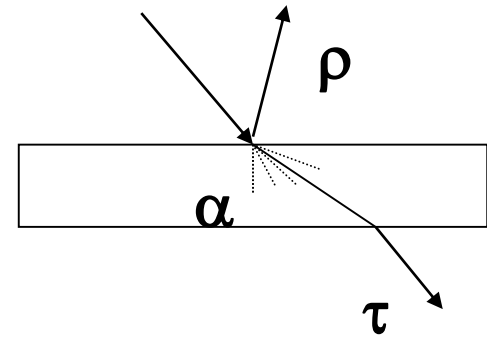
noir de platine,
noir de bismuth
suie



$$\alpha = 0,98 - 0,99$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

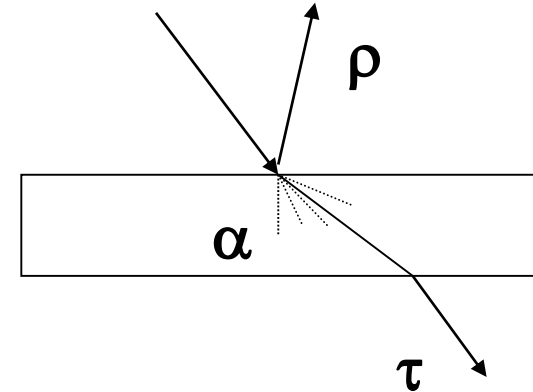
α : fraction d'énergie absorbée
 ρ : fraction d'énergie réfléchie
 τ : fraction d'énergie transmise



Matériau	α	ρ	τ
Verre ordinaire	0,07	0,08	0,85
Aluminium	0,15		
Peinture blanche	0,20		
Peinture noire	0,90		
Corps noir	1	0	0
Bois	0,90		
Béton	0,90		

La radiance - Emittance

Un corps est susceptible d'émettre un rayonnement



- Définition :

La radiance (émittance) d'une surface est la quantité d'énergie émise par unité de temps et de surface dans tout l'espace au dessus de la surface

- Unité : $W m^{-2}$ ou $kcal h^{-1}m^{-2}$

Loi de Stefan - Boltzman

$$W_N = \sigma T^4$$

- Pour un corps noir loi de Stefan :

Avec σ constante de Stefan

$$\sigma = 5,71 \cdot 10^{-8} W m^{-2}K^{-4} = 4,92 \cdot 10^{-8} kcal h^{-1}m^{-2}K^{-4}$$

La radiance - L'émittance

Loi de Stefan - Boltzman

$$W_N = \sigma T^4$$

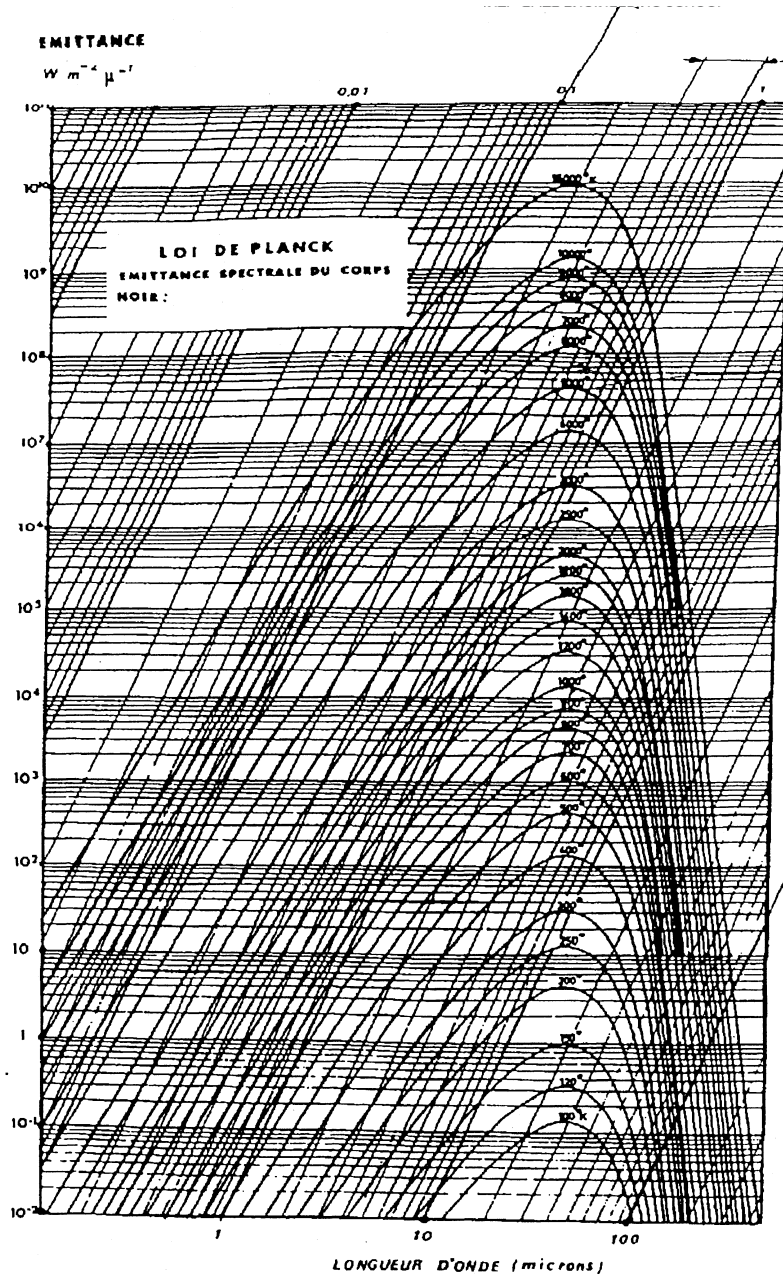
Cette relation est issue de l'intégration de la loi de Planck ou loi de l'émittance monochromatique du corps noir qui relie W_N à la longueur d'onde (λ) du rayonnement et à sa température (T). Elle est bâtie sur des considérations de thermodynamique statistique.

