

A deep-field image of a star-forming region in the Large Magellanic Cloud (LMC), showing a dense field of stars and interstellar dust. The stars are concentrated in a central area, with some brighter stars showing prominent diffraction spikes. The dust is visible as dark, irregular patches against the blue background of the star field.

# Transferts & échanges en astrophysique

Roland Lehoucq  
CEA Saclay, Service d'astrophysique

Région de formation d'étoiles LH95 du LMC (ESA/Hubble)



# Phénomènes de transfert

Quand une quantité n'est pas homogène dans l'espace, un transfert se produit spontanément d'une région à l'autre.

Quantité inhomogène	Phénomène induit
Pression	Travail mécanique
Concentration	Diffusion, osmose
Charge électrique	Courant électrique
Température/énergie	Conduction/diffusion thermique, rayonnement
Masse volumique/entropie	Convection
Salaire horaire, impôts	Délocalisation
Prix	Concurrence

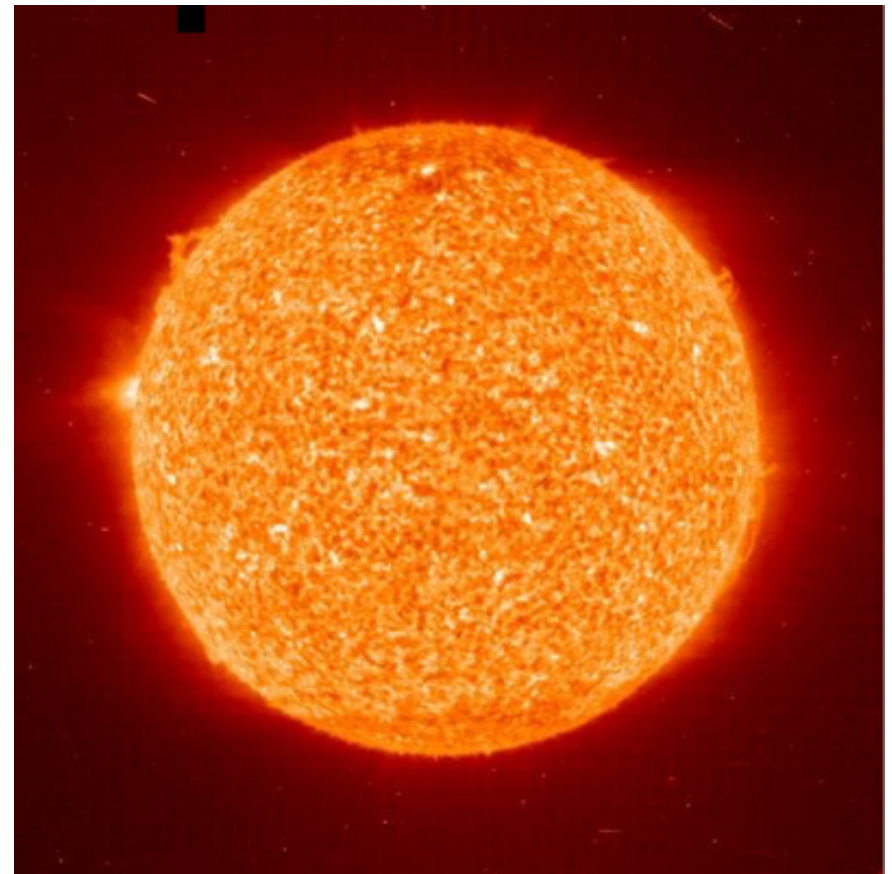
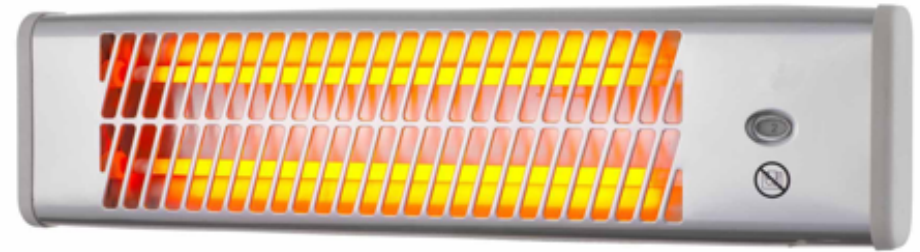
# TRANSFERT DU RAYONNEMENT

Émission, diffusion, absorption

Équilibre radiatif

Épaisseur optique

Le **rayonnement** permet le transfert d'énergie par émission de lumière (ou de particules).





# 1. Émission de lumière

Tout corps émet un rayonnement lumineux qui dépend de sa température.



## **Loi de Stefan (1879)**

Plus un corps est chaud, plus il est lumineux (2 fois plus chaud, 16 fois plus lumineux)

## **Loi de Wien (1893)**

Plus un corps est chaud, plus il émet dans le « bleu ».

Soleil à 5 500°C : 0,5 micron (visible) ; Corps humain à 37°C : 10 microns (infrarouge)

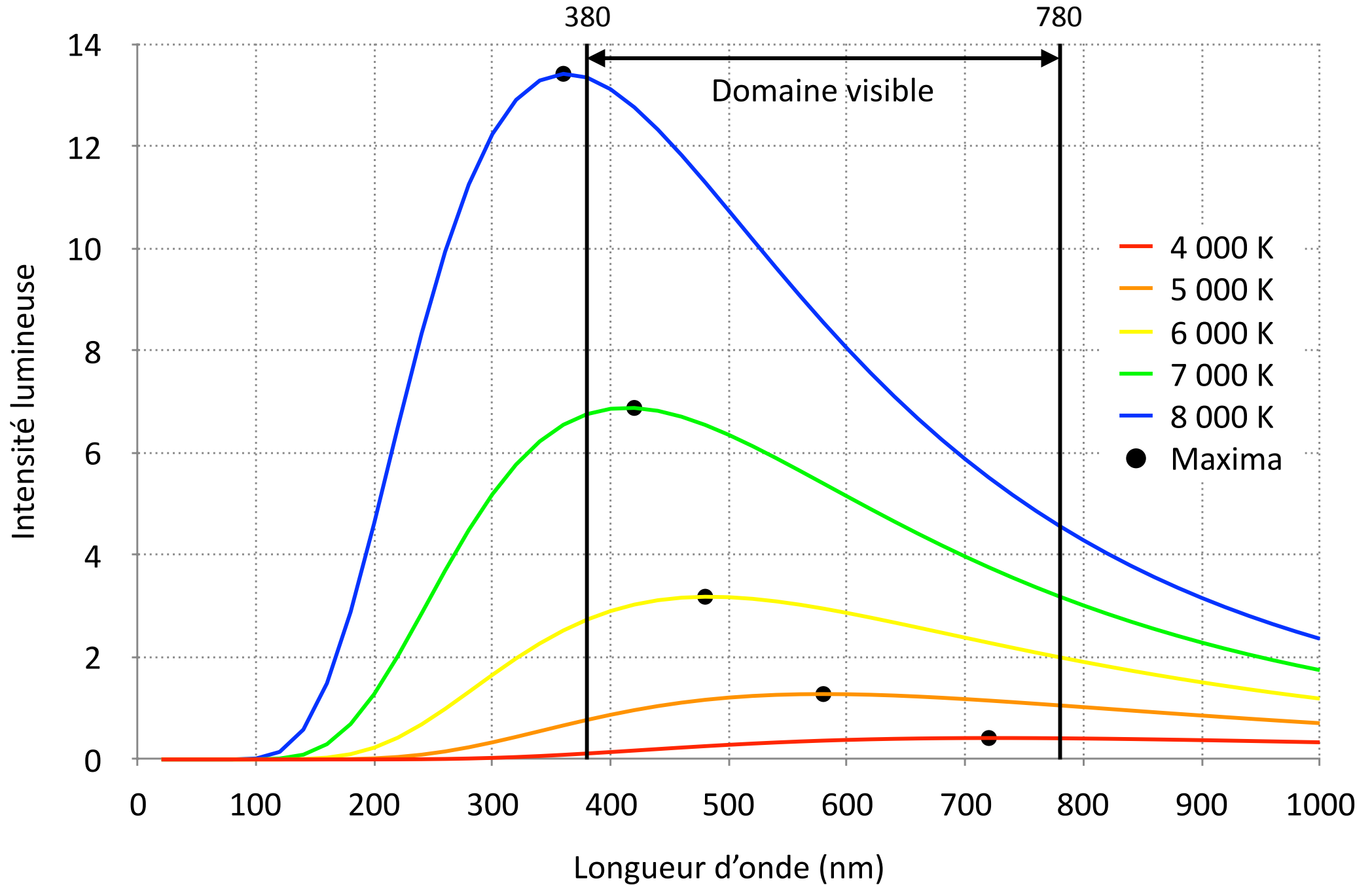




Le Venture Star en orbite autour de Pandora (*Avatar*, 2009, J. Cameron)

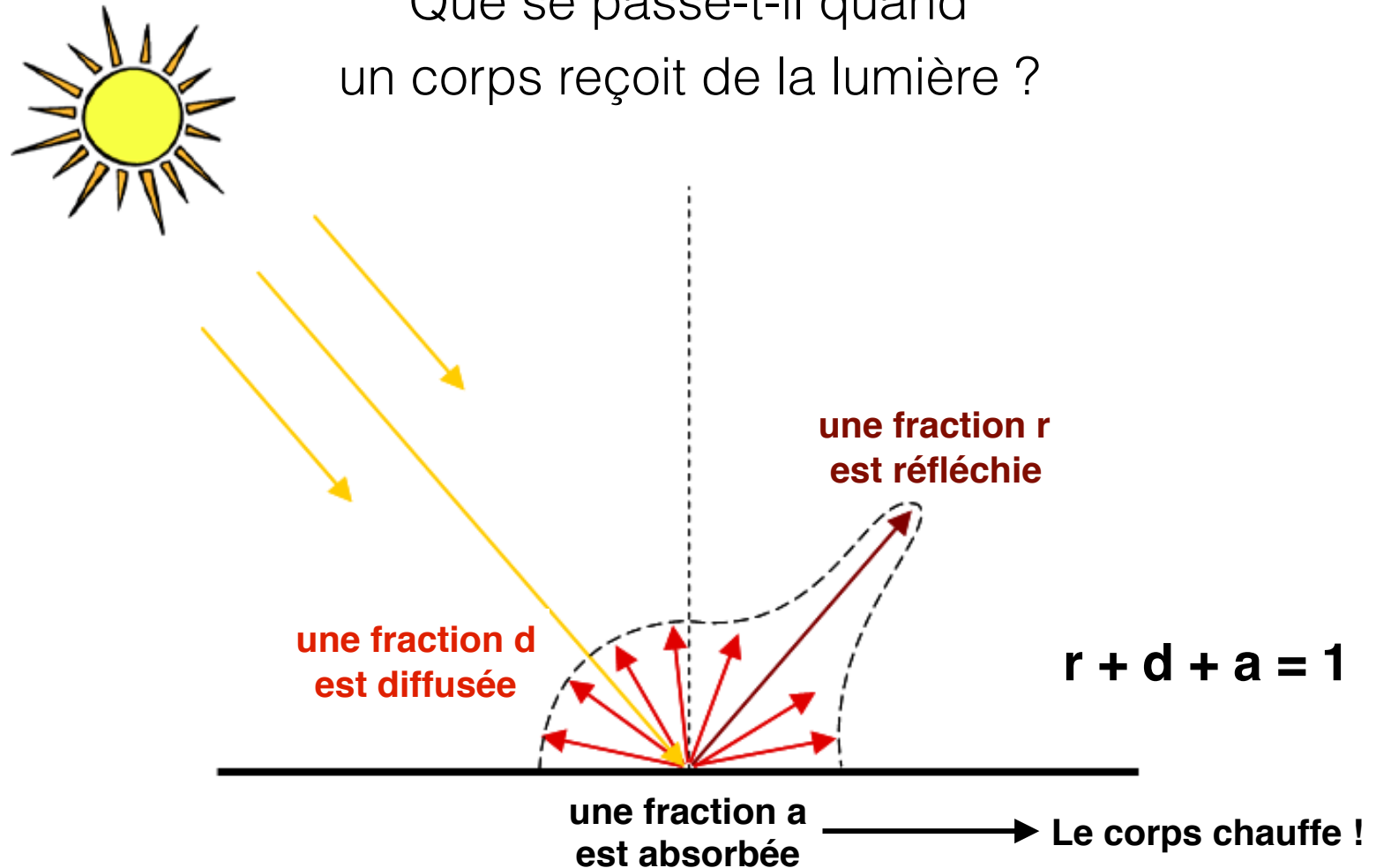


# Le spectre d'émission



# Lumière et matière

Que se passe-t-il quand un corps reçoit de la lumière ?



