

Cours gisement solaire 3eme année

Energétique

Univ M'sila

Partie I

2019/2020

LE RAYONNEMENT SOLAIRE

I : Éléments de photométrie

Une source lumineuse telle qu'une lampe à incandescence n'est rien d'autre qu'un transformateur d'énergie. Le filament chauffé par un courant électrique émet un rayonnement dont la répartition spectrale dépend des caractéristiques du filament, du gaz qui l'entoure, de l'intensité du courant. Le rayonnement électromagnétique transporte à travers l'espace une certaine quantité d'énergie avec une certaine répartition spectrale. L'énergie transportée par unité de temps est la mesure naturelle de l'intensité d'un faisceau.

Pour effectuer cette mesure, nous utilisons un récepteur qui a lui même une certaine réponse spectrale, et qui transforme par exemple l'énergie électromagnétique:

en influx nerveux s'il s'agit d'un oeil

en courant électrique s'il s'agit d'une photopile

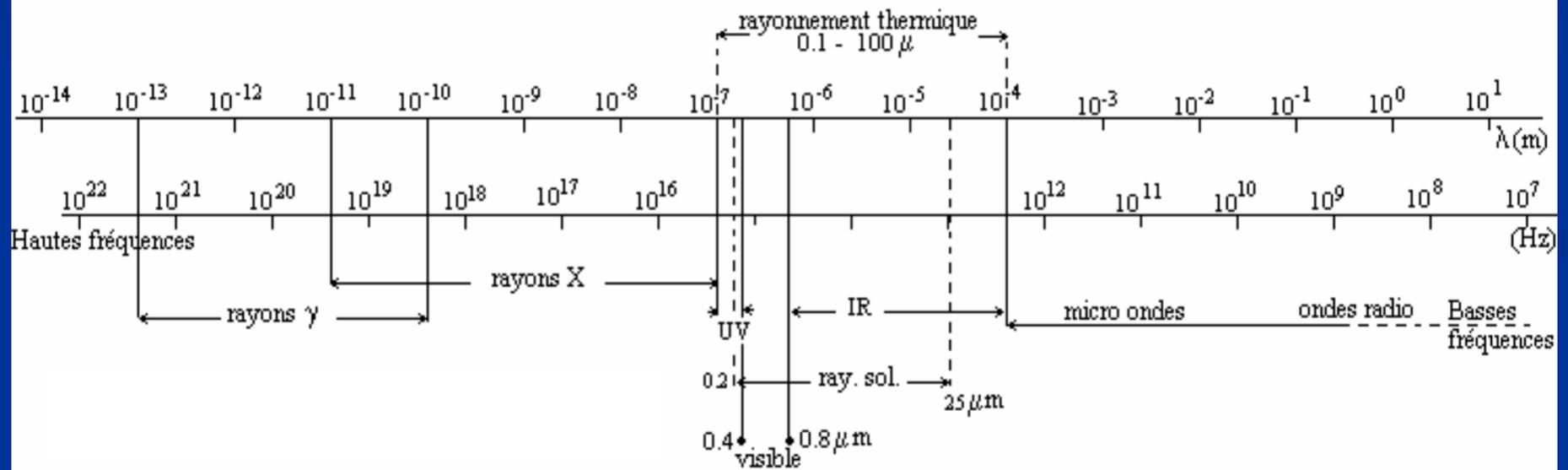
en chaleur s'il s'agit d'un pyranomètre.

1. Nature du rayonnement

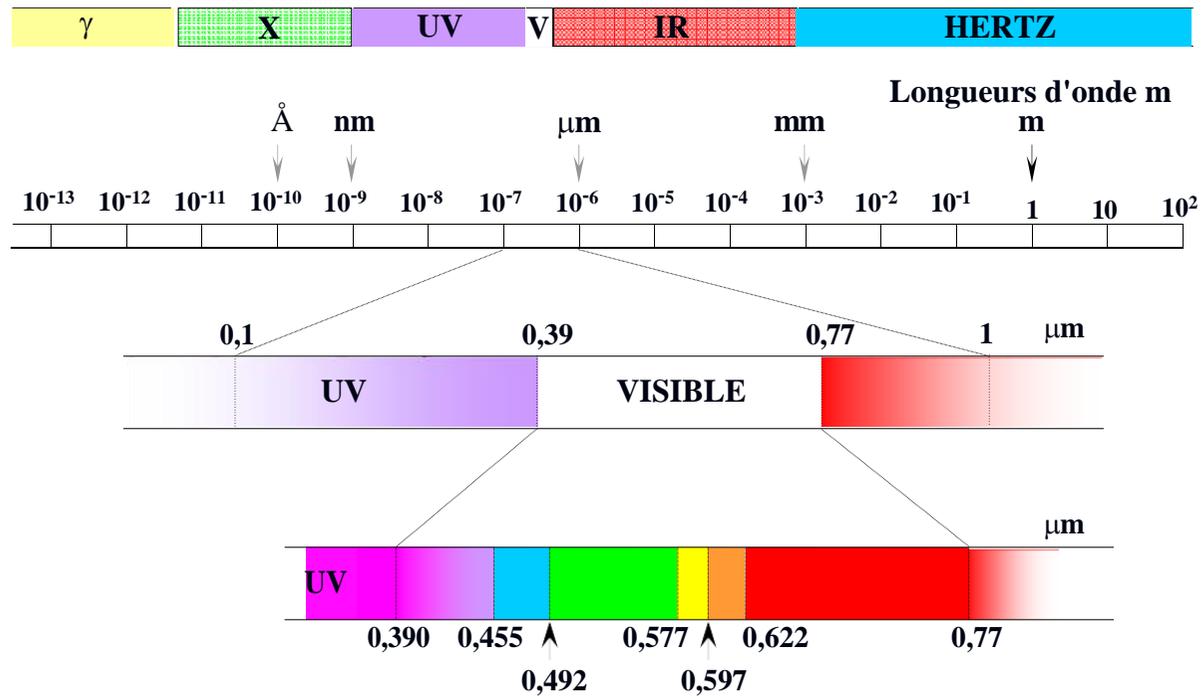
Rayonnement électromagnétique :

On appelle ainsi tout rayonnement provoqué par une **excitation** quelconque de la **matière**. Sa **vitesse** est : dans le vide $C_0 = 299\,850\text{ km/s}$, dans un milieu d'indice n , $C = C_0/n$.

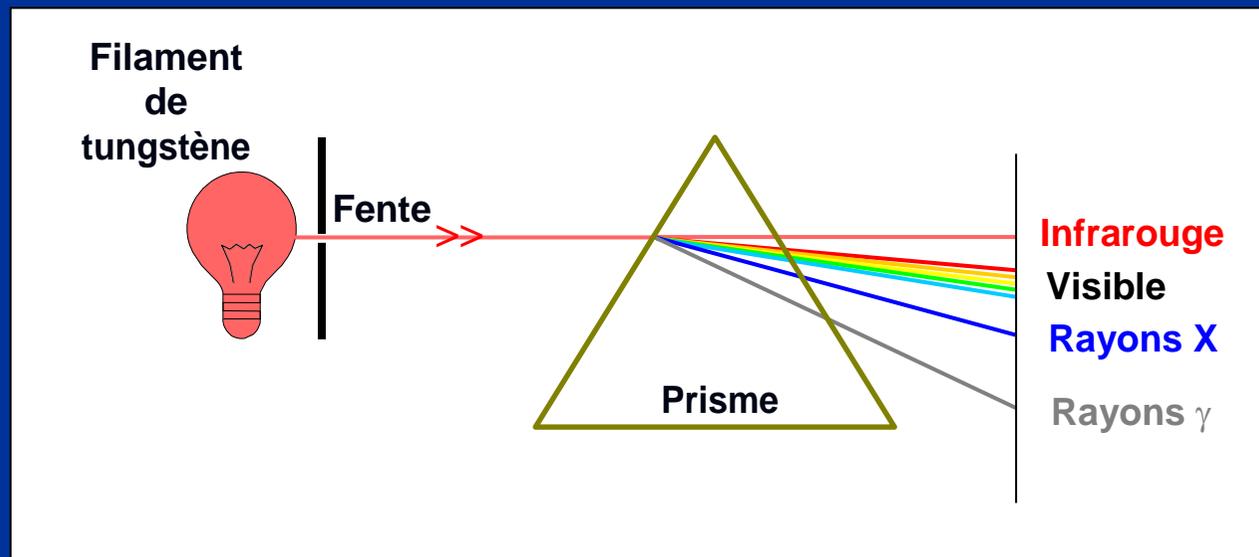
Le rayonnement électromagnétique est constitué de **radiations monochromatiques** caractérisées par une longueur d'onde λ ou fréquence ν tel que : $C = \lambda \cdot \nu$.