$$W_N(\lambda) = \frac{2\pi h C^2 \lambda^{-5}}{h C \frac{e^{k\lambda T} - 1}{k\lambda T}}$$

C : vitesse des ondes électromagnétiques dans le milieu de propagation

h : constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

k : constante de Boltzman $k = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ J K}^{-1}$



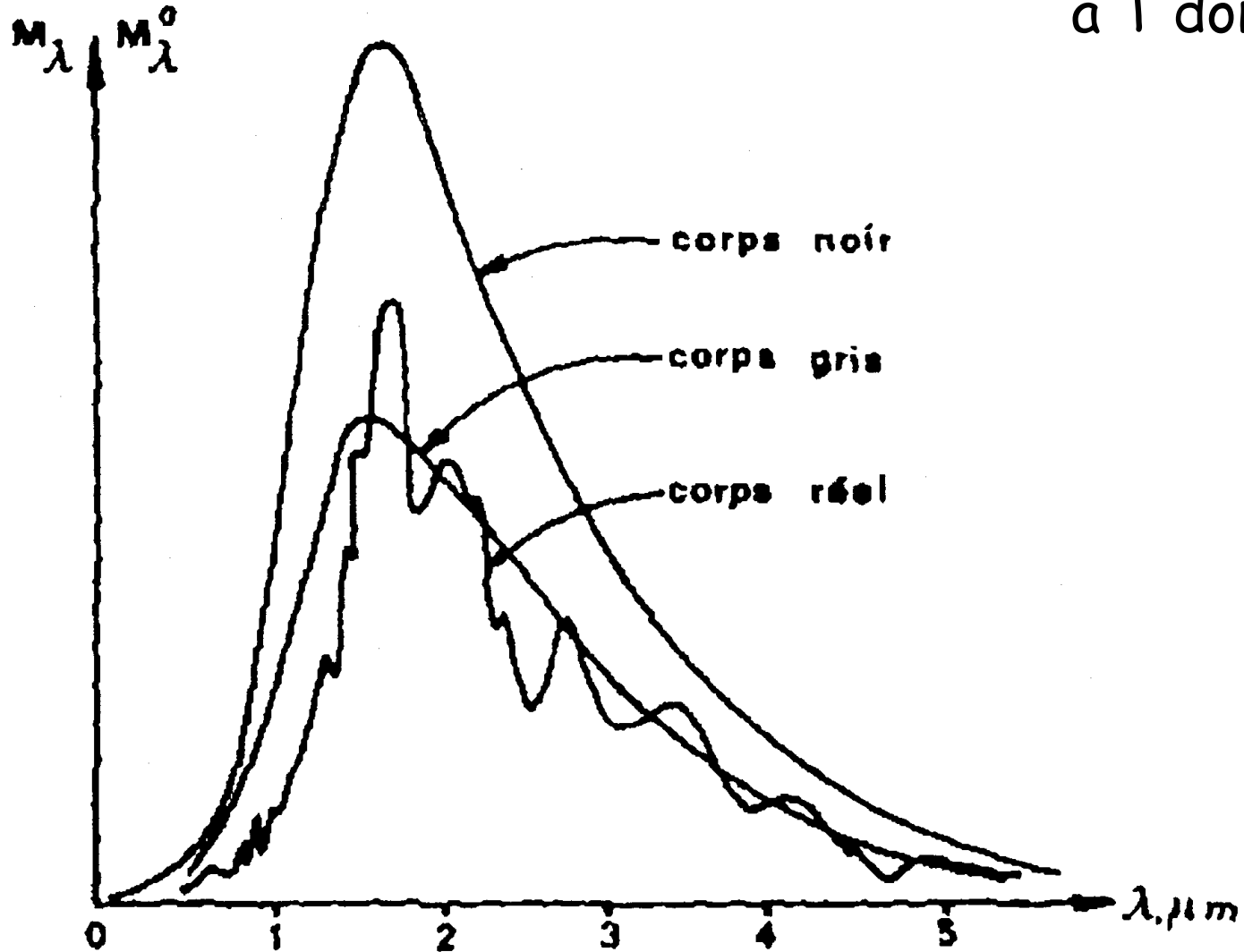
$$W_N(\lambda) = \frac{2\pi h C^2 \lambda^{-5}}{h C \frac{e^{k\lambda T} - 1}}{e^{k\lambda T} - 1}$$

