

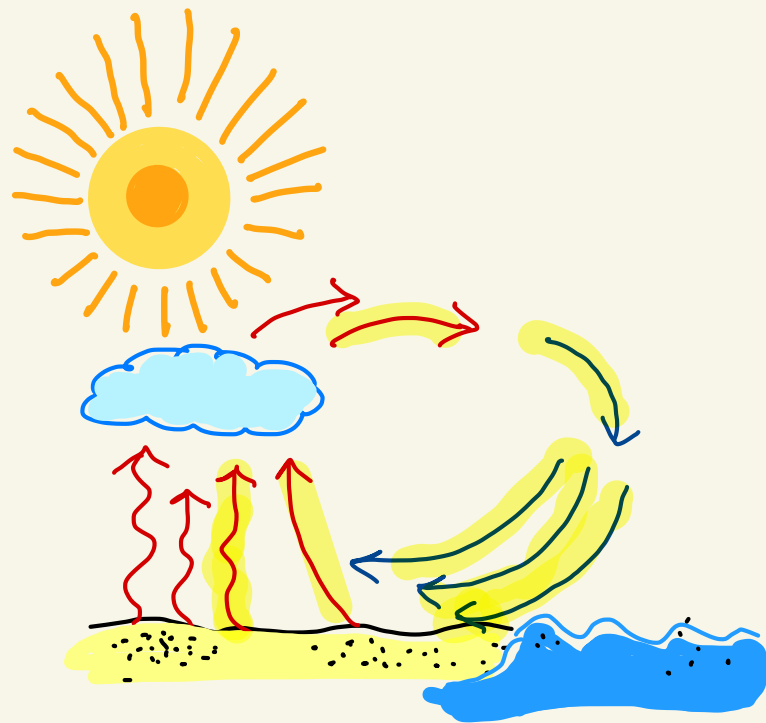
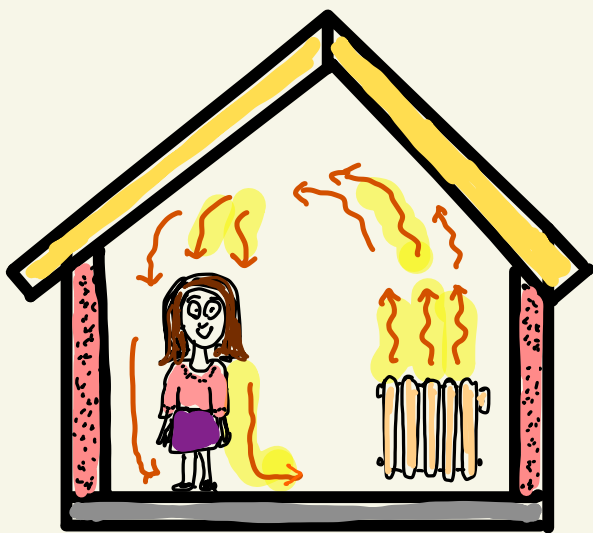
Phénomènes de transport de la chaleur

- Convection
- Loi de Newton
- Interprétation physique

La convection : mécanisme de transfert de la chaleur par mouvements macroscopiques.

Les liquides et les gaz ne sont pas des bons conducteurs de chaleur (petite conductivité thermique k), mais ils peuvent transférer la chaleur de façon très efficace par leur mouvement macroscopique.

Souvent le mouvement du fluide/gaz est causé par une différence de température : l'air chaud est plus léger que l'air froid et donc monte vers le haut en générant de "cellules convectives".



Loi empirique de transfert de chaleur convection

Loi de Newton

$$\frac{\delta Q}{dt} = hA(T_{obj} - T_o)$$

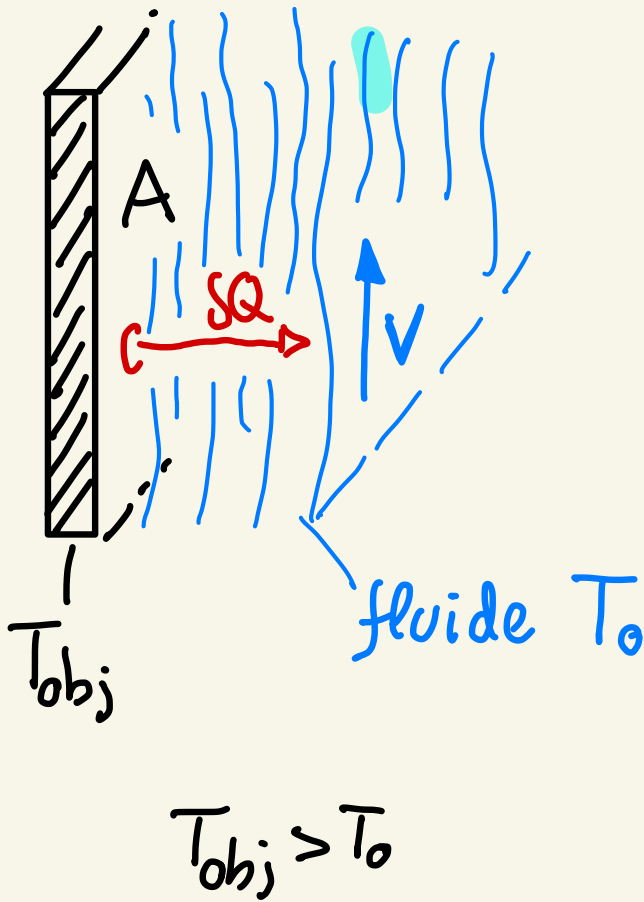
$\frac{\delta Q}{dt}$ $\equiv$ chaleur transférée de l'objet au fluide par unité de temps
 $[\frac{\delta Q}{dt}] = W$ en S.I.