**Albédo** : fraction d'énergie lumineuse réfléchi/diffusée =  $r + d$  (neige  $\approx 1$ , suie  $\approx 0$ )



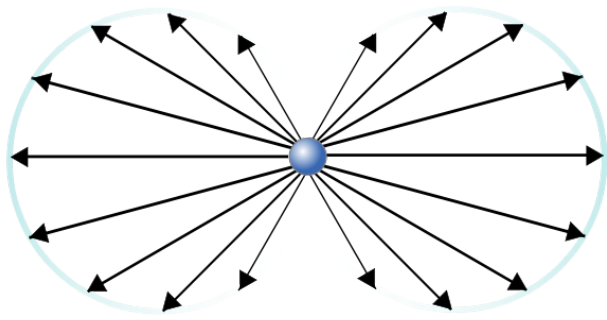
# 2. Diffusion

Diffusion de Rayleigh  
taille diffuseur  $\ll \lambda$

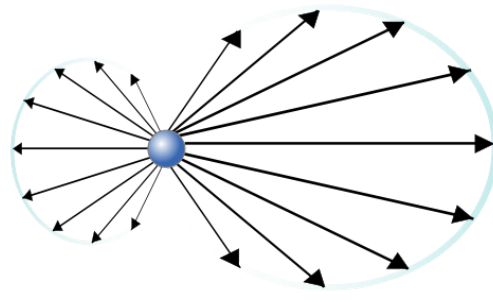
Diffusion de Mie  
taille diffuseur  $\gg \lambda$

$\lambda$  lumière visible : 400 - 750 nm  
taille d'une molécule  $\approx 2$  nm  
taille d'une gouttelette  $\approx 10 \mu\text{m}$

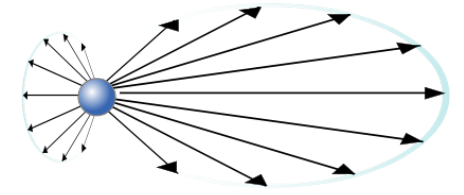
Diffusions atmosphériques.



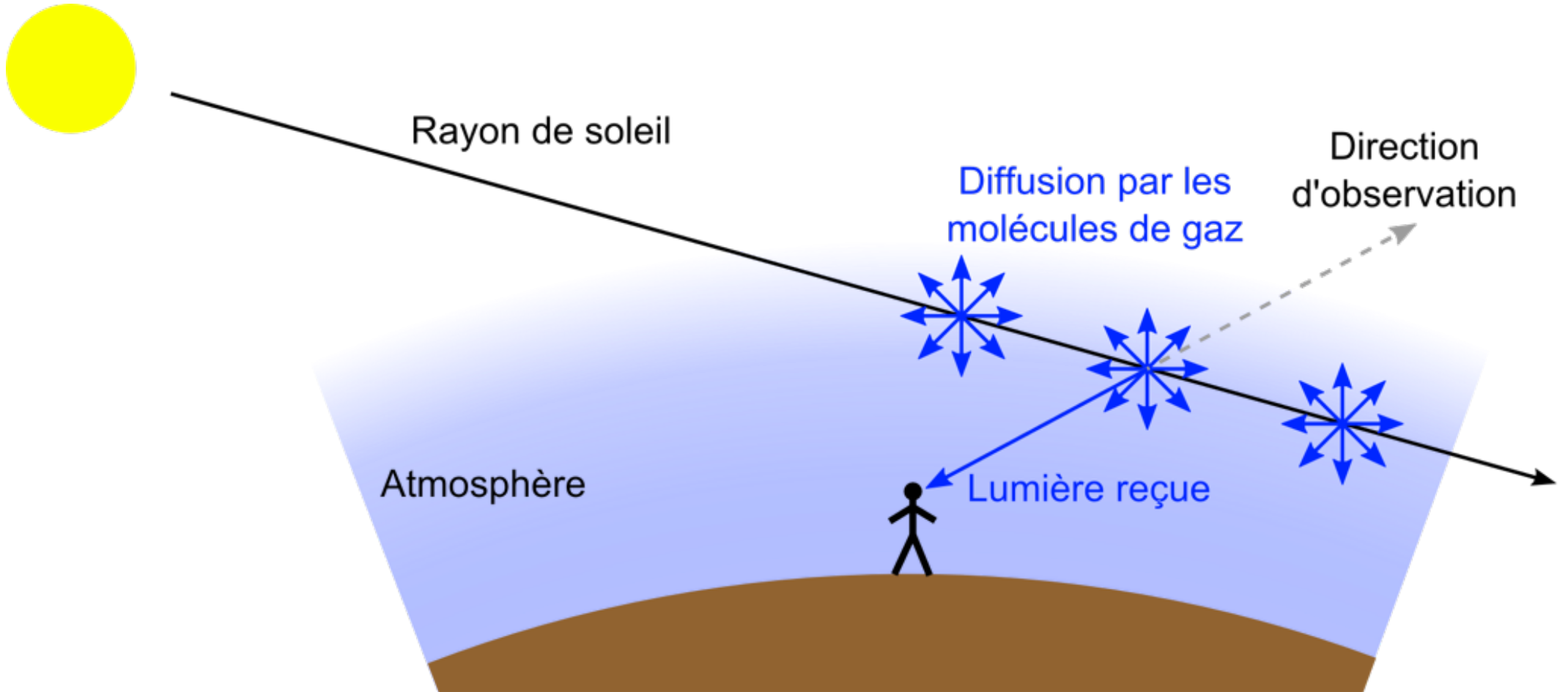
Diffusion de Rayleigh  
molécule



Diffusion de Mie  
petite particule



Diffusion de Mie  
grosse particule

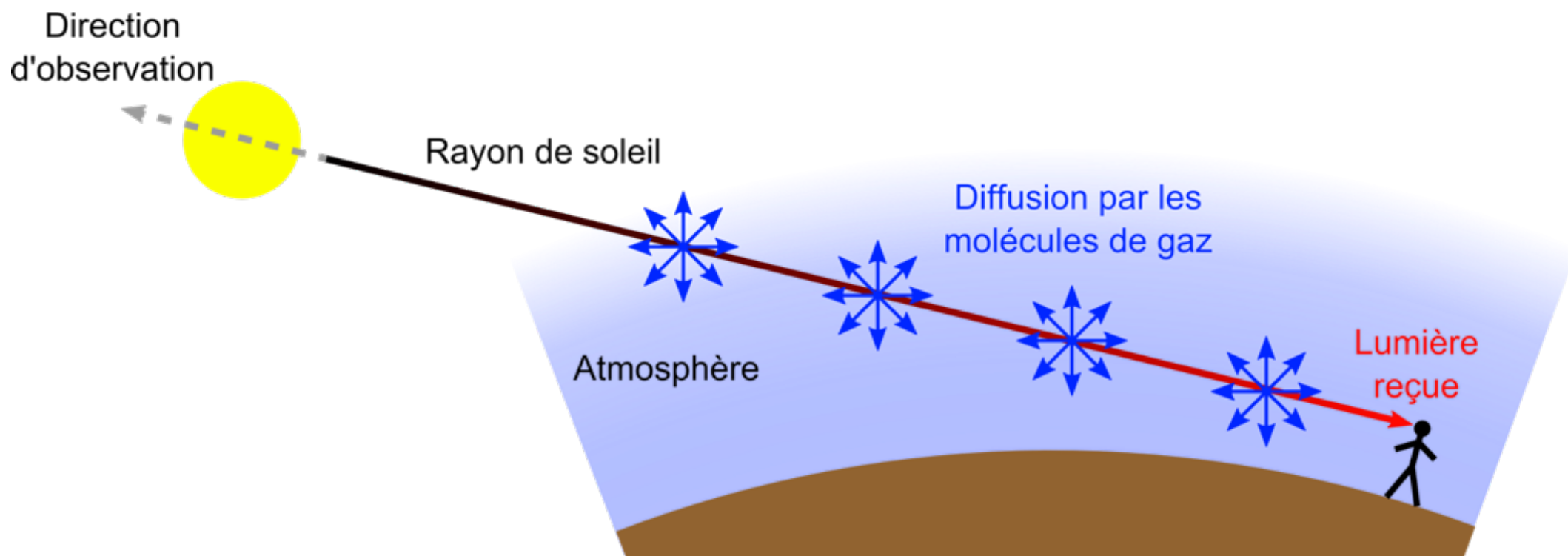


Pourquoi le ciel est-il bleu ?



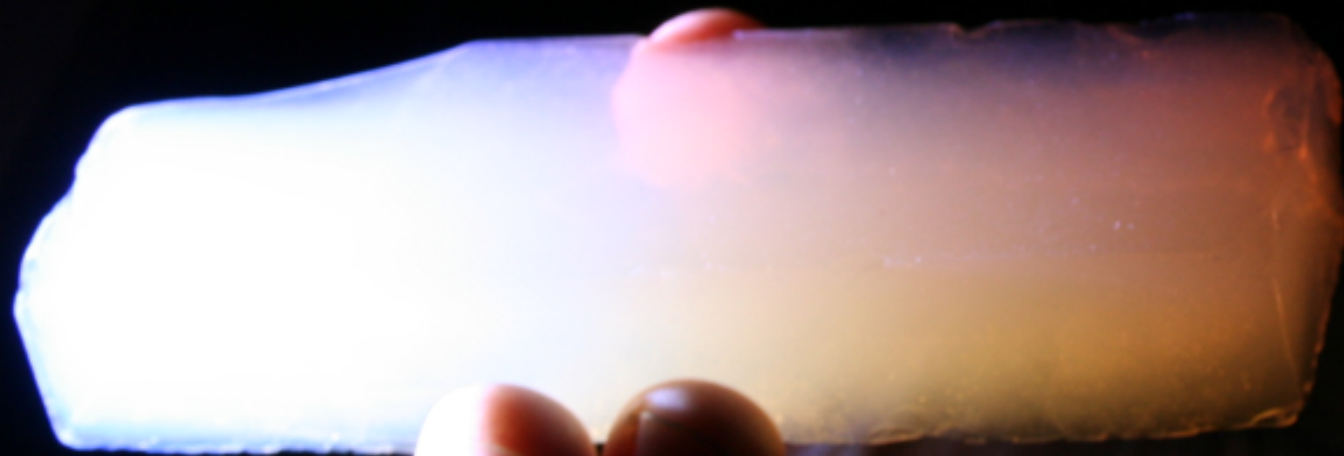


Soleil couchant.



Pourquoi le soleil couchant est-il rouge ?





Aérogel de silice éclairé en lumière blanche.



Lumière zodiacale (ESO, Chili) due aux poussières du milieu interplanétaire.