$$W_N = \int_0^{+\infty} \frac{2\pi h C^2 \lambda^{-5}}{h C \frac{e^{k\lambda T} - 1}} d\lambda$$

$$W_N = \sigma T^4$$

Avec σ constante de Stefan
 $\sigma = 5,71 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

à T donnée



Pouvoir émissif

- Définition :

$$\varepsilon = \frac{W}{W_N}$$

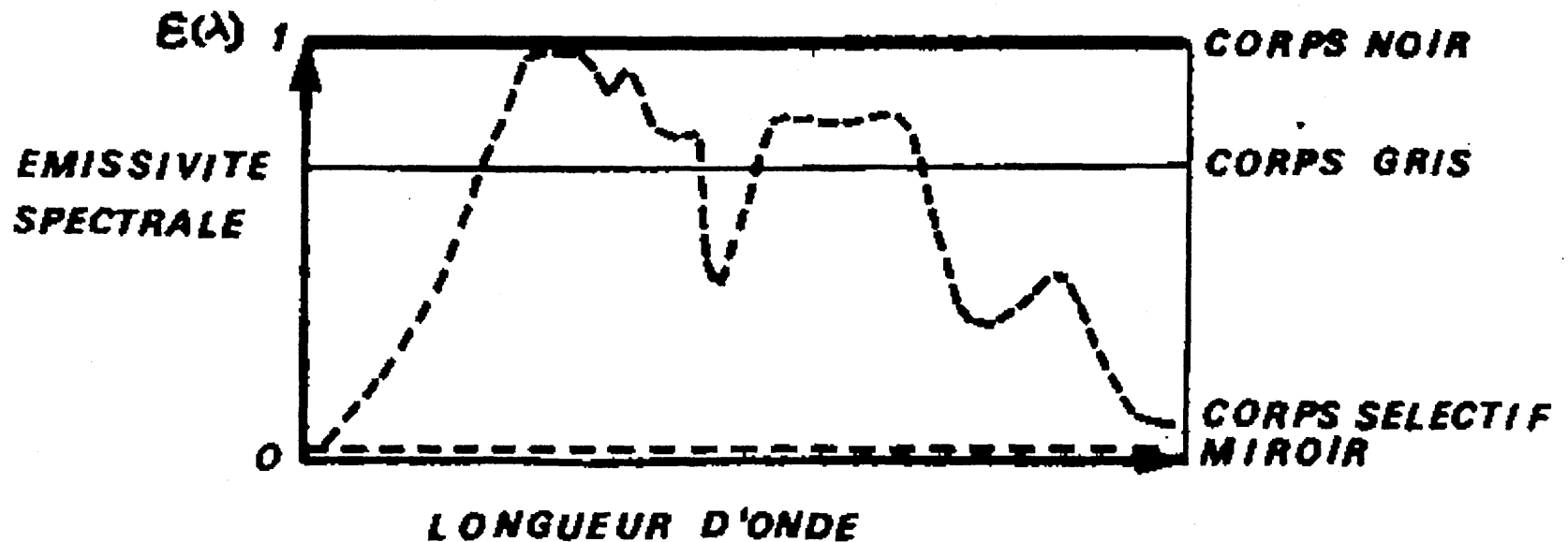
W : radiance du corps

W_N : radiance du corps noir à la même température

- pour un corps noir : $\varepsilon = 1$

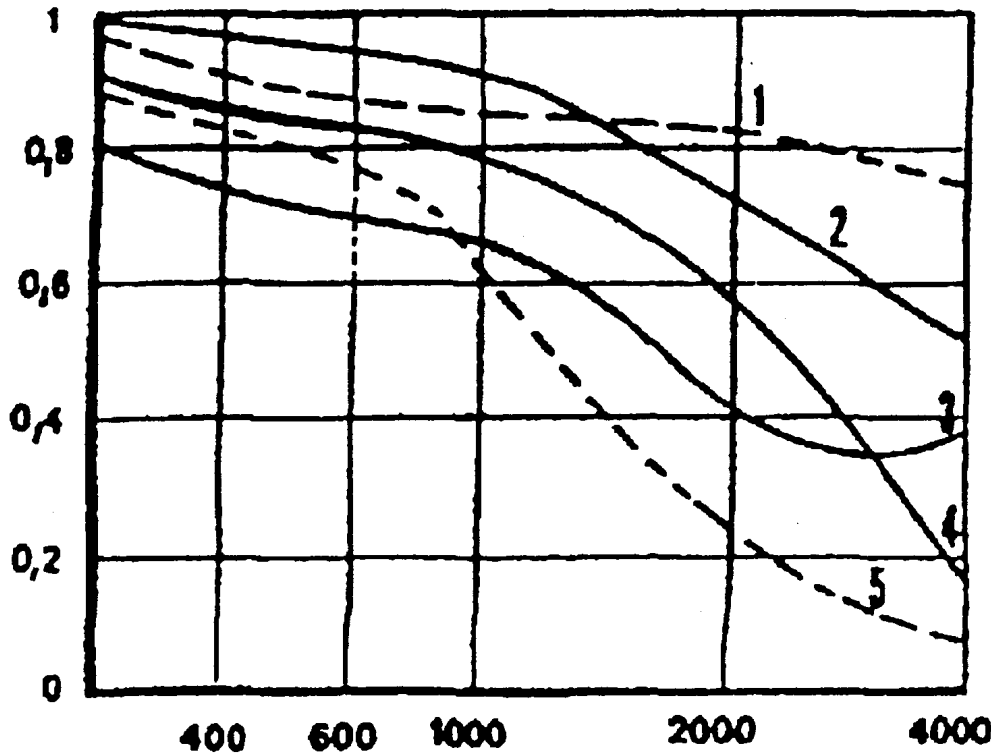
Pouvoir émissif

Emissivité spectrale de différents type de corps



Pouvoir émissif

Evolution de l'émissivité en fonction de la température



- 1 - Caoutchouc
- 2 - Porcelaine
- 3 - Liège
- 4 - Papier
- 5 - Argile réfractaire

TEMPERATURE (°K).

Puissance émise par rayonnement

$$\Phi_R = A\varepsilon\sigma T^4$$

Φ_R : puissance émise par rayonnement (W)

A : surface du corps (m^2)

ε : émissivité (-)

σ : constante de Stefan ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

T : température (K)

Absorbance - Emissivité

- Les valeurs de α et ε sont données dans des tables
- Pour les gaz à molécule symétrique (O_2 , N_2 , H_2 ...)