$A \equiv$ surface de l'objet exposée au fluide $[m^2]$

$h \equiv$ coefficient de transfert de la chaleur

$$[h] = \frac{W}{m^2 K} \text{ en S.I.}$$

h dépend du fluide, de l'objet, de la vitesse relative et des phases du fluide (possibilité d'une transition de phase).
Donc h est un paramètre qui en réalité cache une physique très compliquée. En fait h est dans la majorité des cas mesuré expérimentalement.



Condition d'échange

$h [W/m^2K]$

Gaz en convection naturelle

5 - 37

Eau en conv. naturelle

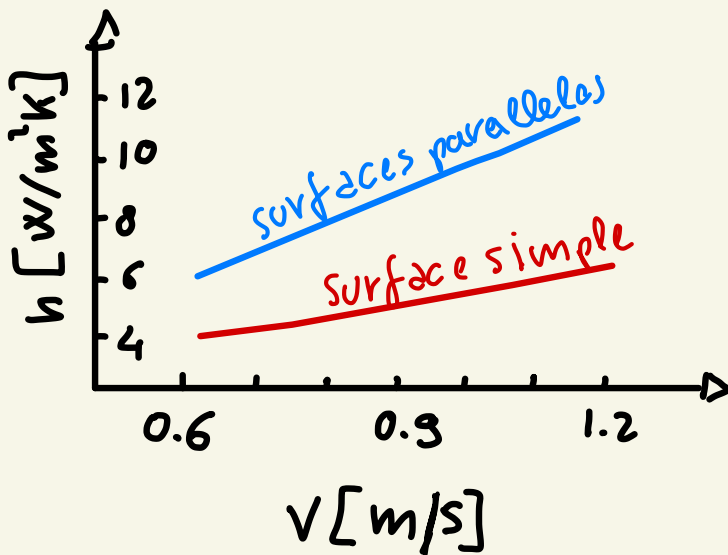
100 - 1200

Métaux liquides en tuyaux

2000 - 45.000

Vapeur d'eau qui condense

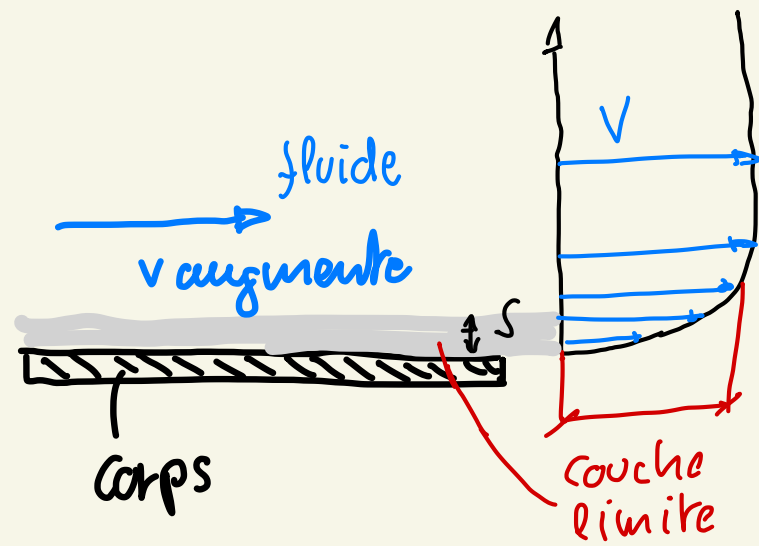
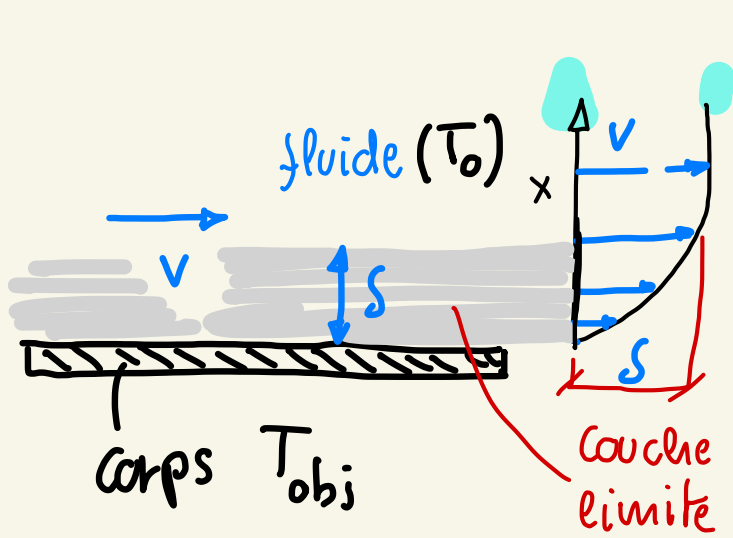
30.000 - 140.000



1) depend de la géométrie

2) augmente avec la vitesse relative

L'équation du transport de la chaleur par convection peut être expliquée qualitativement en considérant la diffusion à travers la couche limite.