# 3. Absorption

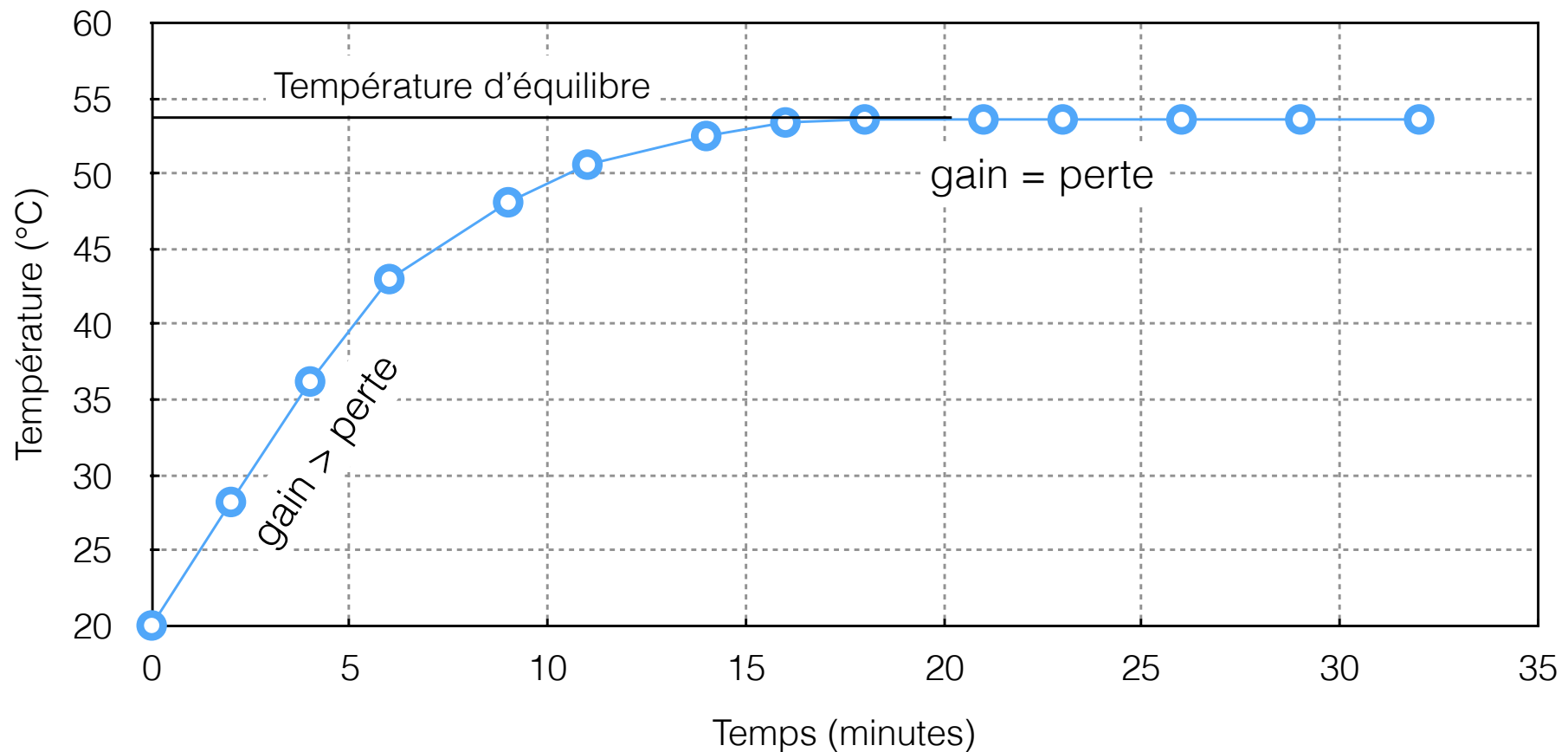


Loi de Kirchhoff (1859) : les bons absorbeurs sont de bons émetteurs !



# 4. Équilibre radiatif

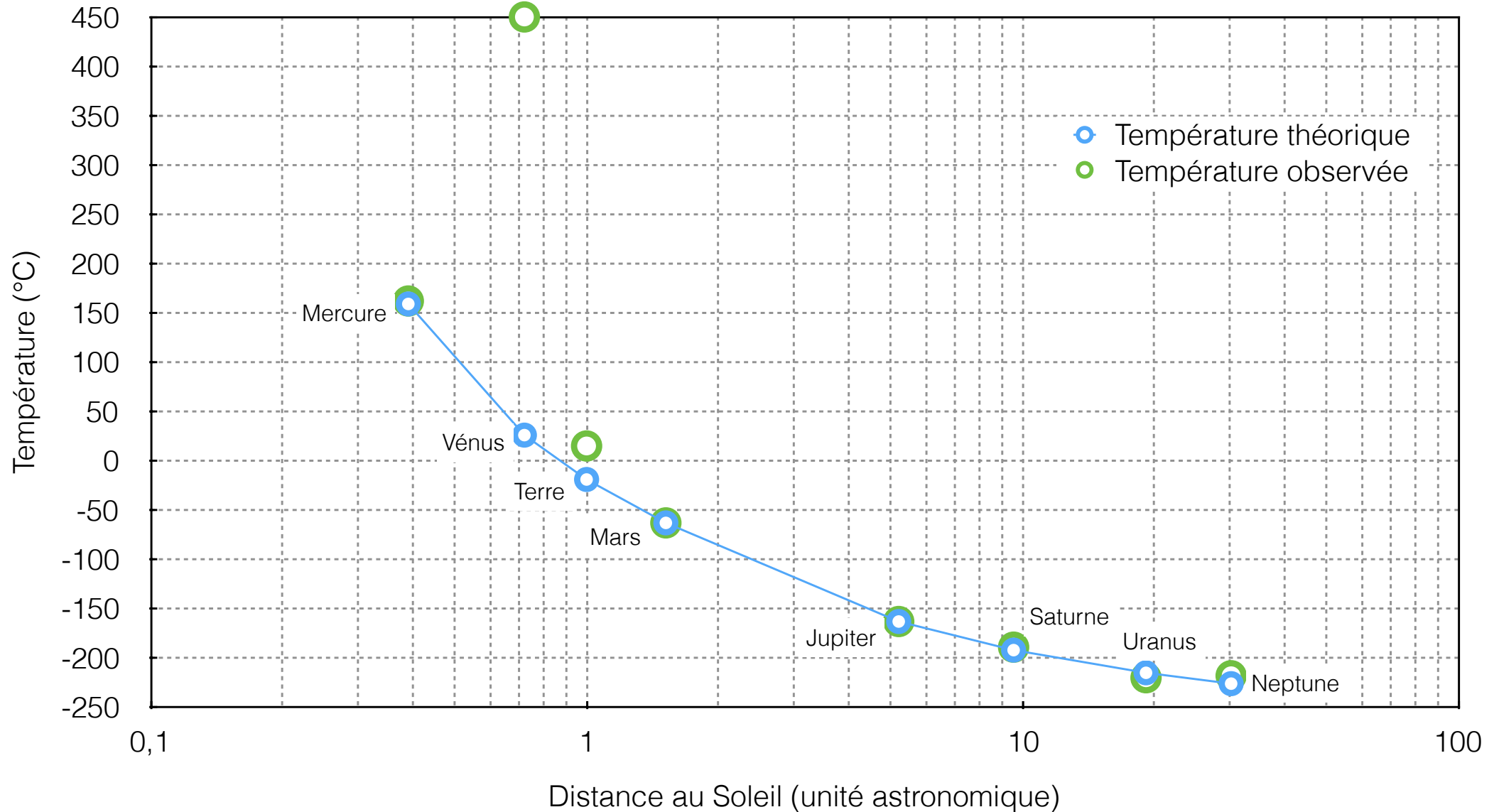
La température d'une plaque noire exposée au Soleil augmente avant de se stabiliser.



À l'équilibre la plaque rayonne autant d'énergie lumineuse qu'elle en reçoit.

Elle rayonne cette énergie sous forme de lumière infrarouge, invisible à nos yeux !

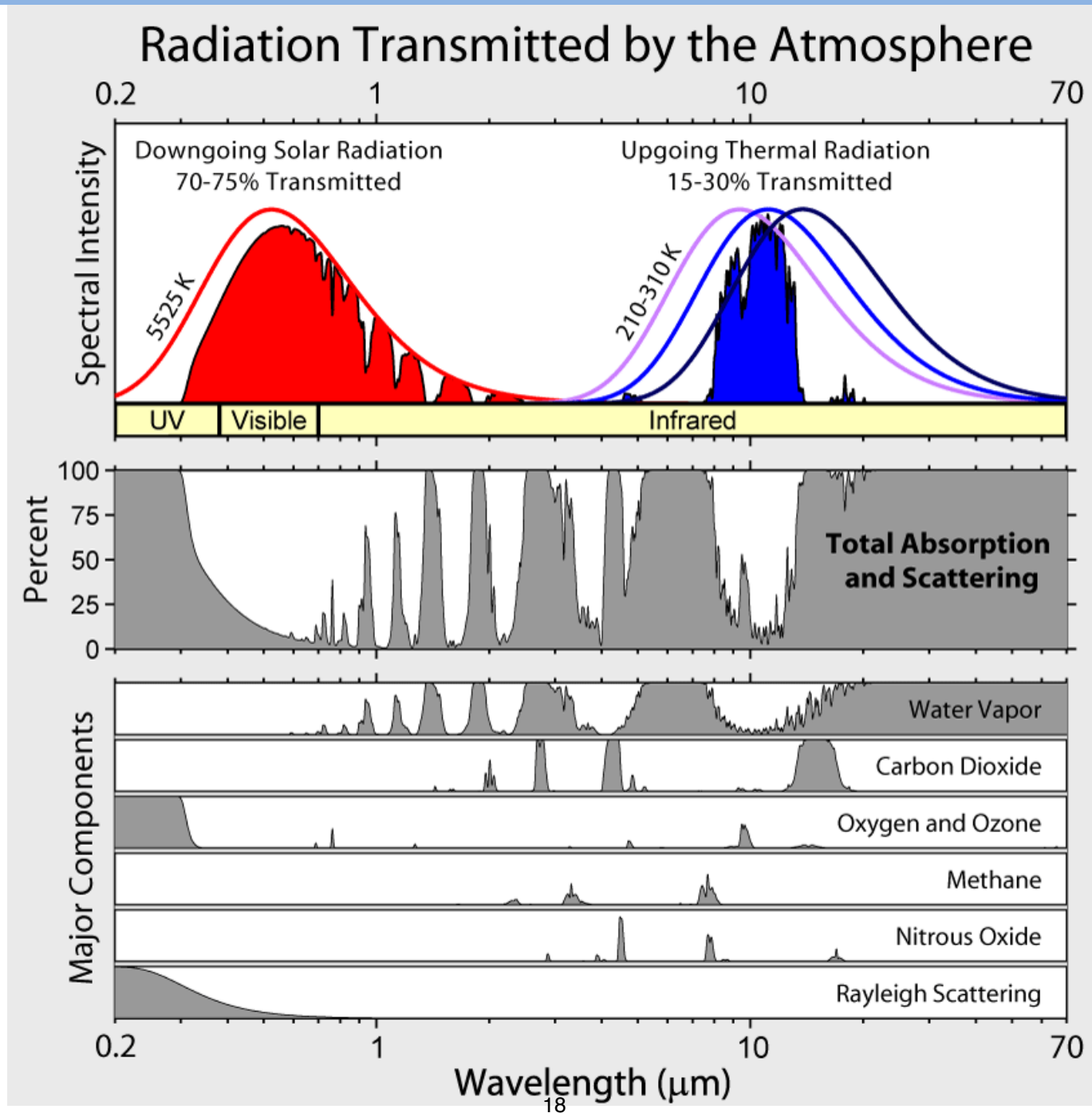
# Température d'équilibre des planètes



Quel est le point commun de la Terre et de Vénus ?

Elles ont une atmosphère !