$$\alpha = \varepsilon = 0$$

- L'air ($N_2 + O_2$) n'absorbe pas et n'émet pas de rayonnement

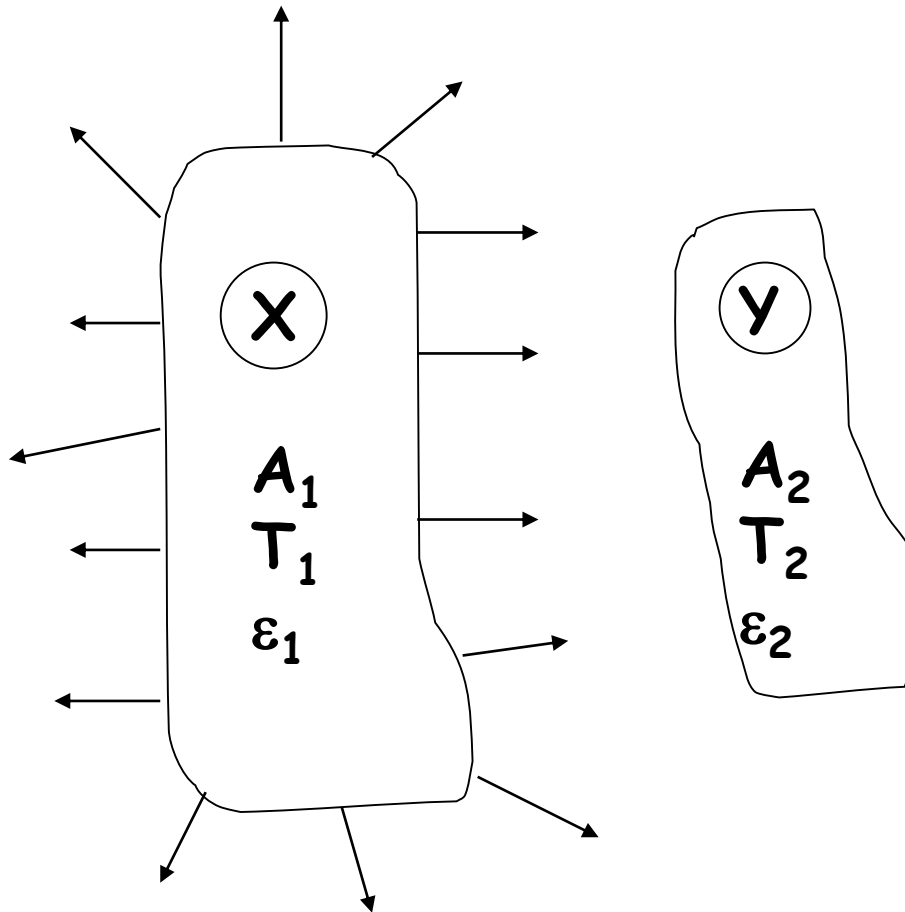
- Pour un grand nombre de matériaux industriels

$$\alpha = \varepsilon$$

corps gris

Echange thermique par rayonnement

Echange entre deux surfaces grises



X émet dans tout l'espace
Une énergie Φ_1

$$\Phi_1 = \epsilon_1 A_1 \sigma T_1^4$$

Seule une partie de l'énergie Φ_1
Vient frapper Y, soit Φ'_1

$$\Phi'_1 = F_{1,2} \Phi_1 = F_{1,2} \epsilon_1 A_1 \sigma T_1^4$$

avec

$F_{1,2}$: facteur géométrique
fonction de la forme
et de la position de X et Y

Echange entre deux surfaces grises

On suppose des corps gris $\varepsilon_2 = \alpha_2$

Y absorbe venant de X :

$$\Phi''_1 = \varepsilon_2 \Phi'_1$$

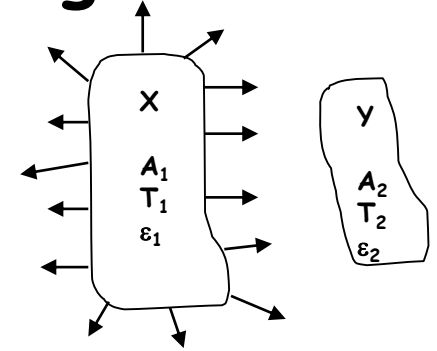
$$\Phi''_1 = F_{1,2} \varepsilon_2 \varepsilon_1 A_1 \sigma T_1^4$$

X absorbe venant de Y :