La couche limite est quasi-statique ($v \approx 0$) donc le transport de la chaleur se fait par diffusion :

$$\frac{\delta Q}{dt} = \frac{T_{obj} - T_0}{\delta} \cdot A \cdot k$$

$\frac{\partial T}{\partial x}$ (conductivité thermique du fluide)

δ épaisseur de la couche limite

δ diminue (v augmente) $\rightarrow h$ augmente
 δ augmente (v diminue) $\rightarrow h$ diminue

$$\frac{\delta Q}{dt} = \left(\frac{k}{\delta} \right) (T_{obj} - T_0) \cdot A$$

$= h \equiv$ coefficient de transfert de la chaleur

Ex. Le transfert est très efficace avec un fluide turbulent (et pas laminaire) puisque la couche limite est très mince.

Phénomènes de transport de la chaleur

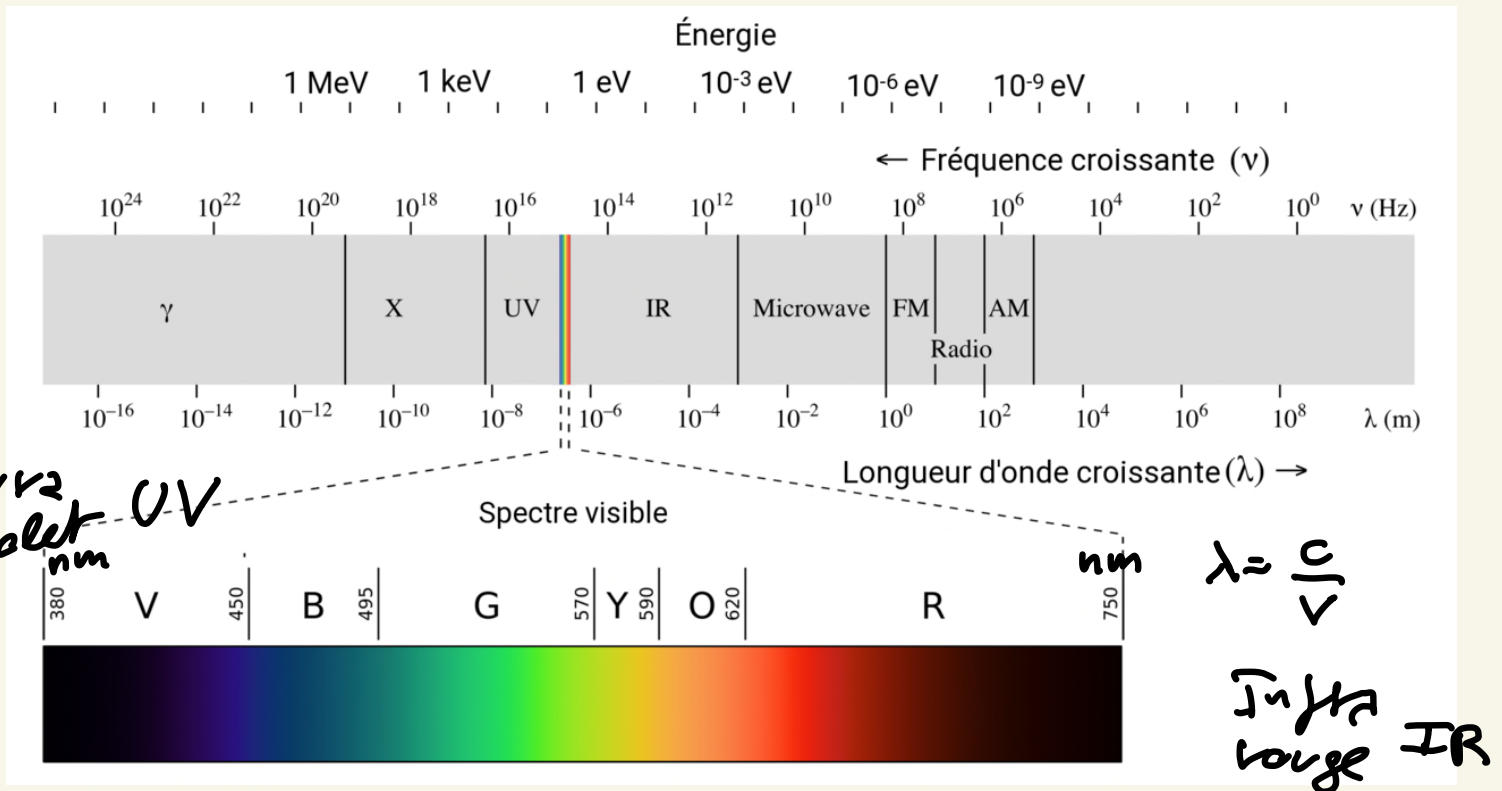
- Convection
- Rayonnement
- Émission / absorption
- Loi de Kirchhoff
- Corps noir

Conduction et convection nécessitent de la présence de matière pour le transfert de chaleur. Le rayonnement peut le faire sans aucun milieu matériels (dans le vide).