# L'atmosphère est un filtre - 1





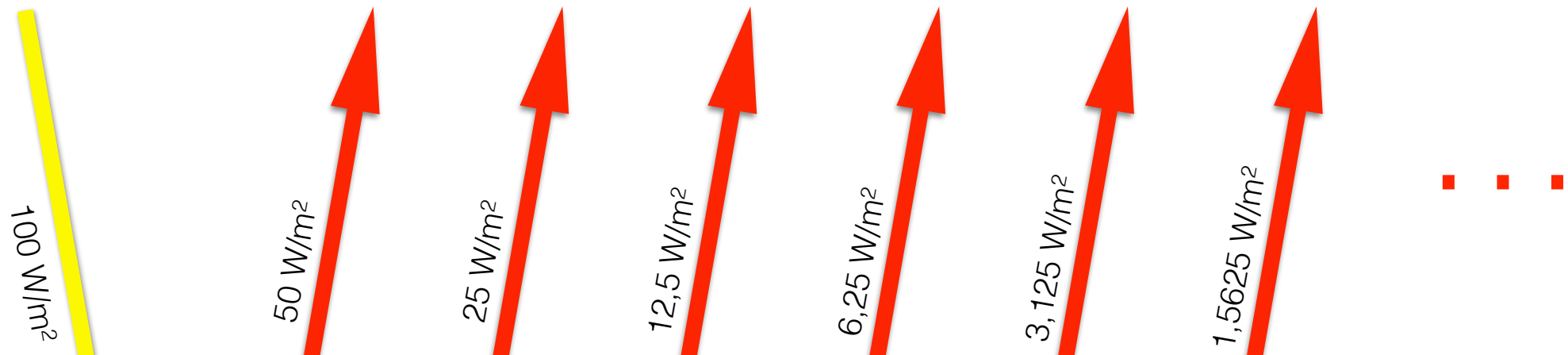
# L'atmosphère est un filtre - 2

Composition de l'atmosphère sèche en ppm (parties par million)

Gaz		ppm	%	Lumière visible	Lumière infrarouge
Diazote	N <sub>2</sub>	780840	78,08 %	Transparent	Transparent
Dioxygène	O <sub>2</sub>	209460	20,95 %	Transparent	Transparent
Argon	Ar	9340	0,93 %	Transparent	Transparent
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	400	0,04 %	Transparent	<b>Opaque</b>
Néon	Ne	18,2		Transparent	Transparent
Hélium	He	5,2		Transparent	Transparent
Méthane	CH <sub>4</sub>	1,7		Transparent	<b>Opaque</b>
Krypton	Kr	1,1		Transparent	Transparent

La vapeur d'eau est transparente à la lumière visible, mais opaque à la lumière infrarouge.

# Effet de serre - 1

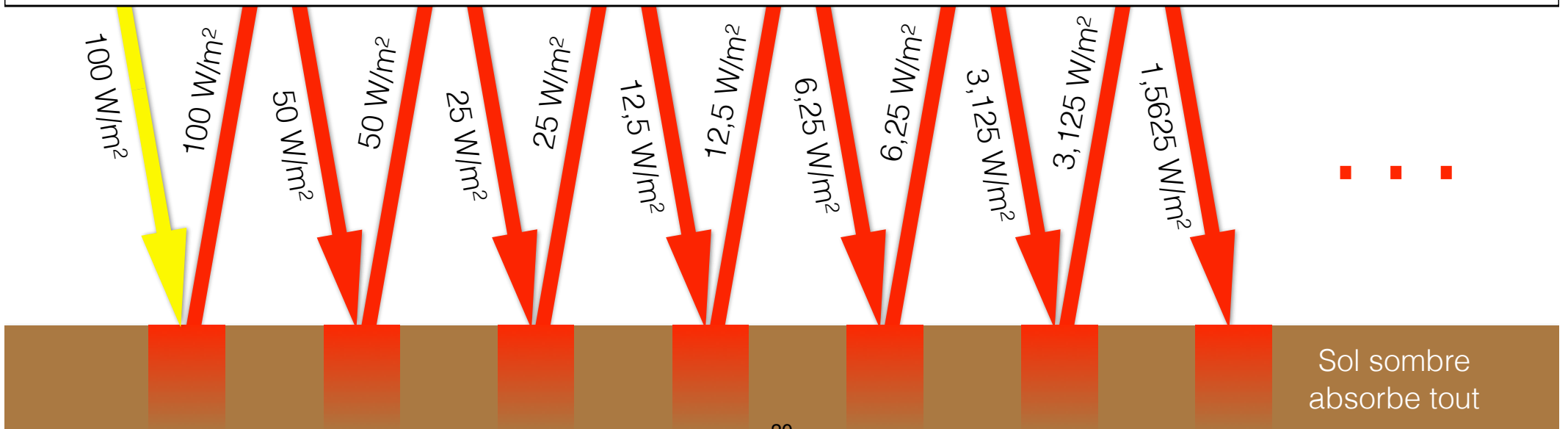


Quelle puissance s'échappe vers l'espace ?

$$50 + 25 + 12,5 + 6,25 + 3,125 + 1,5625 + \dots = 50 \times (1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + 1/32 + \dots) = 100 \text{ W/m}^2$$

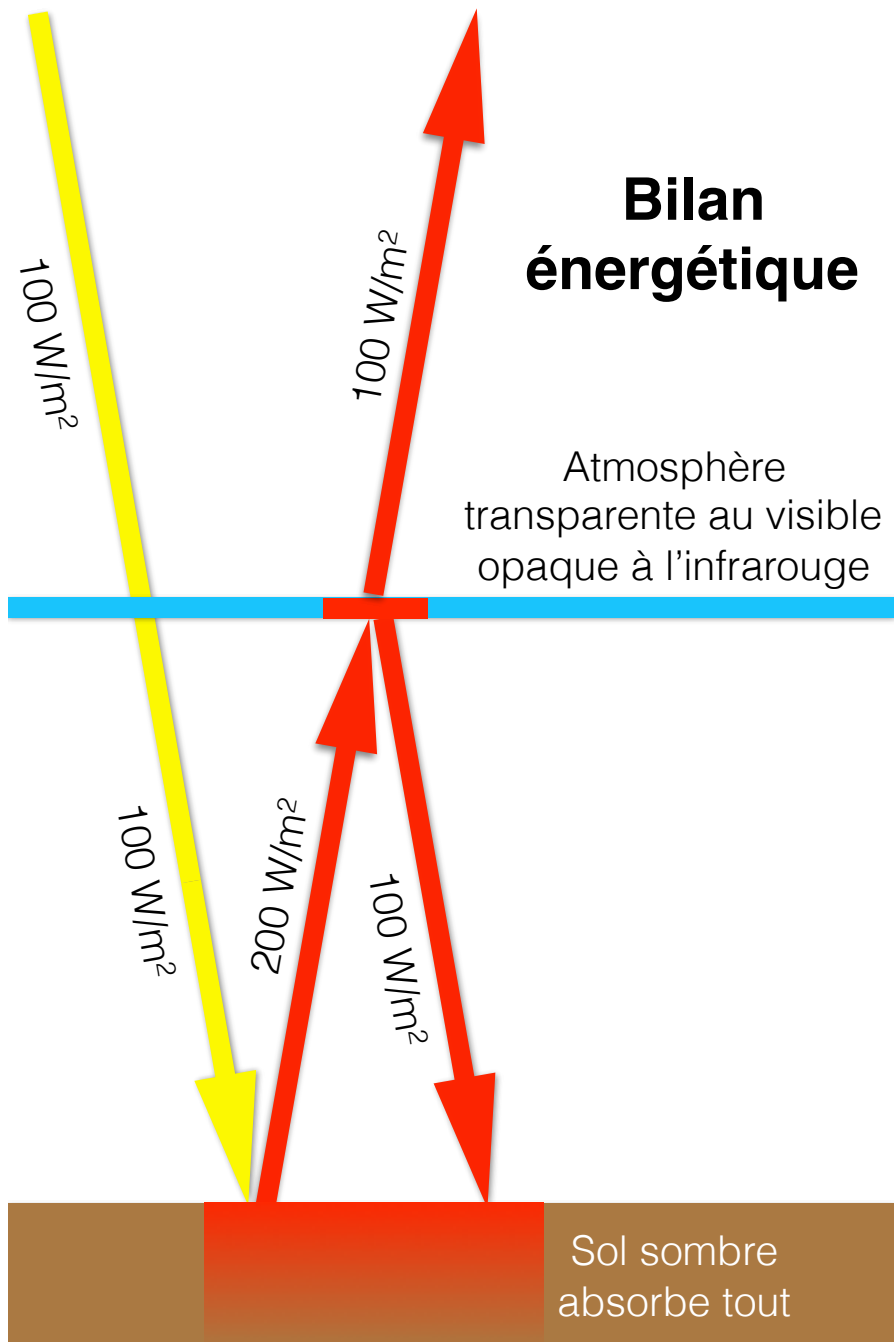
Quelle puissance reçoit le sol ?

$$100 + 50 + 25 + 12,5 + 6,25 + 3,125 + \dots = 100 \times (1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + 1/32 + \dots) = 200 \text{ W/m}^2$$





# Effet de serre - 2



Sans effet serre le sol reçoit et renvoie 100 W/m<sup>2</sup>.

Avec effet de serre le sol reçoit et renvoie 200 W/m<sup>2</sup>.

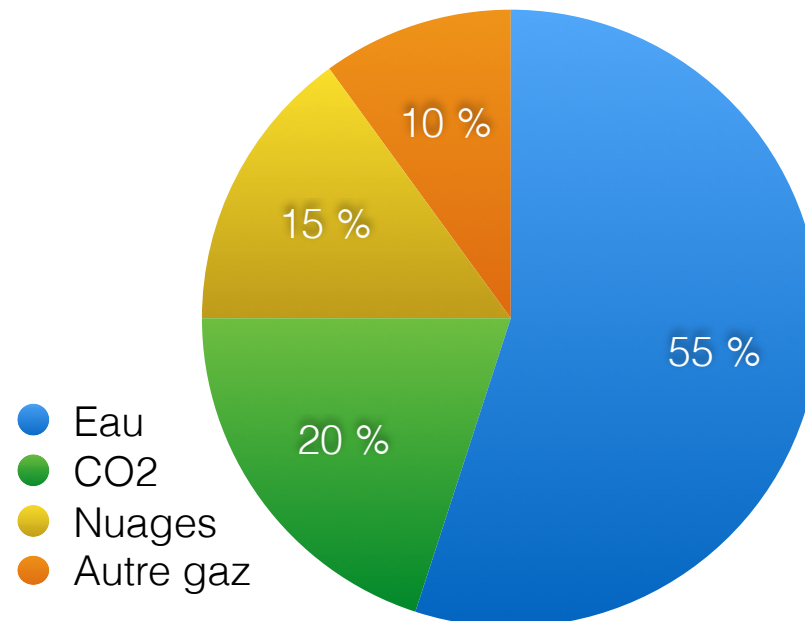
Le sol est donc plus chaud !

Hors atmosphère, la Terre reçoit 340,4 W/m<sup>2</sup> du Soleil.

Sans effet de serre, température moyenne = -18°C.

Avec effet de serre, température moyenne = +15°C.