Spectre des ondes électromagnétiques



On peut classer le rayonnement électromagnétique en fonction de la longueur d'onde mesurée :



Rayonnement thermique :

Correspond à **l'émission** due à une augmentation de température d'un corps composé **de radiations** de longueurs d'ondes

$$0,1 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 100 \mu\text{m}$$

Le spectre solaire, en dehors de la couche atmosphérique, se répartit sur une bande allant de 0,2 à 25 μm , avec des radiations supplémentaires :

- **l'UV extrême de longueur d'onde $\lambda = 0,1216 \mu\text{m}$**
- **les rayons X de longueur d'onde $0,005 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ nm}$**
- **les rayons radioélectriques de longueur d'onde $10 \leq \lambda \leq 100 \text{ cm}$**

L'énergie de ces radiations est inférieure à 10^{-5} de l'ensemble du rayonnement solaire.

Remarque :

Les rayons lumineux ne sont pas tous d'origine thermique.

Exemple :

Fluorescence (de fluorine : minerai utilisé dans des opérations métallurgiques), sa durée de vie est courte.

Phosphorescence (cristaux de sulfure de zinc dans lesquels on introduit des traces d'un autre métal tel que l'argent), sa durée de vie est longue.

Décharge électrique dans les gaz raréfiés (flash d'un appareil photo par exemple).

Constitution physique du soleil

Le soleil apportait, grâce à l'étude de son rayonnement comme une sphère incandescente de plasma dont la température d'émission serait de 5.800 k. Son diamètre angulaire est de l'ordre d'un demi-degré ce qui fixe le rayon du soleil à 700.000 Km en prenant comme distance moyenne terre-soleil 150 millions de Km (8 minute lumière), des mesures précises (Daniel LAPLASE) effectuées à bord de satellites, qui gravitent à la limite de l'atmosphère terrestre, montrent que la distribution spectrale du rayonnement solaire est voisine de celle du corps noir idéal à la température 5800 K. Cependant des différences apparaissent dans le domaine des rayons X de ultra-violet et de l'infra-rouge

Quelques paramètres solaires essentiels

- $M_S = 2 \cdot 10^{30}$ kg masse solaire
- $R_S = 696000$ km rayon solaire
- $g_S = 275 \text{ m/s}^2$ accélération de la pesanteur à la surface solaire
- $L = 3.86 \cdot 10^{26}$ W luminosité solaire
- $1 \text{ UA} = 149600000$ km distance moyenne Terre/Soleil
- $T_e = 5800$ K température effective
- Composition : H 92.1% et He 7.8%, autres éléments (O, C, N, Fe, Mg, Ca...) en trace (0.1%)

Le rayonnement solaire :

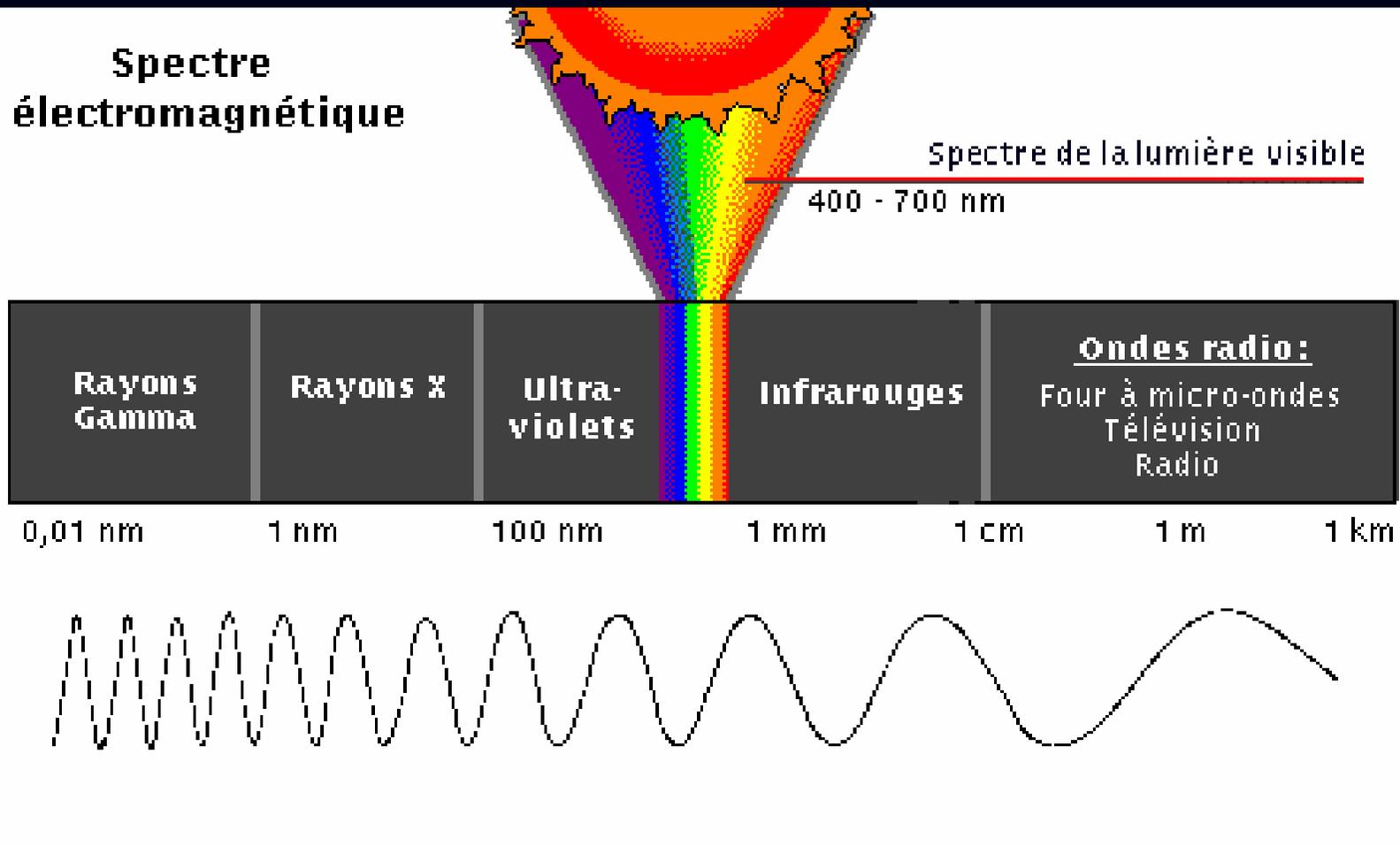
Le soleil est une étoile parfaitement standard comme les milliards d'autres étoiles dont est constitué l'univers.

Son importance pour nous c'est qu'il est à la base de notre vie.

Le rayonnement solaire recouvre une gamme assez large de longueurs d'onde, depuis **les ondes radio** (grande longueur d'onde) jusqu'aux **rayons X** (petite longueur d'onde). Il présente un maximum vers **410 nm**.

L'œil humain n'est cependant sensible qu'à une petite partie du spectre solaire : le **rayonnement visible** est compris entre **400** et **800 nm** (du violet au rouge).