Ex. Devant une cheminée on reçoit de la chaleur pratiquement que par rayonnement: pas de conduction (on ne touche pas le feu!), ni de convection vers nous (l'air chaud monte).



Dans le rayonnement, l'énergie est transportée par des ondes électromagnétiques (dans le vide ou dans un milieu) et transférée par les ondes e.m. aux corps.



Pour bien isoler thermiquement il ne suffit pas de réduire la conduction et la convection, il faut aussi réduire les pertes par rayonnement. C'est pour ça que dans les bouteilles thermiques on a une couche de "vide" et une couche de matériel réfléchissant (ex. couverture avec couche réfléchissante $\rightarrow$ montagne, marathon...)

Émission et absorption

Tout corps qui émet de la radiation peut en absorber

Emission

$$P = \frac{\delta Q}{dt} \equiv \text{puissance totale rayonnée} \quad [P] = J/s = W \quad \text{en S.I.}$$

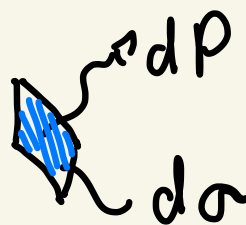
P dépend de

- Surface totale de l'objet
- longueur d'onde de la radiation
- Température de l'objet
- nature et état de la surface

Pour tenir en compte de ces facteurs on définit des quantités spécifiques

Surface

$$dP = E d\sigma$$



puissance totale rayonnée par la surface $d\sigma$

$$E \equiv \text{émittance} \quad [E] = \frac{W}{m^2} \quad \text{en S.I.}$$

$$P = \int_S E d\sigma \quad \text{ou} \quad P = E \times \text{Surface} \quad \text{si } E = \text{const.}$$

Longueur d'onde

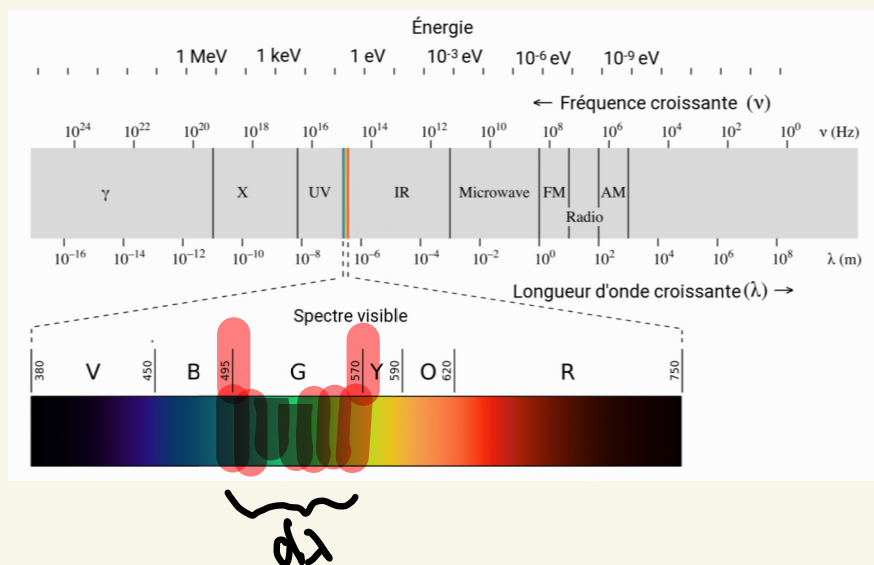
L'émission, tout comme l'absorption, dépend de la longueur d'onde λ .

Ex. Métal chauffé : si pas trop chaud il émet dans l'infrarouge. Si on le chauffe on le rend "incandescent" et il émet dans le visible (rouge...) et si on le chauffe encore plus (T augmente) il émet de plus en plus blanc.

$$dP_\lambda = E_\lambda d\lambda d\sigma$$

puissance totale rayonnée par la surface $d\sigma$ entre λ et $\lambda + d\lambda$

$$E_\lambda = \frac{dP_\lambda}{d\lambda d\sigma} \equiv \text{émittance spectrale} \quad [E_\lambda] = \frac{W}{m^2 m} = \frac{W}{m^3}$$



Absorption

Le bilan entre absorption et émission dépend aussi de λ .