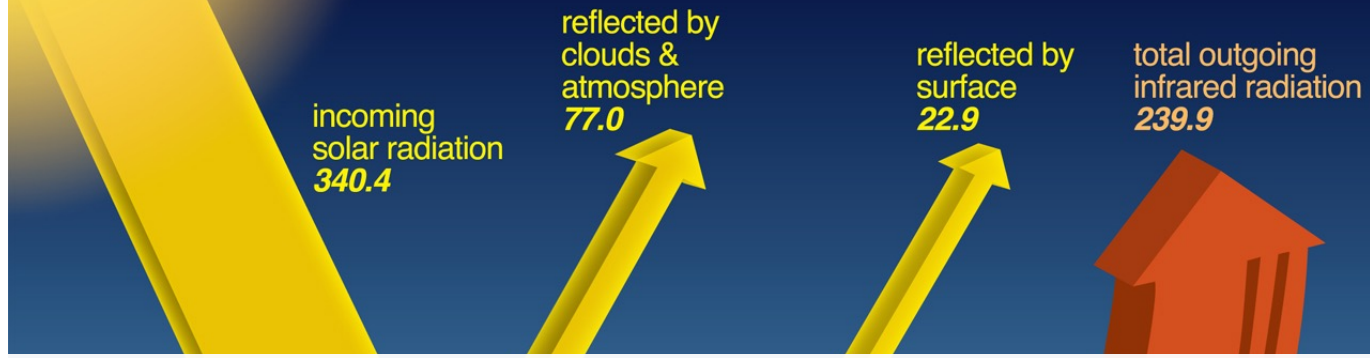
Origine de l'effet de serre naturel





# earth's energy *budget*

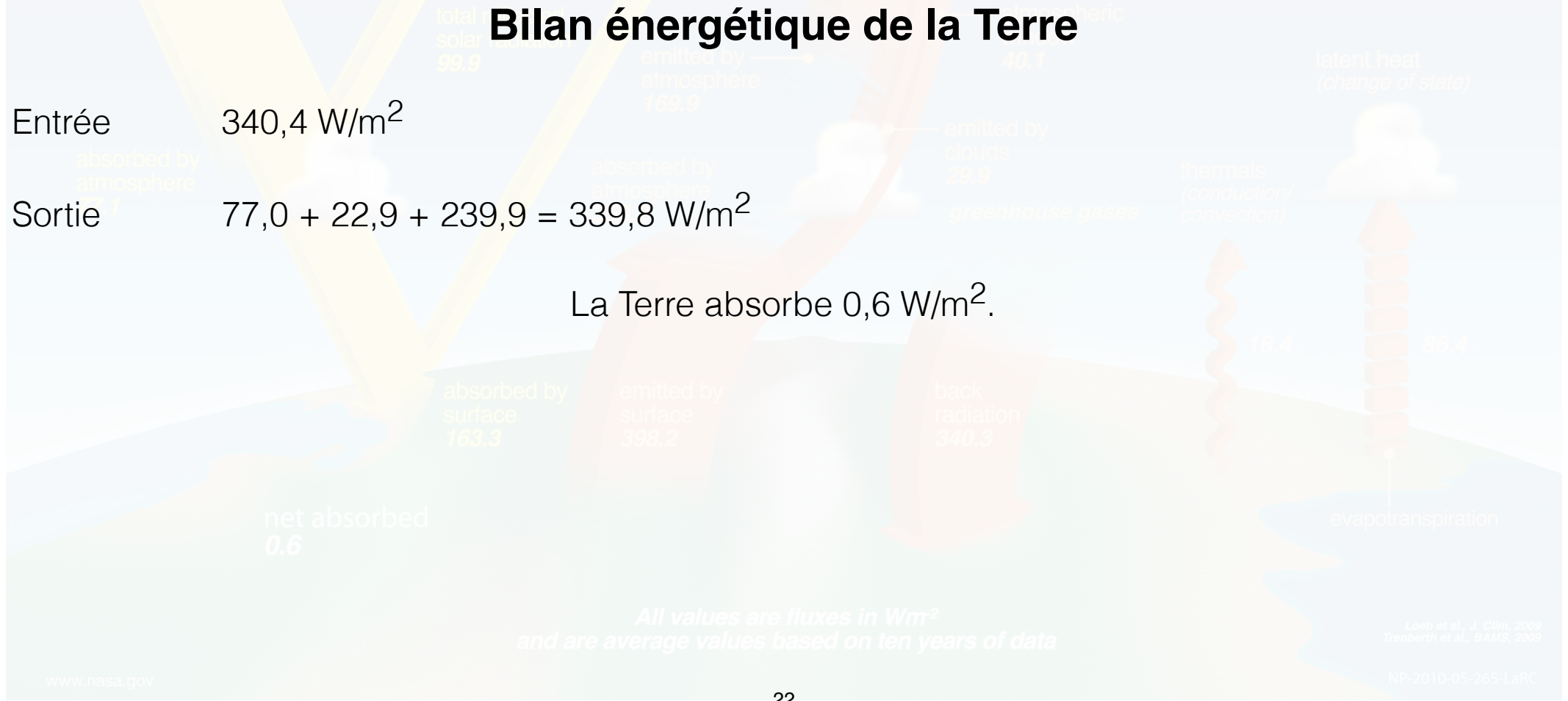
The Earth's energy budget describes the various kinds and amounts of energy that enter and leave the Earth system. It includes both radiative components (**light** and **heat**), that can be measured by CERES, and other components like conduction, convection, and evaporation which also transport heat from Earth's surface. On average, and over the long term, there is a balance at the top of the atmosphere. The amount of energy coming in (**from the sun**) is the same as the amount going out (**from reflection of sunlight** and from **emission of infrared radiation**).



## Bilan énergétique de la Terre

Entrée 340,4 W/m<sup>2</sup>  
 Sortie 77,0 + 22,9 + 239,9 = 339,8 W/m<sup>2</sup>

La Terre absorbe 0,6 W/m<sup>2</sup>.



All values are fluxes in Wm<sup>-2</sup>  
 and are average values based on ten years of data

Loeb et al., J. Clim. 2009  
 Trenberth et al., BAMS, 2009



# earth's energy *budget*

## Bilan énergétique de la surface

The Earth's energy budget describes the various kinds and amounts of energy that enter and leave the Earth system. It includes radiative components (light and heat), that can be measured by CERES, and other components like conduction, convection, and evaporation which also transport heat from Earth's surface. On average, and over the long term, there is a balance at the top of the atmosphere. The amount of energy coming in (from the sun) is the same as the amount going out (from reflection of sunlight and from emission of infrared radiation).

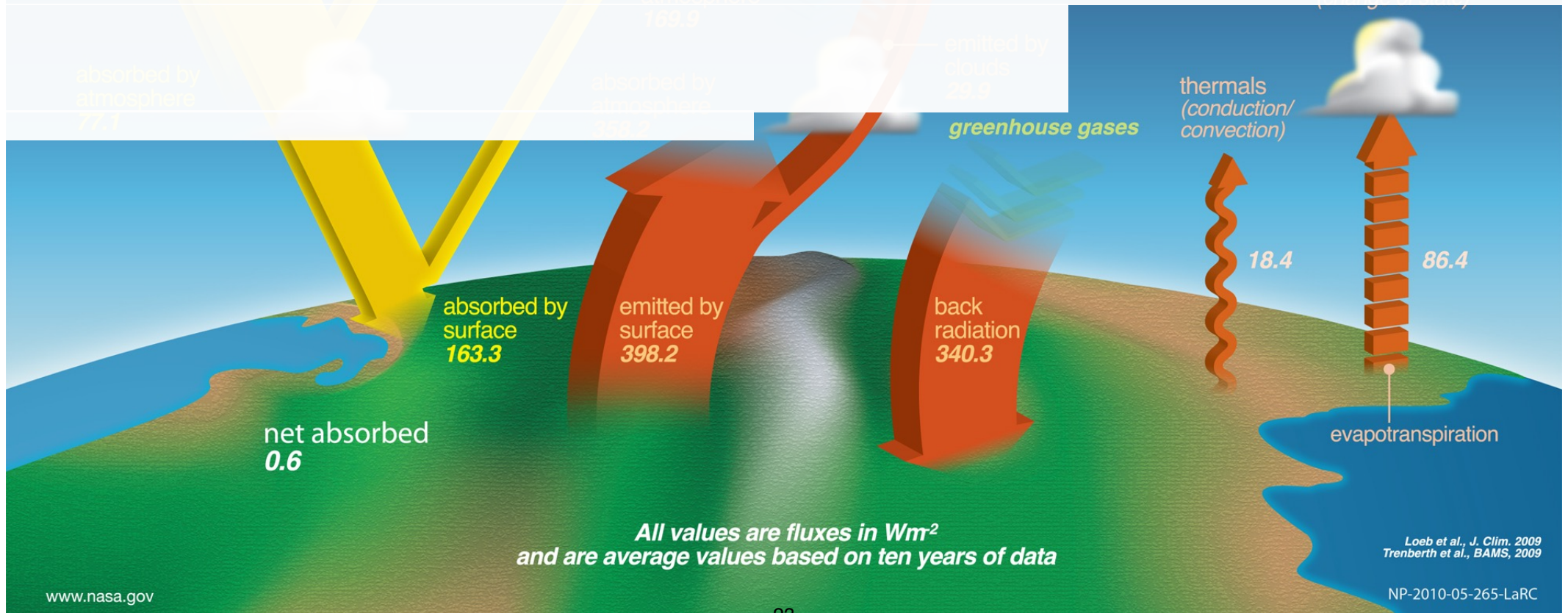
Entrée

$$163,3 + 340,3 = 503,6 \text{ W/m}^2$$

Sortie

$$398,2 + 18,4 + 86,4 = 503,0 \text{ W/m}^2$$

La surface absorbe 0,6 W/m<sup>2</sup>.





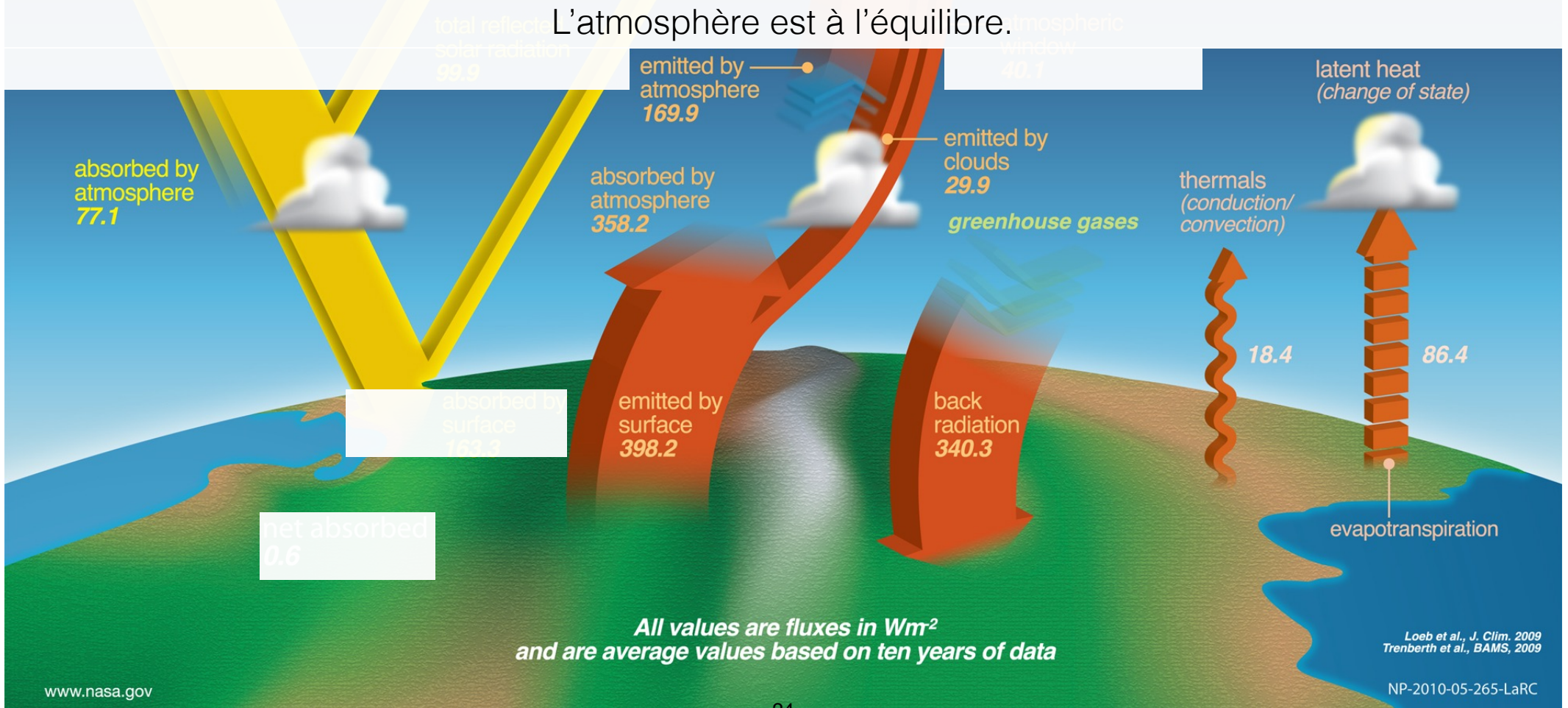
# earth's energy *budget*

## Bilan énergétique de l'atmosphère

Entrée  $77,1 + 358,2 + 18,4 + 86,4 = 540,1 \text{ W/m}^2$

Sortie  $169,9 + 29,9 + 340,3 = 540,1 \text{ W/m}^2$

The Earth's energy budget describes the various kinds and amounts of energy that enter and leave the Earth system. It includes radiative components (light and heat), that can be measured by CERES, and other components like conduction, convection, and evaporation which also transport heat from Earth's surface. On average, and over the long term, there is a balance at the top of the atmosphere. The amount of energy coming in (from the sun) is the same as the amount going out (from reflection of sunlight and from emission of infrared radiation).