Spectre électromagnétique



La lumière visible est une fenêtre étroite (**0,4 à 0,8 μm**)

Encadrée par les rayons thermiques U.V (**0,1 à 0,4 μm**)

Et le rayonnement infrarouge (**0,8 à 100 μm**)

2. Grandeurs énergétiques liées au rayonnement

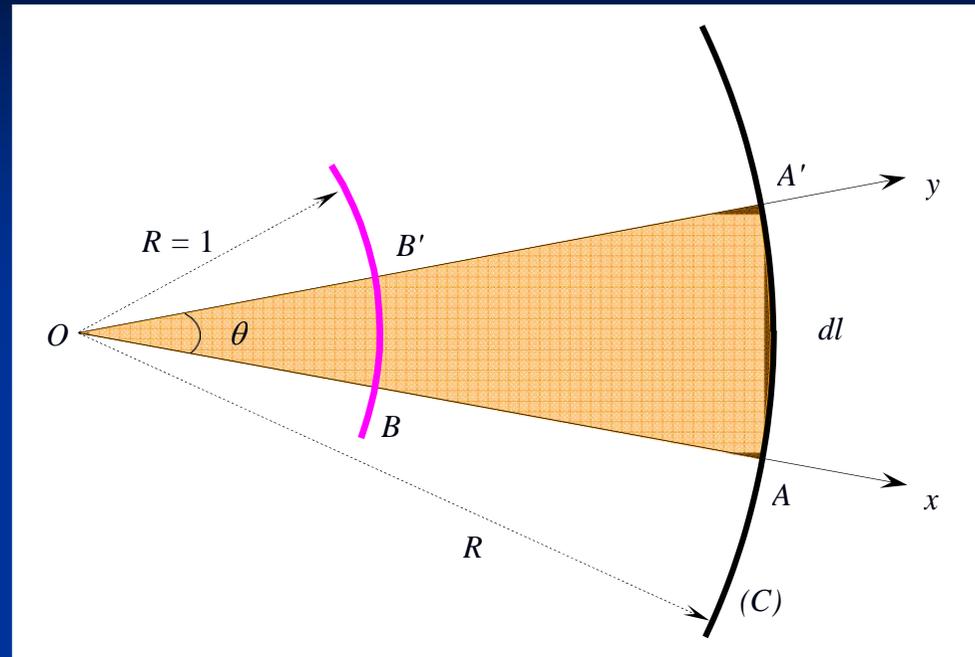
Dans un **milieu transparent et homogène**, le rayonnement se propage en **ligne droite**.

Nous considérons qu'une **quantité d'énergie Q** se propage sous forme de **rayonnement électromagnétique**, selon des **rayons de propagation**.

Angle solide Ω : en géométrie plane, on caractérise la portion de plan comprise entre deux demi-droites Ox et Oy par l'angle :

$$\theta = \frac{dl}{R}$$

tel que :

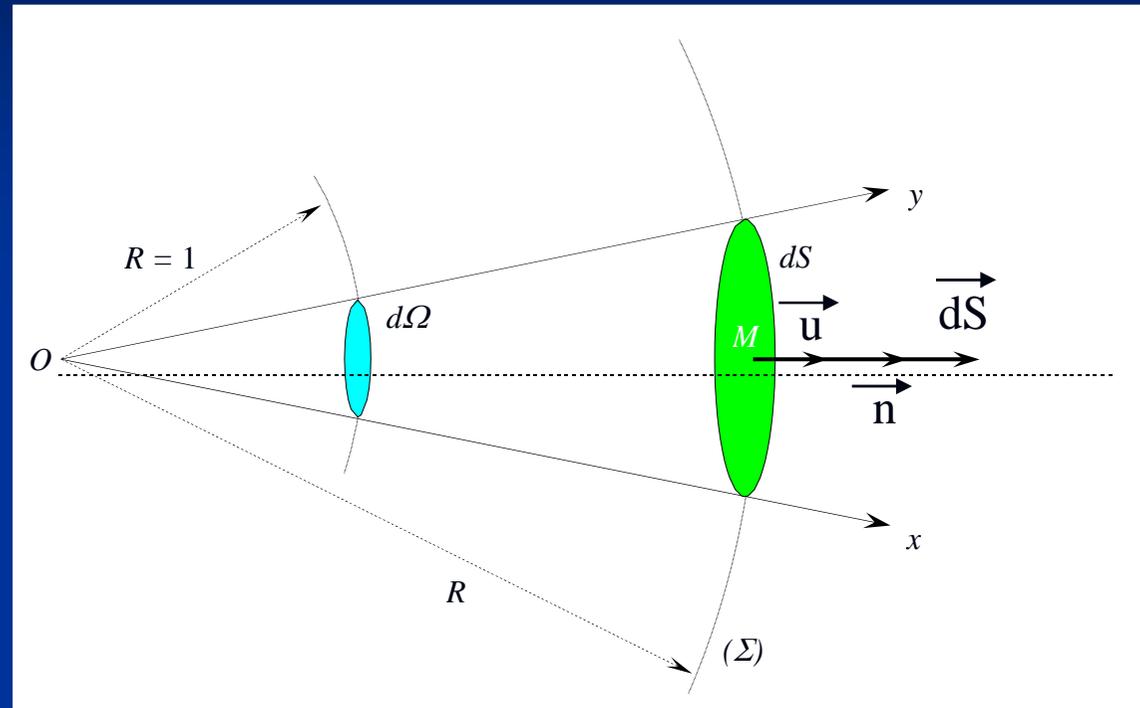


$dl = \widehat{AA'}$ est l'arc de cercle découpé sur le cercle (C) de rayon R

La mesure de θ est encore égale à la longueur $\widehat{BB'}$ de l'arc découpé sur le cercle de rayon 1.

L'angle θ est sans dimension.

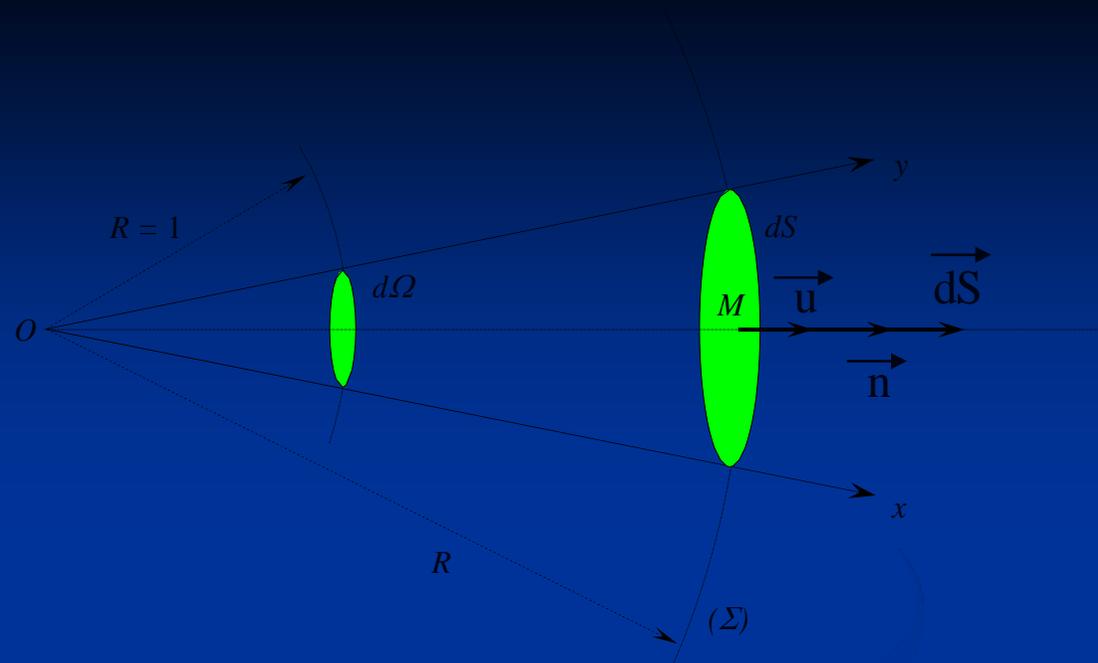
De manière analogue, on caractérise la portion de l'espace intérieure à un cône par un angle solide dont la mesure sera :