Ex. Rayon de soleil sur la vitre : le rayonnement visible passe, mais pas l'infrarouge (effet serre)

$$\alpha_\lambda = \frac{\text{puissance absorbée}}{\text{puissance incidente}} \quad \text{à la longueur d'onde } \lambda$$

facteur d'absorption spectral

Quelle est la relation entre α_λ et E_λ ?

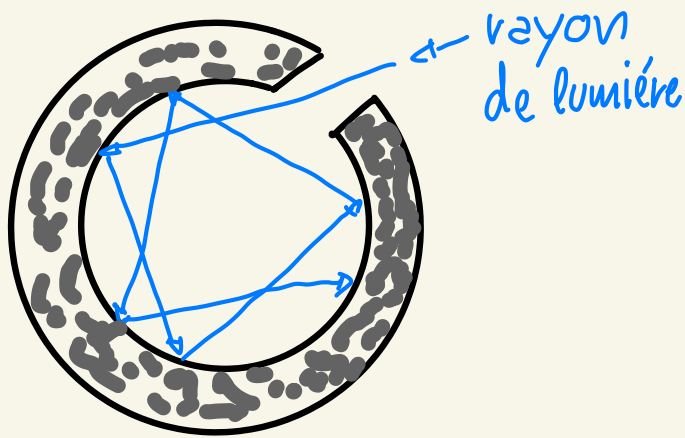
Loi de Kirchhoff : $\frac{E_\lambda}{\alpha_\lambda} = f(T)$

Le rapport dépend uniquement de la température du corps.

Autrement dit : un bon émetteur est aussi un bon absorbeur à la même longueur d'onde.

Un cas très particulier: **le corps noir**

Le corps noir est un corps qui absorbe toute la radiation incidente: $\alpha_\lambda = 1$



En pratique, il s'agit d'une cavité avec un petit trou, qui "piège" le rayonnement à l'intérieur.

Ex. Une maison (sans éclairage à l'intérieur) avec petites fenêtres, vue depuis l'extérieur apparaît sombre même pendant la journée.

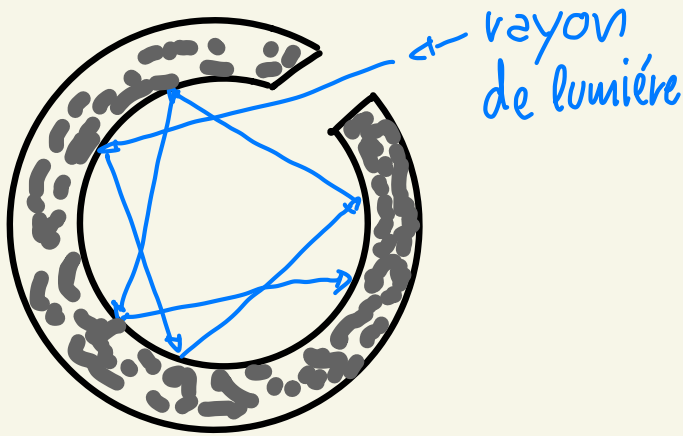


Phénomènes de transport de la chaleur

- Convection
- Rayonnement
- Emission / absorption
- Loi de Kirckhoff
- Corps noir
- Loi de Planck
- Loi de Stefan
- Corps gris
- Exemples

Le corps noir

Le corps noir est un corps qui absorbe toute la radiation incidente: $\alpha_\lambda = 1$



$$\alpha_\lambda = \frac{\text{puissance absorbée}}{\text{puissance incidente}} \quad \text{à la longueur d'onde } \lambda$$

facteur d'absorption spectral

Quelle est la relation entre α_λ et E_λ ?

Loi de Kirchhoff: $\frac{E_\lambda}{\alpha_\lambda} = f(T)$

Comme $\alpha_\lambda = 1$ pour un corps noir alors $E_\lambda = f(T)$
fonction universelle de la température du corps.

La dérivation théorique de E_λ pour le corps noir est fondamentale en physique car elle a indiqué les limites de la physique classique (lumière $\equiv$ ondes/particules)

Loi de Planck (~1900)

$$E_{\lambda}(T) = \frac{E_0}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1}$$