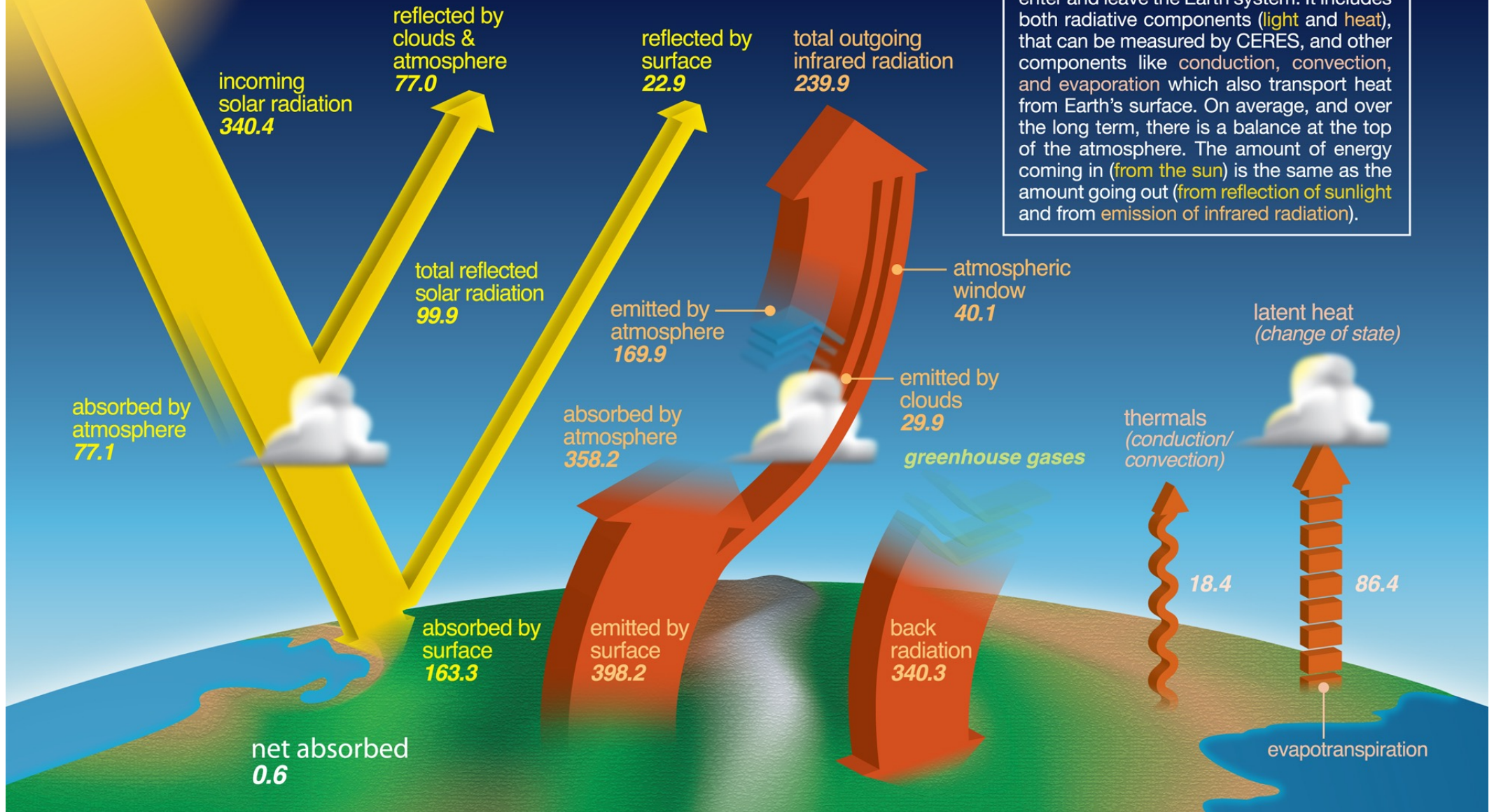






# earth's energy *budget*

The Earth's energy budget describes the various kinds and amounts of energy that enter and leave the Earth system. It includes both radiative components (light and heat), that can be measured by CERES, and other components like conduction, convection, and evaporation which also transport heat from Earth's surface. On average, and over the long term, there is a balance at the top of the atmosphere. The amount of energy coming in (from the sun) is the same as the amount going out (from reflection of sunlight and from emission of infrared radiation).

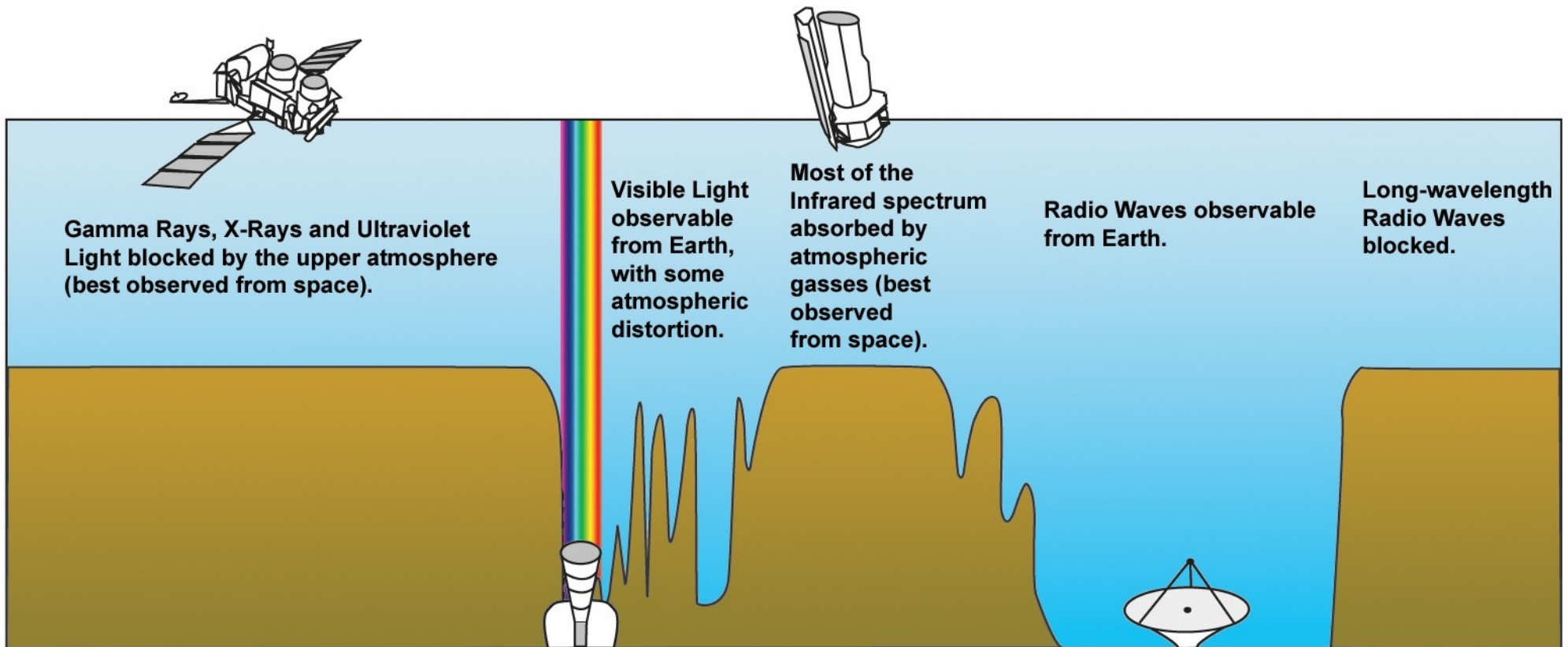
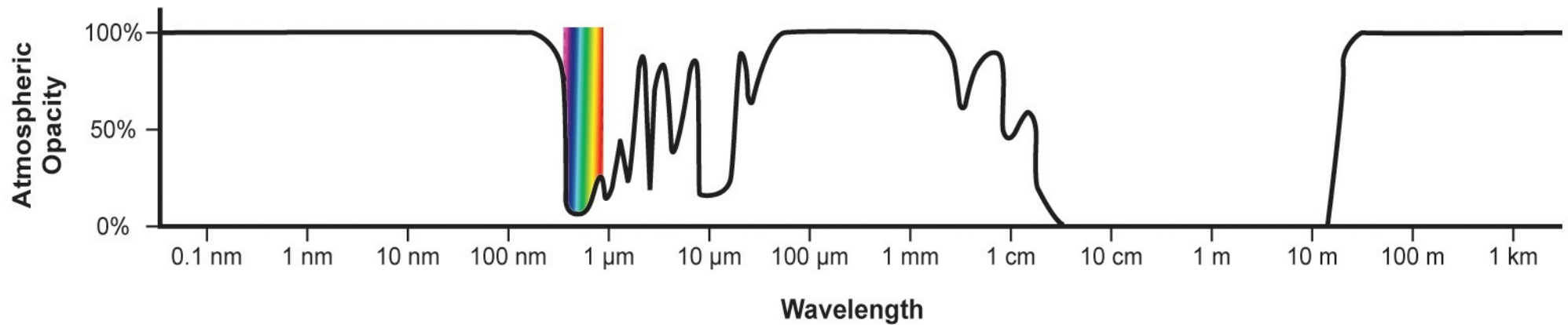


All values are fluxes in Wm<sup>2</sup>  
and are average values based on ten years of data

Loeb et al., J. Clim. 2009  
Trenberth et al., BAMS, 2009



# Absorption atmosphérique



# 5. Epaisseur optique

Comment quantifier l'atténuation de la lumière traversant une couche de matière ?

$$dI_\lambda = -\alpha_\lambda I_\lambda ds = -\rho \kappa_\lambda I_\lambda ds$$

Flux lumineux [ $\text{W m}^{-2}$ ]

Coefficient d'absorption [ $\text{m}^{-1}$ ]

Opacité [ $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ]

Deux processus physiques contribuent à l'opacité :