Soit l'aire $d\Omega$
découpée sur une
sphère de rayon $R = 1$

Soit le rapport entre
l'aire dS découpée sur
une sphère (Σ) et le
carré de son rayon R

L'angle solide élémentaire $d\Omega$ sous lequel, du point O , on voit un élément de surface dS de la sphère (Σ) est défini par la relation :



$$\frac{d\Omega}{1^2} = d\Omega = \frac{\vec{dS} \cdot \vec{u}}{R^2} = \frac{dS \cdot \vec{n} \cdot \vec{u}}{R^2}$$

$$= \frac{dS \cos(\alpha)}{R^2} = \frac{d\Sigma}{R^2}$$

\vec{dS} : vecteur élément de surface ;

\vec{u} : vecteur unitaire du rayon vecteur \vec{OM} : $\vec{u} = \frac{\vec{OM}}{R}$;

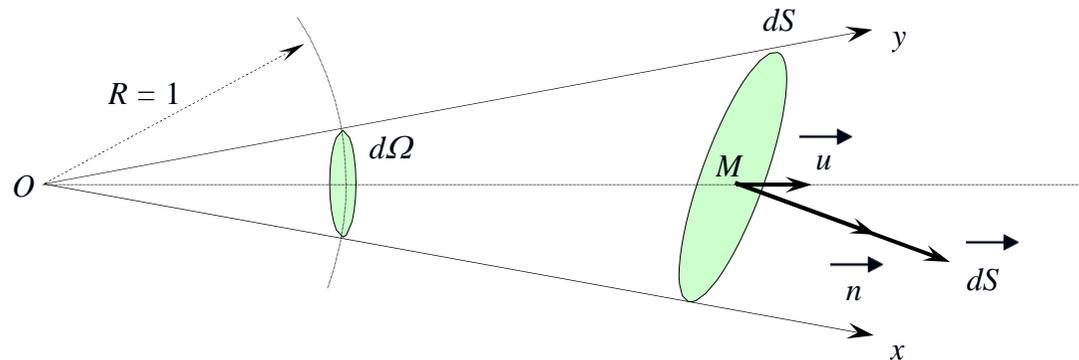
\vec{n} : vecteur unitaire normal à dS ;

$\alpha = (\vec{u}, \vec{n})$;

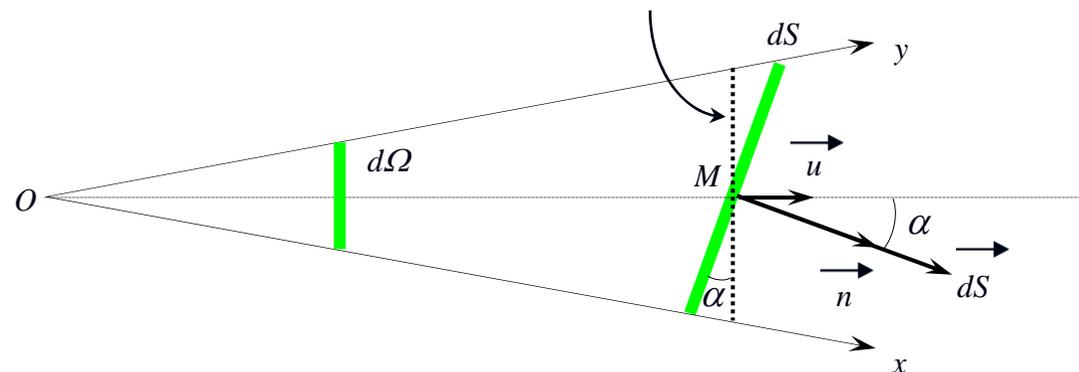
$d\Sigma = dS \cos(\alpha)$: élément d'aire projetée.

D'une manière générale, l'angle solide élémentaire $d\Omega$ sous lequel, d'un point O , on voit un élément de surface dS centré sur M est défini par la relation :

$$d\Omega = \frac{\vec{dS} \cdot \vec{u}}{R^2} = \frac{dS \cos(\alpha)}{R^2} = \frac{d\Sigma}{R^2}$$



$$d\Sigma = dS \cos(\alpha)$$

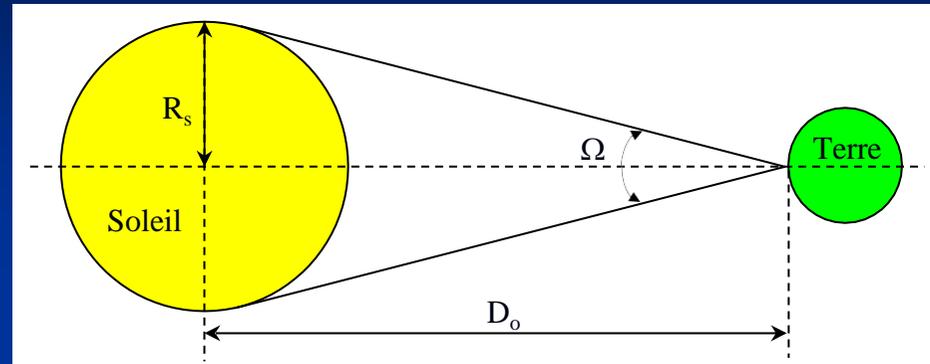


Exemple : Quel est l'angle solide Ω sous lequel de la terre on voit le soleil, sachant que :

- la distance moyenne terre-soleil est :

$$D_o = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} ;$$

- le rayon du soleil est : $R_s = 0,7 \cdot 10^6 \text{ km}$.



Solution :

L'angle solide sous lequel le soleil est vu de la terre est :

$$\Omega = \int_{S_s} d\Omega = \int_{S_s} \frac{dS \cos(\alpha)}{D^2}$$

En supposant que le soleil est au zénith du lieu d'observation :

$$\alpha = 0, \text{ et } \cos(\alpha) = 1$$

$$\Omega = \pi \frac{R_s^2}{D_o^2} = \pi \frac{(0,7 \cdot 10^6)^2}{(149,6 \cdot 10^6)^2} = 0,6878 \cdot 10^{-4} \text{ stéradians}$$

Flux énergétique ϕ :

le **flux énergétique** de rayonnement, c'est la **puissance émise** par une source, **transportée** par un faisceau ou **reçue** par une surface sous forme de rayonnement, et on l'exprime en Watts (W) :

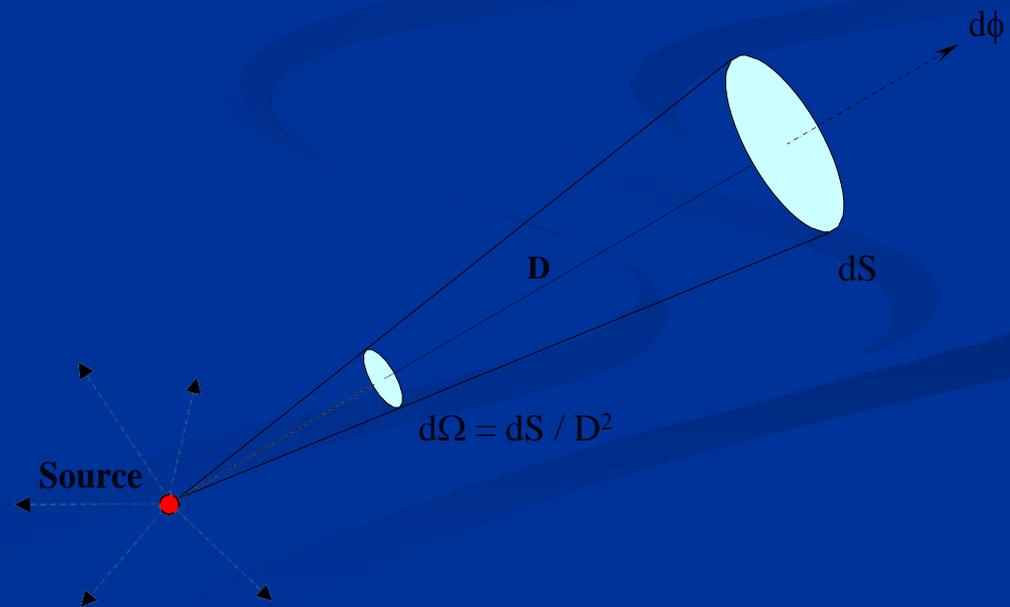
$$\phi = \frac{dQ}{dt}$$

Intensité énergétique : I

L'intensité **I** d'un faisceau ou d'une source dans une direction donnée est le quotient d'une portion $d\phi$ du flux émis par la source dans une direction considérée, dans un cône infiniment petit, axé sur cette direction, par l'angle solide élémentaire $d\Omega$ déterminé par ce cône :