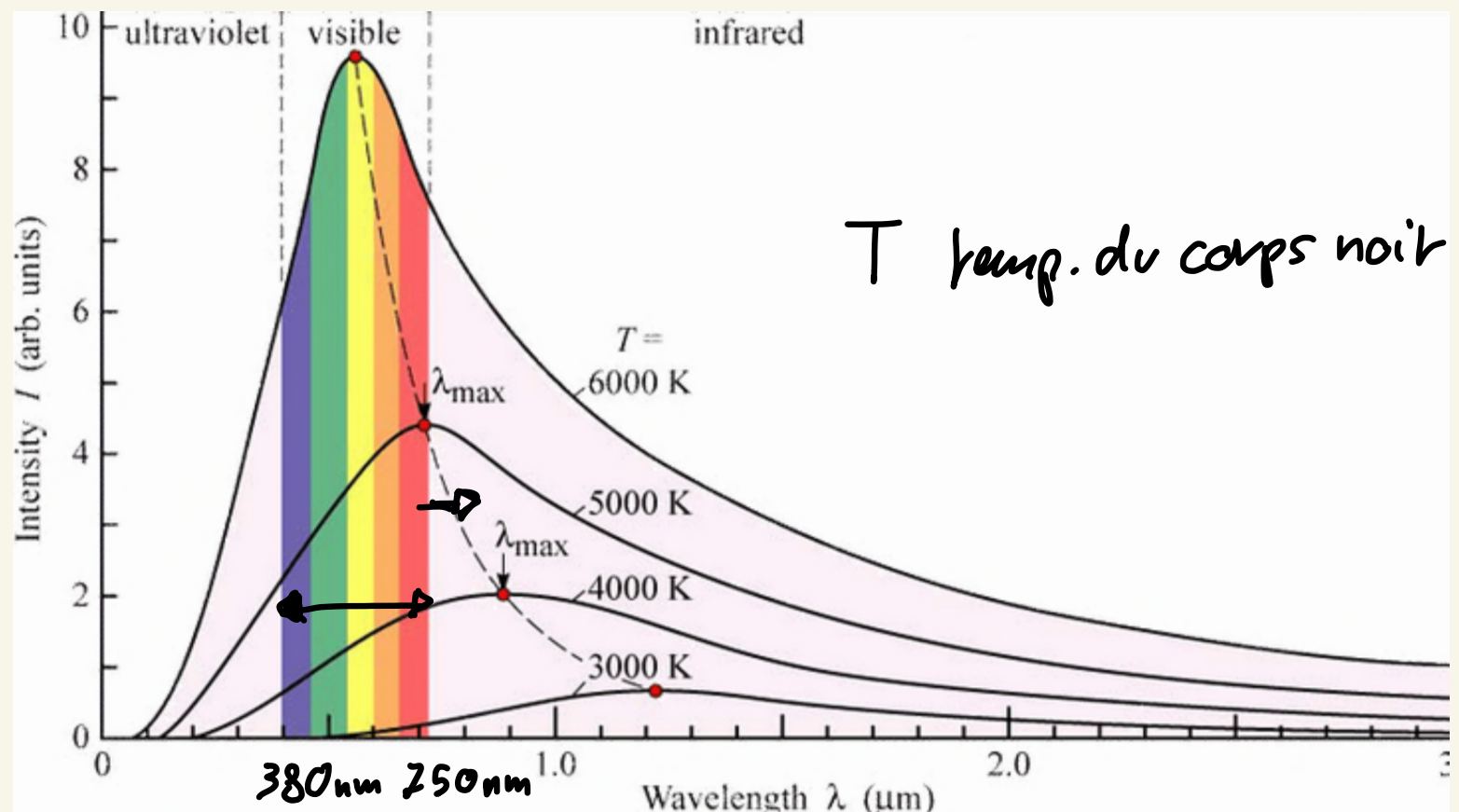
$$[E_{\lambda}(T)] = \frac{W}{m^3}$$

$h \equiv \text{const. de Planck}$

$$[h] = Js$$

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} Js$$

$$E_0 = 3.7 \cdot 10^{-16} W/m^2 = 8\pi hc$$



T temp. du corps noir

- Obs:
- 1) Si T augmente, le maximum de l'émission est à plus petite λ .
 - 2) Si T augmente $\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda$ l'émission totale augmente.

1) Le maximum de l'émission E_λ se trouve où le dénominateur a un minimum:

$$\left(e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1\right) \lambda^5 = \left(e^{\frac{a}{\lambda T}} - 1\right) \lambda^5 \quad ; \quad a = \frac{hc}{k_B}$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\left(e^{\frac{a}{\lambda T}} - 1\right) \lambda^5 \right] = 0 \rightarrow 5\lambda^4 \left(e^{\frac{a}{\lambda T}} - 1\right) + \lambda^5 e^{\frac{a}{\lambda T}} \cdot \left(-\frac{a}{\lambda^2 T}\right) = 0$$

$$\lambda^4 \left[\underbrace{5\left(e^{\frac{a}{\lambda T}} - 1\right) - \frac{a}{\lambda T} e^{\frac{a}{\lambda T}}}_{f(\lambda T)} \right] = 0$$

Sans faire autre calculs, observons que $f(\lambda T) = 0$
donne un maximum de l'émission E_λ pour $\lambda T = \text{const.}$