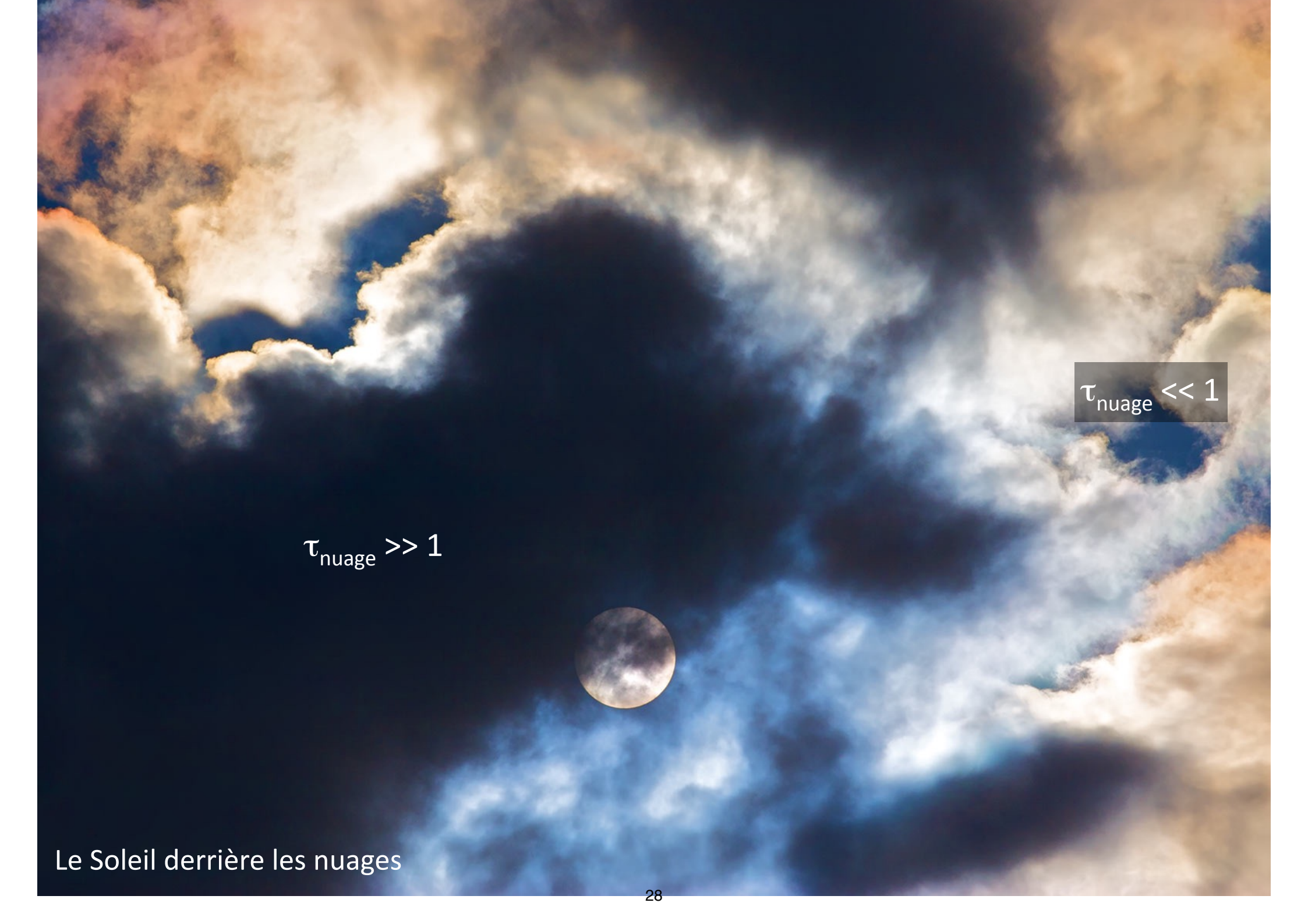
- l'absorption, le photon « disparaît » et son énergie est thermalisée ;
- la diffusion, la direction du photon change, il sort de l'angle solide considéré.

$$I_\lambda = I_\lambda(0) \exp(-\tau_\lambda) \quad \text{avec} \quad \tau_\lambda = \int_c \alpha_\lambda ds$$

$\tau_\lambda \ll 1$  Transparent (optiquement fin)

$\tau_\lambda \gg 1$  Opaque (optiquement épais)