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$$

(W.sr⁻¹)



Emittance énergétique : M

L'émittance énergétique M d'une source, en un point d'une surface émissive, est le quotient du flux $d\phi$ à partir d'un élément infiniment petit entourant le point, par l'aire dS de cet élément :

$$M = \frac{d\phi}{dS}$$

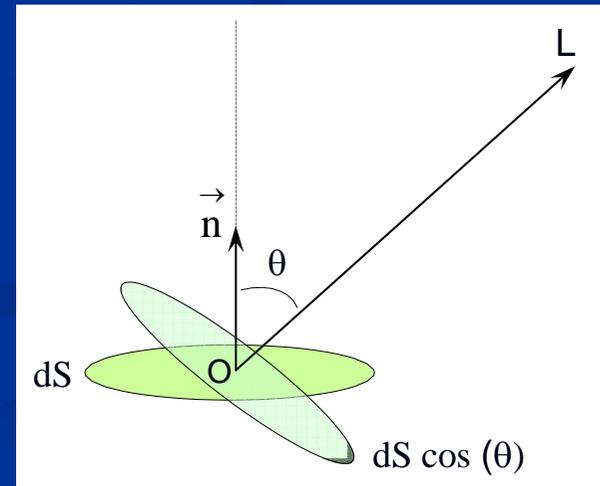
($W.m^{-2}$)

Luminance énergétique : L

La luminance du point O situé dans un élément dS d'une source, dans une direction faisant un angle θ avec la normale à dS est égale au quotient de l'intensité dI en ce point par l'aire de la projection de dS perpendiculairement à cette direction :

$$L = \frac{dI}{dS \cos(\theta)} = \frac{d^2 \phi}{d\Omega dS \cos(\theta)}$$

($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$)



Eclairement énergétique : E (ou Irradiance)

L'éclairement énergétique E en un point d'une surface réceptrice est le quotient du flux reçu par un élément infiniment petit entourant le point, par l'aire de cet élément :

$$E = \frac{d\phi}{dS}$$

(W.m⁻²)

Application : Flux solaire total intercepté par la terre

Le flux total rayonné par le soleil de rayon r_s dans toutes les directions est : $\phi = M \cdot S_{\text{Soleil}} = M \cdot 4 \pi r_s^2$

Ce flux est intercepté par la surface interne de la sphère de centre le soleil, de rayon d_o et de surface : $S_{\text{Sphère}} = 4 \pi d_o^2$

L'éclairement total de cette sphère est :

La surface apparente de la terre est le disque de surface : $S_t = \pi \cdot r_t^2$

L'éclairement de la surface S_t est : $E_{\text{Terre}} = E_{\text{Total}} \cdot S_t = M \cdot \frac{S_{\text{Soleil}}}{S_{\text{Sphère}}} \cdot S_t$

$$E_{\text{Terre}} = M \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r_s^2}{4 \cdot \pi \cdot d_o^2} \cdot \pi \cdot r_t^2 = \left(\frac{M}{\pi} \right) \cdot (\pi \cdot r_s^2) \cdot \left(\frac{\pi \cdot r_t^2}{d_o^2} \right) \rightarrow E_{\text{Terre}} = L \cdot S \cdot \Omega$$

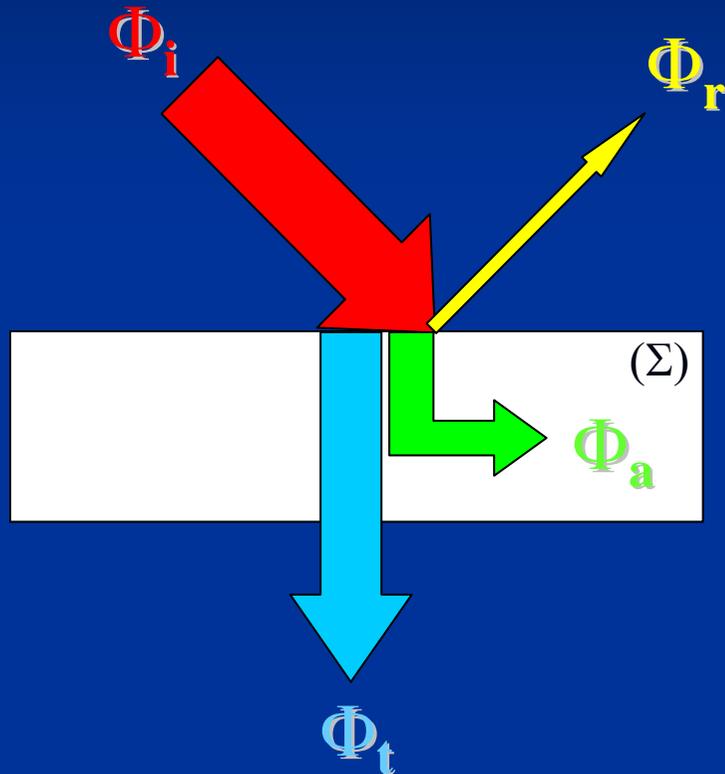
Luminance du soleil
en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$