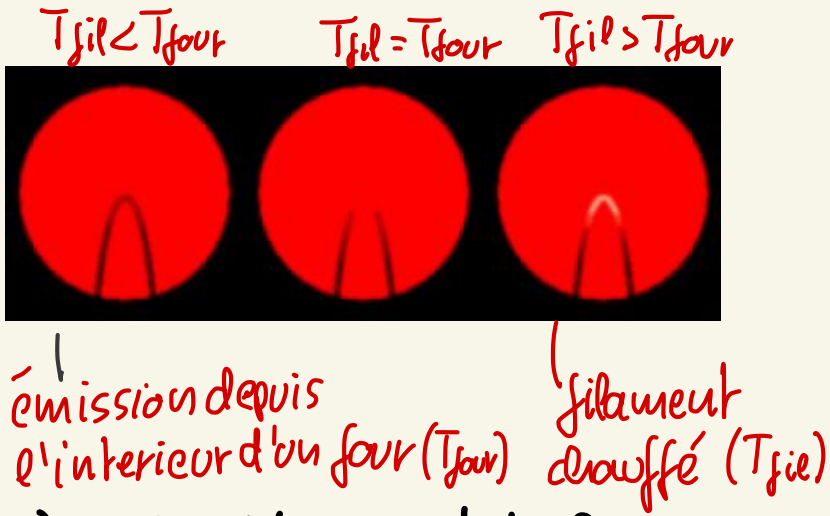
$$\lambda_{\text{max}} T = \text{const.} = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

loi de Wien

Ex. 1 On peut considérer le Soleil comme $\sim$ un corps noir.
L'émission a un maximum à $\lambda_{\text{max}} \approx 500 \text{ nm} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
(jaune/vert)

$$T_{\text{Soleil}} \approx \frac{2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \approx 5800 \text{ K}$$

Ex. 2 Le pyromètre est un appareil de mesure des hautes Températures. Par exemple, on observe l'émission visible dans un four et on la compare avec l'émission d'un filament dont on connaît la température. Quand le filament disparaît la temp. est la même.



b) Emissance totale = puissance totale émise par unité de surface $\frac{W}{m^2}$

$$E(T) = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(T) d\lambda = \dots = \text{const. } T^4 = \sigma_B T^4$$

loi de Stefan

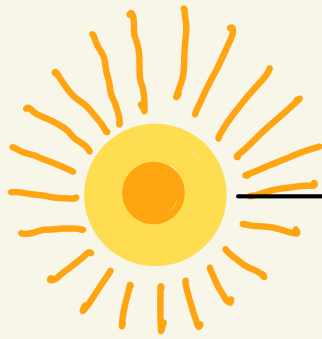
$$\sigma_B = 5.7 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

constante de Stefan-Boltzmann

Note = La puissance émise augmente très rapidement avec la température du corps.

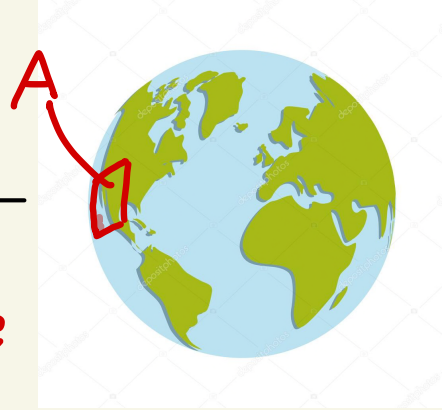
Ex. La radiation solaire : quelle est la puissance/m² qui arrive sur Terre ?

- 1) 1W/m²
- 2) 1kW/m²
- 3) 1MW/m²



Soleil

$R_{ST} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$
Unité astronomique
ou



Terre

$$R_s = 7 \times 10^8 \text{ m}$$

$$T_s \approx 5800 \text{ K}$$

La puissance totale émise par le Soleil est :

$$P_{\text{emise}} = E \times \text{surf. soleil} = \sigma_B T_s^4 \times 4\pi R_s^2$$

Surface du Soleil

La fraction qui arrive sur la surface A sur Terre est

$$P_A = \sigma_B T_s^4 \times 4\pi R_s^2 \times \frac{A}{4\pi R_{ST}^2} \rightarrow \frac{P_A}{A} = \sigma_B T_s^4 \frac{R_s^2}{R_{ST}^2}$$

$$\frac{P_A}{A} = G_B T_s^4 \frac{R_s^2}{R_{st}^2} = 5.7 \cdot 10^{-8} \cdot (5800)^4 \cdot \left(\frac{7 \cdot 10^8}{1.5 \cdot 10^{11}} \right)^2 \frac{W}{m^2} =$$

$$\approx 1400 \frac{W}{m^2}$$

Note : cette valeur ne tient pas compte ni des phénomènes atmosphériques, ni des différentes saisons etc
 En Suisse $20 \frac{W}{m^2} < P_A/A < 800 \frac{W}{m^2}$ en moyenne.