$$\Phi''_2 = F_{2,1} \varepsilon_2 \varepsilon_1 A_2 \sigma T_2^4$$

Si $T_1 = T_2$ pas d'échange

$$\rightarrow \Phi''_1 = \Phi''_2 \rightarrow F_{1,2} A_1 = F_{2,1} A_2$$

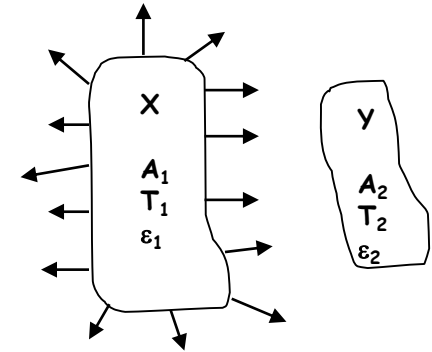


Echange entre deux surfaces grises

Si $T_1 \neq T_2$ d'échange de chaleur

X fournit Φ''_1 et absorbe Φ''_2

$$\Phi''_1 = F_{1,2} \varepsilon_2 \varepsilon_1 A_1 \sigma T_1^4$$

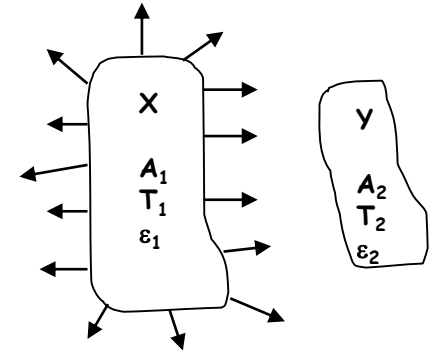


La quantité de chaleur échangé par unité de temps (Flux)
entre les deux corps :

$$\Phi_{1 \leftrightarrow 2} = F_{1,2} \varepsilon_2 \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Approche critique

$$\Phi_{1\leftrightarrow 2} = F_{2,1} \varepsilon_2 \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

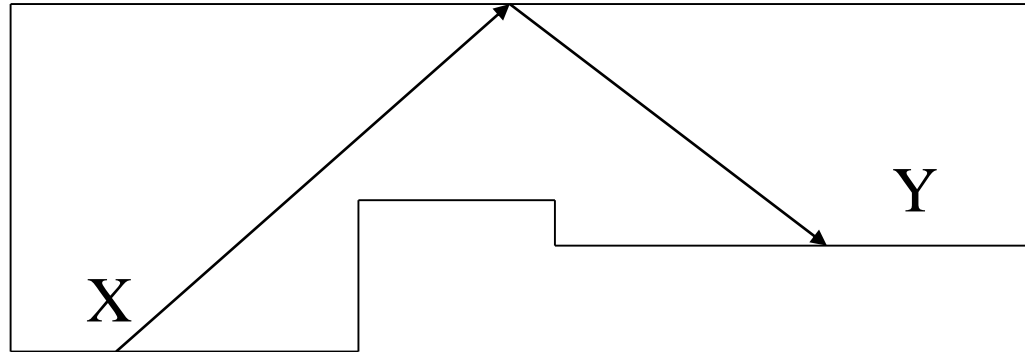


Hypothèses :

- Les réflexions multiples sont négligées
- Possibilités d'auto-réflexion
- Pas d'échanges intermédiaires avec une autre surface

- $F_{1,2}$ est donné dans des tables

Exemple 1



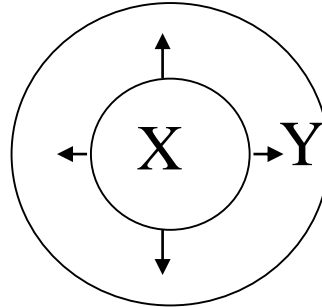
$$\Phi_{1 \leftrightarrow 2} = F_{1,2} \epsilon_2 \epsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

avec

$$F_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\overline{F}_{1,2}} + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$$

$\overline{F}_{1,2} = 1$ est donné dans des tables en fonction de la qualité de la surface

Exemple 2 - Sphères concentriques



$$\Phi_{1 \leftrightarrow 2} = F_{1,2} \varepsilon_2 \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

avec

$$\overline{F_{1,2}} = 1$$

$$F_{1,2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

Echange entre deux Gaz

$\varepsilon \neq \alpha$

ε et α dépendent de :

- la température
- la pression
- l'épaisseur de la couche traversée

Le flux de chaleur échangé de la paroi (p) de surface A_1 et le gaz (g) est donné par la relation :

$$\Phi = \varepsilon_{\text{paroi}} A_1 \sigma (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha T_{\text{paroi}}^4)$$

Poids relatifs des différents modes de transferts de chaleur

Poids relatifs des différents modes de transfert de chaleur dépend de :

- la température
- le pouvoir émissif
- les coefficients d'échange

Quelques règles simplissimes :

- A haute température → Rayonnement prépondérant
Dans les fours le rayonnement est essentiel
- A plus basse température (200 - 300 °C) →
Rayonnement négligeable vis-à-vis de la convection
sauf pour la convection libre