Surface apparente
du soleil en m^2

Angle solide sous lequel
la terre est vue, en sr²⁴

3. Réflexion, absorption et transmission

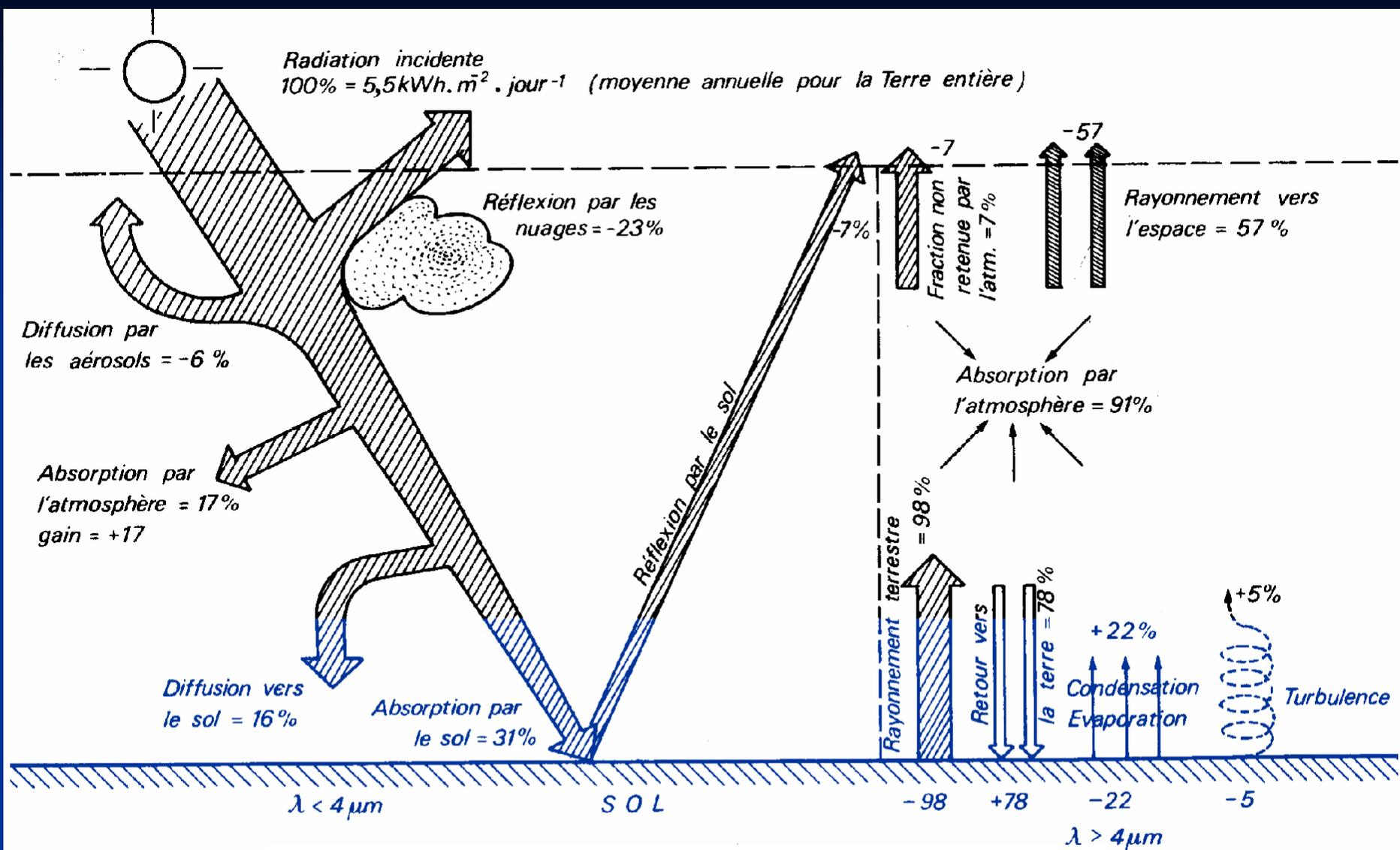
Considérons un flux total Φ_i incident sur une surface (Σ)



$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

$$1 = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

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



Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre.

4. Corps noir

Définition :

C'est un corps qui absorbe **tout** le rayonnement incident :

$$\alpha_{\lambda} = 1$$

Sans en réfléchir ni transmettre aucune fraction :

$$\rho_{\lambda} = 0, \quad \tau_{\lambda} = 0$$

Quelque soient les longueurs d'onde et les directions de propagation

A une température donnée, un corps noir **rayonne le maximum d'énergie** pour chaque longueur d'onde.

4.2. Loi de PLANCK

Cette loi relie l'émittance monochromatique M_λ^o du corps noir à la longueur d'onde λ , et à sa température absolue T .

Elle s'exprime sous la forme :

$$M_\lambda^o = \frac{2 \pi h C^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \quad (\text{W.m}^{-3})$$

$C = C_0 / n$: vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu où se propage le rayonnement.

n : indice de réfraction du milieu.

$C_0 = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s : vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

$h = 6,6255 \cdot 10^{-34}$ J.s : la constante de PLANCK.

$k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ J/K : la constante de BOLTZMANN.

Loi de Planck appliquée au rayonnement dans le vide ou dans l'air

Lorsque le rayonnement se propage dans le vide
(indice de réfraction $n = 1$)

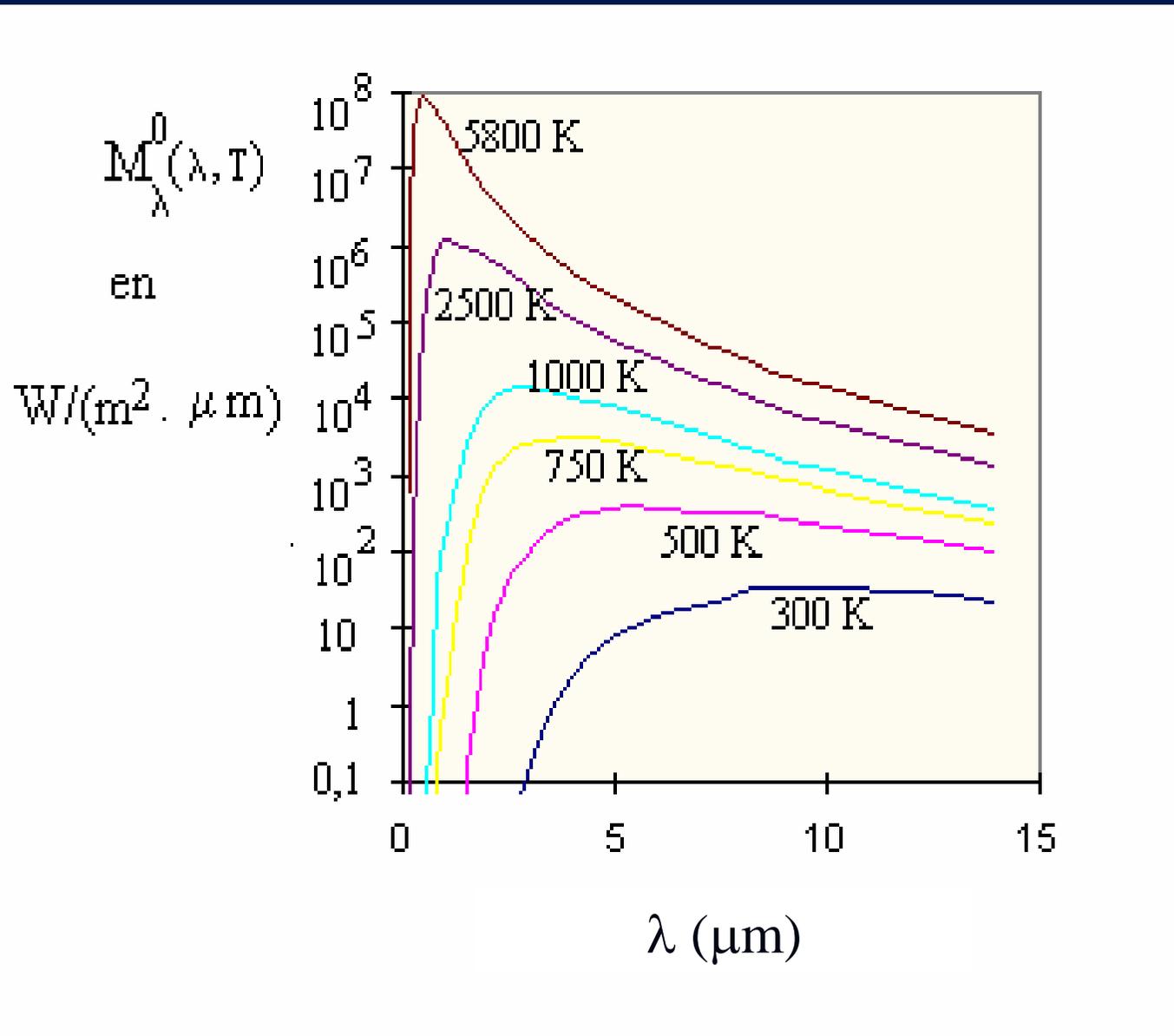
$$M_{\lambda}^o = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\text{Exp} \left(\frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1}$$