Nature et état de la surface

Extension de la loi de Stefan (selon l'état de la surf.)
 Même les corps qui ne sont pas noirs suivent la même loi pour l'émission :

$$\bar{E} = G_B T^4 \cdot e$$

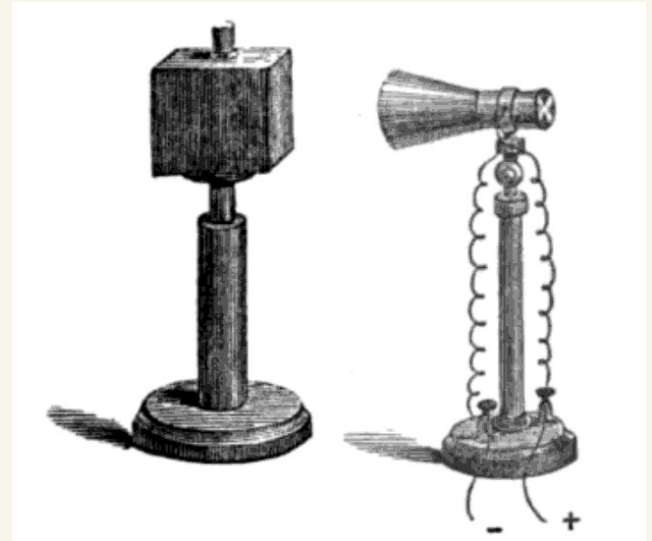
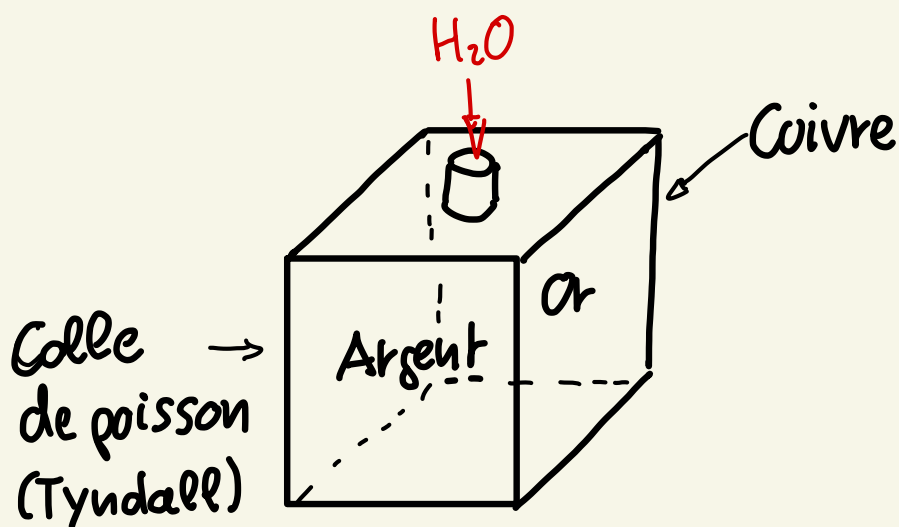
coefficient d'émission (emissivity) pris
 ($e \leq 1$, $e = 1$ pour le corps noir)

e dépend de l'état de la surface, du matériel, de la longueur d'onde

	Visible	Infrarouge
Ex. peau blanche	$e = 0.65$	~ 0.98
peau noire	$e = 0.8$	~ 0.98

Le cube de Leslie

Un cube de Leslie (mathématicien et physicien écossais 1766 - 1832) est un dispositif pour démontrer la variation de l'énergie de la radiation émise selon l'état de la surface des corps.



Wikipedia

Le cube est rempli d'eau à une température connue et la mesure de $(P = E \times \text{surface})$ la puissance rayonnée est différente selon la surface (à la même température).

Matériel	e (coeff. d'émission)
feuille d'Alu.	0.03
cuivre	0.04
peinture	0.9
eau	0.96

Equilibre entre émission et absorption pour un corps contenu dans un autre

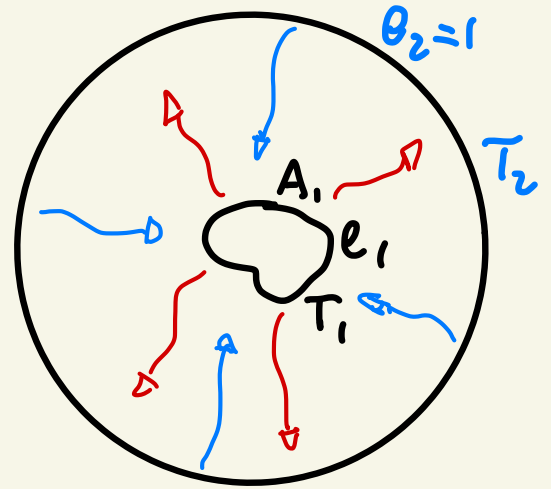
Supposons d'avoir un corps avec e, A, T_1 à l'intérieur d'un corps plus grand avec $e_2=1, T_2$.

Le premier corps émet une puissance $P_1 = e, \sigma_B T_1^4 A_1$,
le deuxième émet une puissance $P_2 = \text{const.} T_2^4$

Quelle est la valeur de const?

Faisons le bilan d'énergie sur le corps 1 :

$$P_{\text{tot},1} = \underbrace{e, \sigma_B A_1 T_1^4}_{\text{émise}} - \underbrace{\text{const } T_2^4}_{\text{absorbée}}$$



Si les deux températures se égalisent (à l'équilibre thermique)
il n'y a plus de transport de chaleur et donc $P_{\text{tot},1} = 0$,

$$\text{donc } \text{const} = e, \sigma_B A_1 \quad T_1 = T_2$$

$$P_{\text{tot},1} = e, \sigma_B A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$