$$C_1 = 2 \pi h C_0^2 = 3,741.10^{-16} \text{ W.m}^2$$

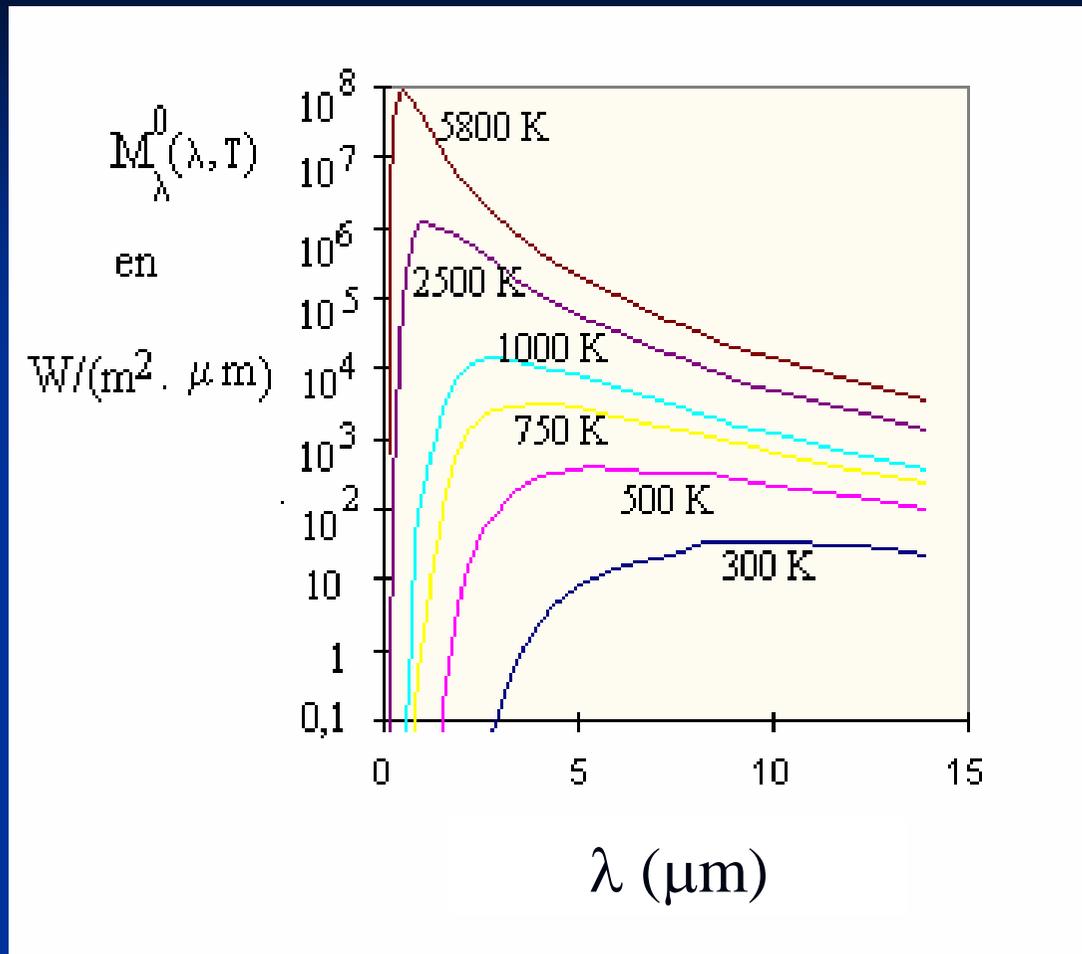
$$C_2 = hC_0/k = 0,014388 \text{ m.K}$$

$$\lambda \text{ en m, } T \text{ en K, } M_{\lambda}^o \text{ en W/m}^3$$

Emittance monochromatique du corps noir



5. Lois de WIEN



Deux lois fournissent respectivement l'abscisse λ_m et l'ordonnée du maximum d'émittance monochromatique du corps noir à chaque température.

1ère loi de WIEN, ou loi du déplacement

La « loi du déplacement » de WIEN :

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

Exprime le fait que l'abscisse λ_m du maximum de M_λ^0 se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température T croît.

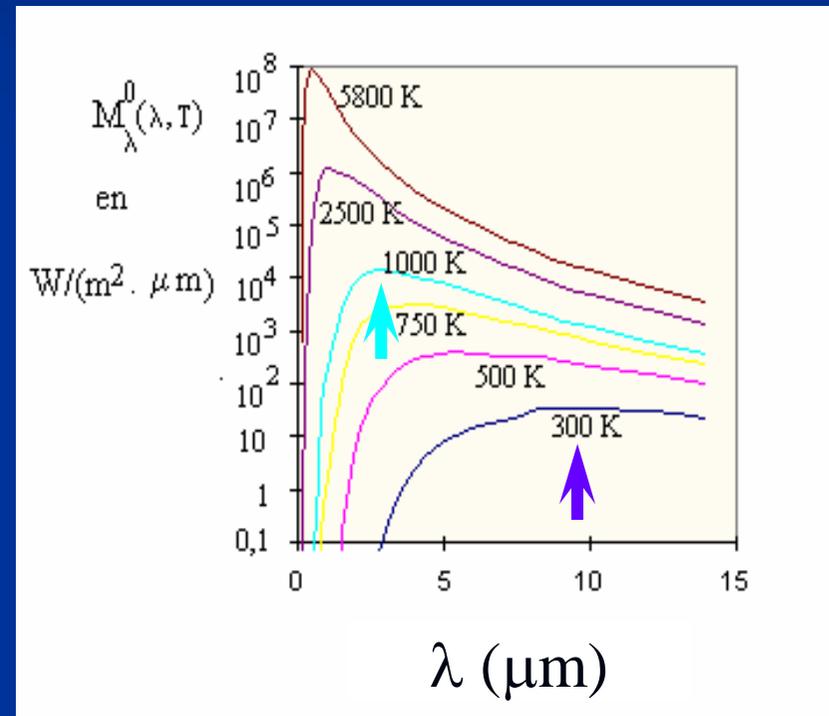
Exemples :

$$T = 300 \text{ K (17 }^\circ\text{C)}$$

$$\lambda_m = 2898/300 = 9,66 \mu\text{m}$$

$$T = 1000 \text{ K (727 }^\circ\text{C)}$$

$$\lambda_m = 2898/1000 = 2,898 \mu\text{m}$$



2ème loi de WIEN

La 2ème loi de WIEN fournit la valeur du maximum $M_{\lambda_m}^0$ en fonction de la température T :

$$M_{\lambda_m}^0 = B.T^5$$

$$B = 1,287.10^{-11} \text{ W}/(\text{m}^2.\mu\text{m}.\text{K}^5)$$

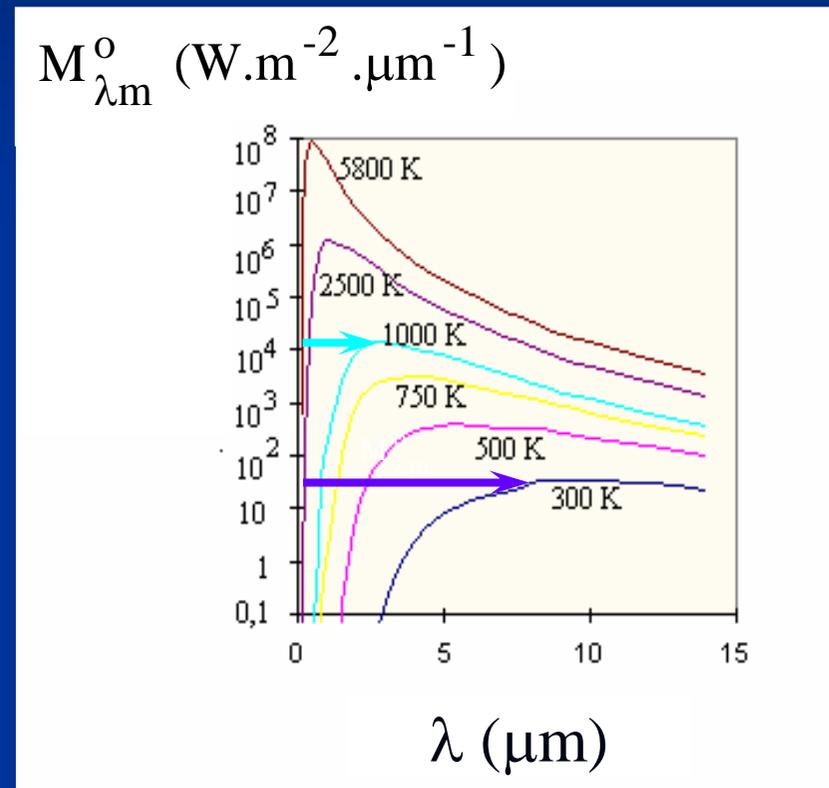
Exemples :

$$T = 300 \text{ K } (17 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$M_{\lambda_m}^0 = 31,3 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$$

$$T = 1000 \text{ K } (727 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$M_{\lambda_m}^0 = 1,287.10^4 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$$



6. Loi de STEFAN-BOLTZMANN

Emittance totale du rayonnement du corps noir
en fonction de sa température absolue

$$M^{\circ} = \sigma T^4$$

en Wm^{-2}

T en K

Constante de BOLTZMANN

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

Emittance du soleil

$$M^0 = \sigma T^4$$

en W/m^2

En K

constante de BOLTZMANN

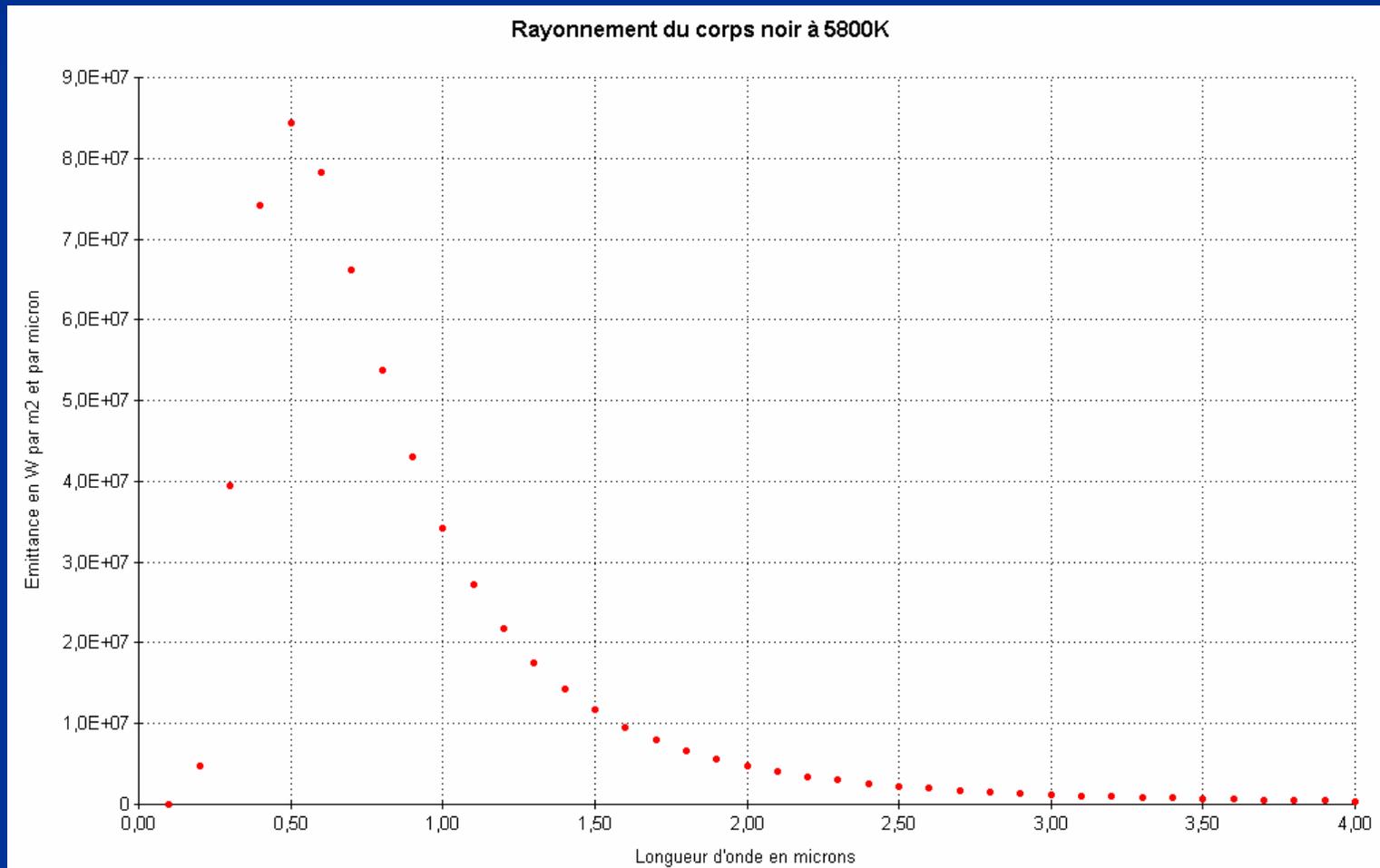
$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$$M^0 = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (5,8 \cdot 10^3)^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$M^0 = 64 \text{ MWm}^{-2}$$

Calcul direct de l'émittance du soleil

$$M_{\lambda}^o = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\text{Exp} \left[\frac{C_2}{\lambda T} \right] - 1}$$



Flux Φ rayonné par le soleil

$$\Phi = M^{\circ} \cdot S_{\text{soleil}}$$

Rayon du soleil : $R_s = 696\,000 \text{ km}$

Surface du soleil : $S = 4\pi R_s^2 = 4\pi(6,96 \cdot 10^8)^2 = 6,08 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$

d'où le Flux :

$$\Phi = M^{\circ} \cdot S_{\text{soleil}} = 6,4 \cdot 10^7 \cdot 6,08 \cdot 10^{18} = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

$$\Phi = 3,9 \cdot 10^{20} \text{ MW}$$

Densité de Flux à la distance d du soleil

A la distance $d = 150$ millions de km du Soleil, l'aire de la surface réceptrice vaut $4\pi d^2 = 4\pi (1,5 \cdot 10^{11})^2 \text{ (m}^2\text{)}$

La densité de Flux reçue à cette distance d est :

$$\varphi = \frac{\Phi}{4\pi d^2} = \frac{3,9 \cdot 10^{26}}{4\pi (1,5 \cdot 10^{11})^2} = 1380 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\varphi = 1380 \text{ W.m}^{-2}$$

Flux solaire intercepté par la Terre

Surface du disque terrestre : $\pi R_t^2 = \pi (6,38 \cdot 10^6)^2 = 1,28 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$

Surface du soleil : $4 \pi R_s^2 = 4 \pi (6,96 \cdot 10^8)^2 = 6,08 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$

Flux solaire total intercepté par la terre:

$$\Phi_i = [(M^\circ \cdot 4 \pi R_s^2) / 4\pi d^2] \cdot (\pi R_t^2) \quad (\text{watt})$$

Avec $M^\circ = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$

$$\Phi_i = 1,76 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

Φ_i est réparti sur une surface moyenne de $1,28 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$

soit : 1380 W/m^2

Equilibre radiatif de la Terre

La Terre est en moyenne à une température d'équilibre T_0

Le flux rayonné par la Terre est égal à : σT_0^4 (W/m²)

Le flux effectivement absorbé par la Terre est
seulement une fraction des **1380 W/m²** incidents
soit environ : **400 W/m²**

(le reste étant absorbé par l'atmosphère ou réfléchi par les océans)

Ce qui exige l'égalité entre les flux radiatifs reçus et émis.

BIBLIOGRAPHIE :

- 1) Transfert chaleur par rayonnement - 1° partie, 2° partie, 3° partie,
Notes de Physique, Université de Lille (UDL)**
- 2) Gisement solaire et transferts énergétiques Université de CERGY**

PONTOISE © Alain Ricaud Jan 2011