Epaisseur optique [-]  
 $\approx$  nombre d'interactions



$\tau_{\text{nuage}} \gg 1$

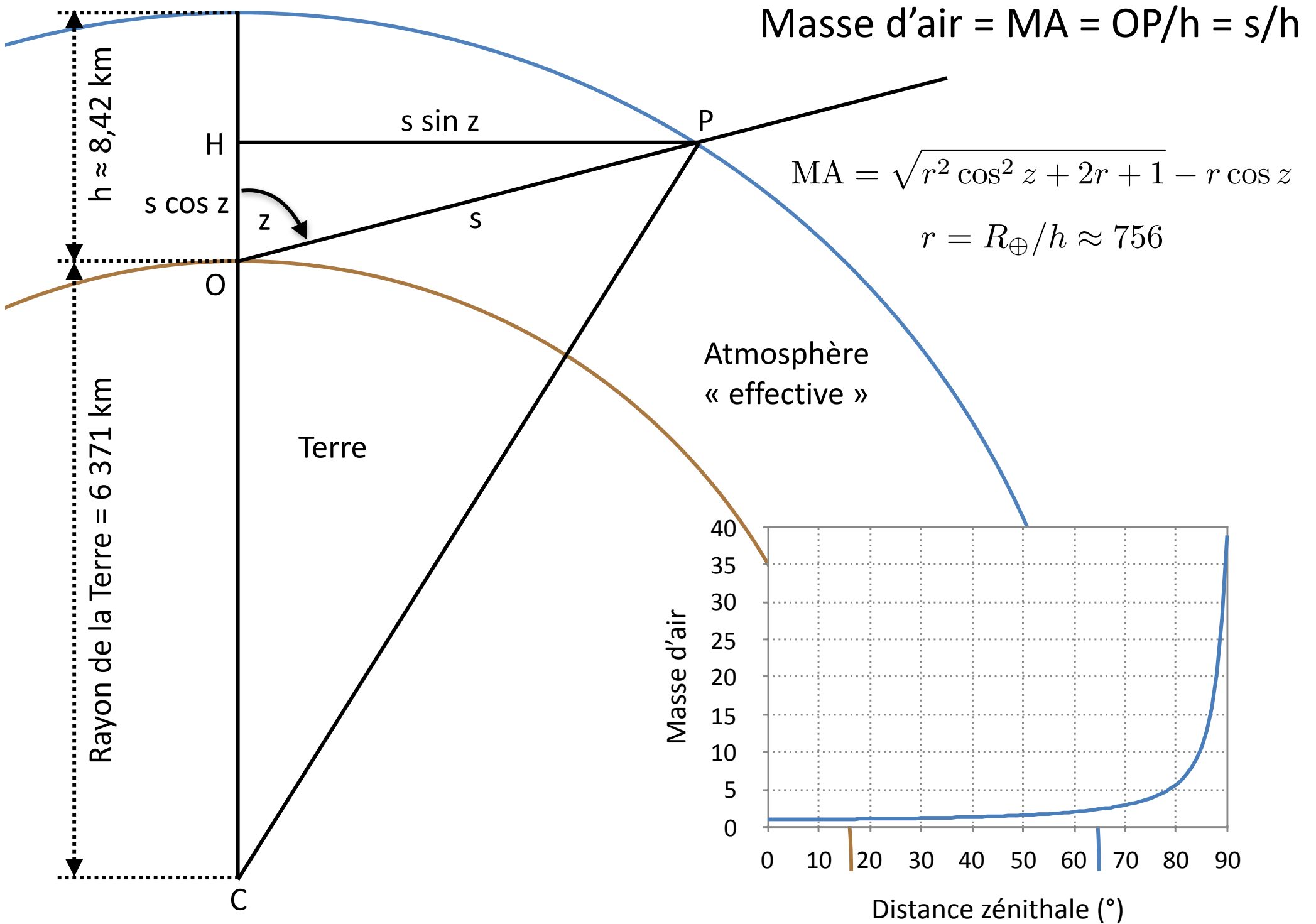
$\tau_{\text{nuage}} \ll 1$

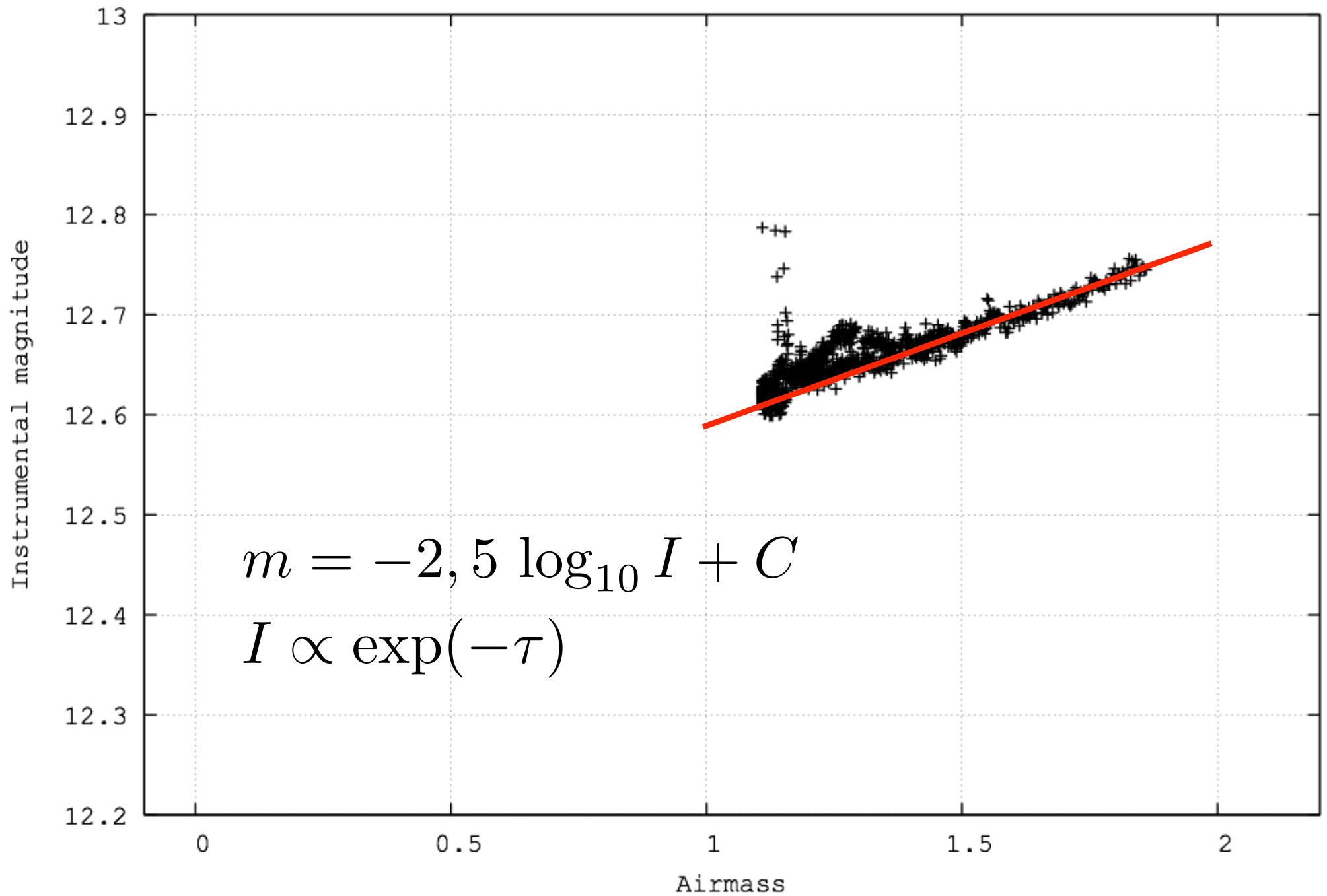
Le Soleil derrière les nuages





Coucher de Soleil, masse d'air  $\approx 39$

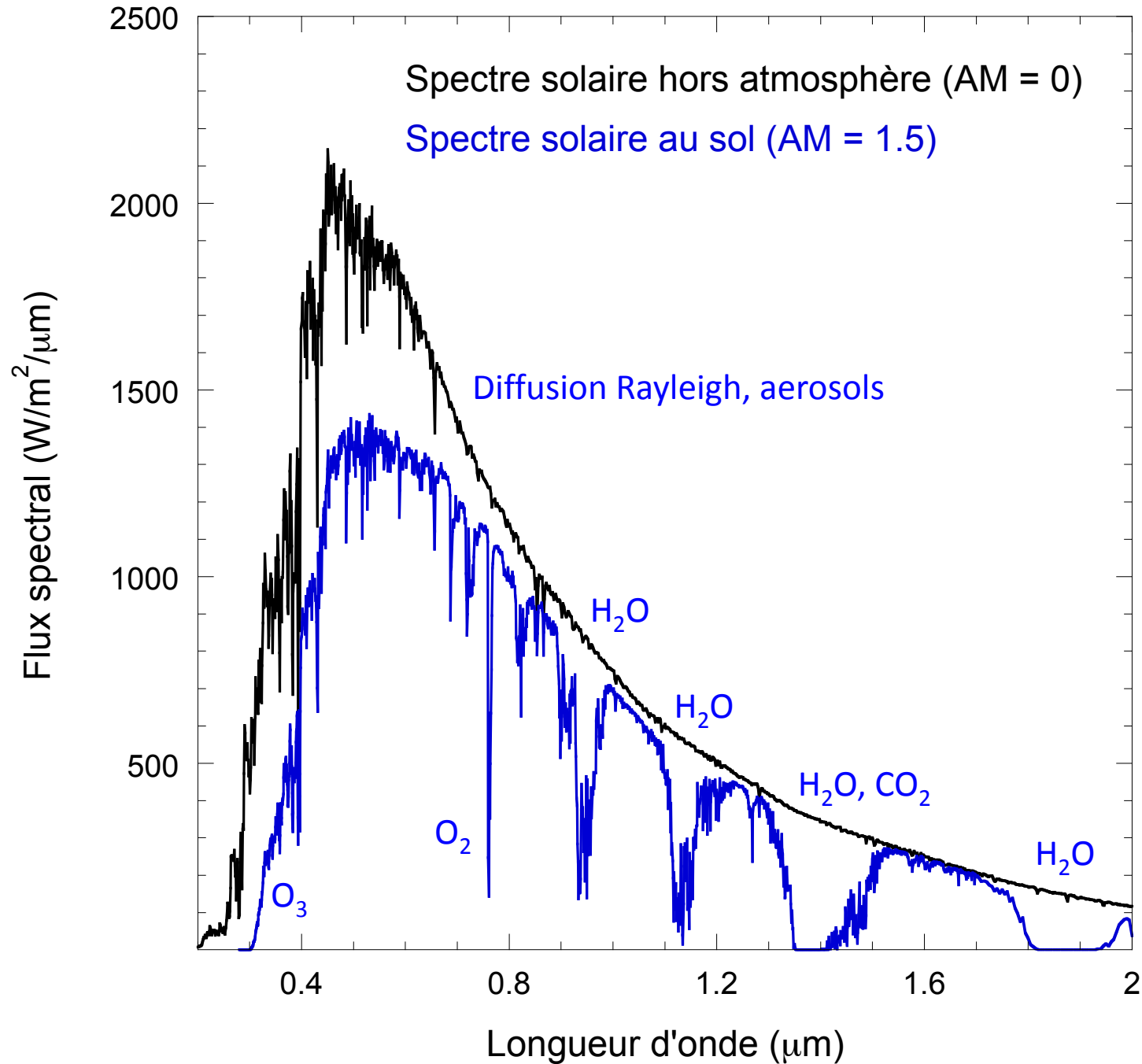




Effet de l'extinction atmosphérique.



# Le spectre solaire



# Equation de transfert du rayonnement

$$dI_\lambda = -\alpha_\lambda I_\lambda ds + \varepsilon_\lambda ds$$

↑  
Coefficient d'émission [W m<sup>-3</sup>]

$$\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = -I_\lambda + S_\lambda$$

Fonction source  
universelle !

$$S_\lambda = \frac{\varepsilon_\lambda}{\alpha_\lambda}$$

Solution générale 1D

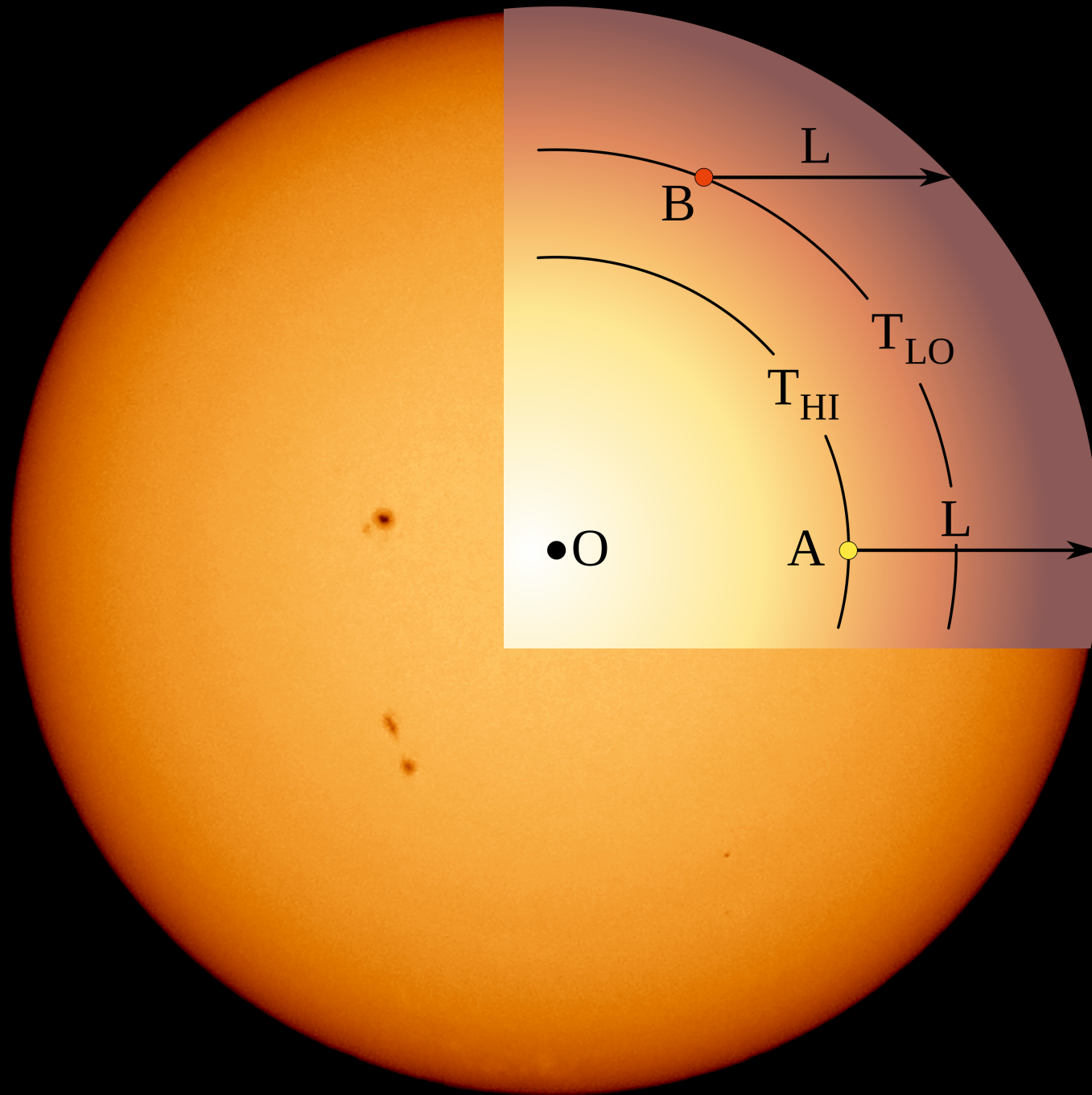
$$I_\lambda = \boxed{I_\lambda(0)} \exp(-\tau_\lambda) + \boxed{\int_0^{\tau_\lambda} S_\lambda(\tau') e^{-(\tau_\lambda - \tau')} d\tau'}$$

↓  
Source extérieure

↓  
Emission et auto-absorption  
des sources internes

Cas particulier : émission uniforme

$$I_\lambda = I_\lambda(0) \exp(-\tau_\lambda) + S_\lambda (1 - \exp(-\tau_\lambda))$$



Assombrissement centre-bord du disque solaire (passage de Vénus, juin 2012).

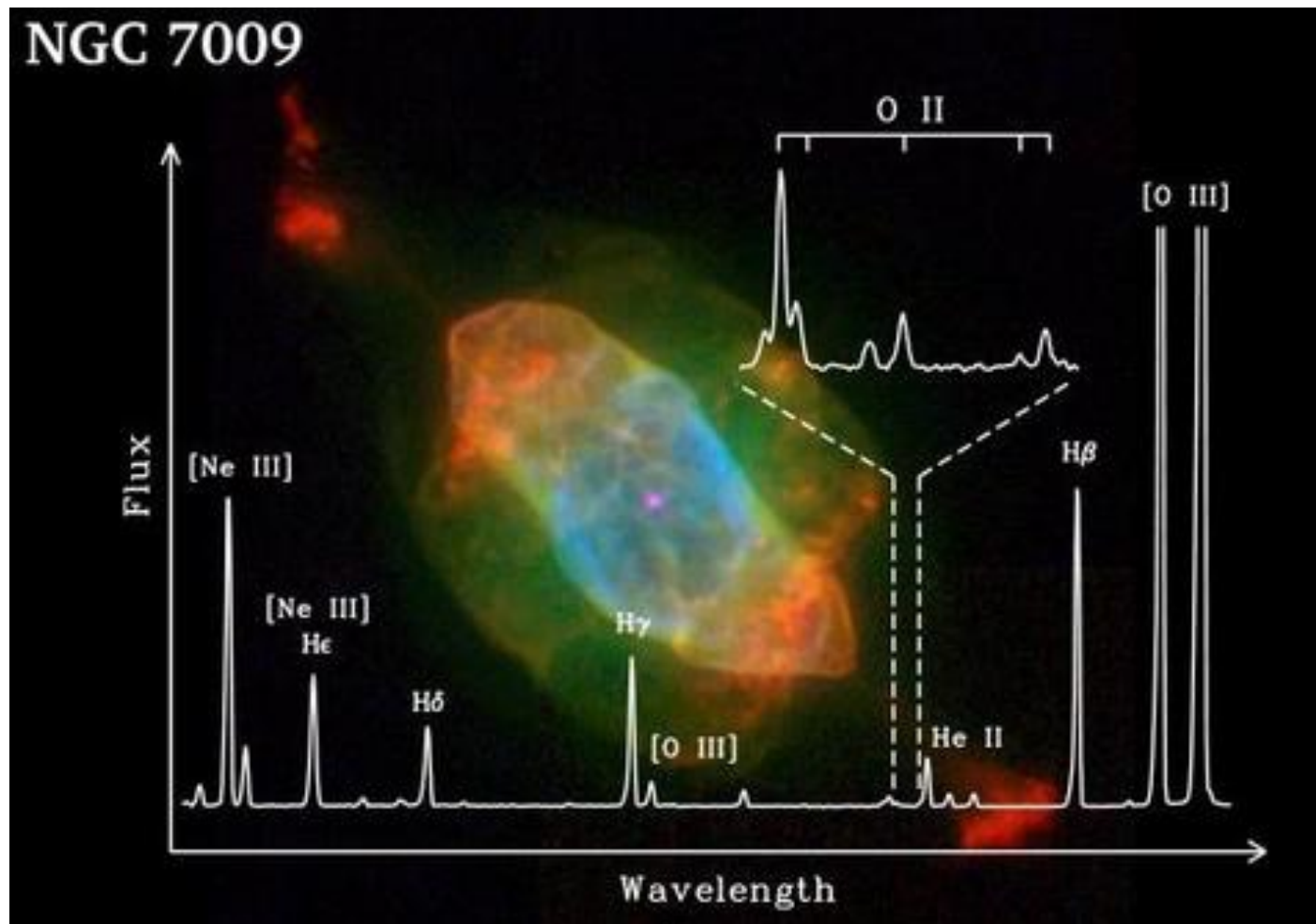


# Emission propre

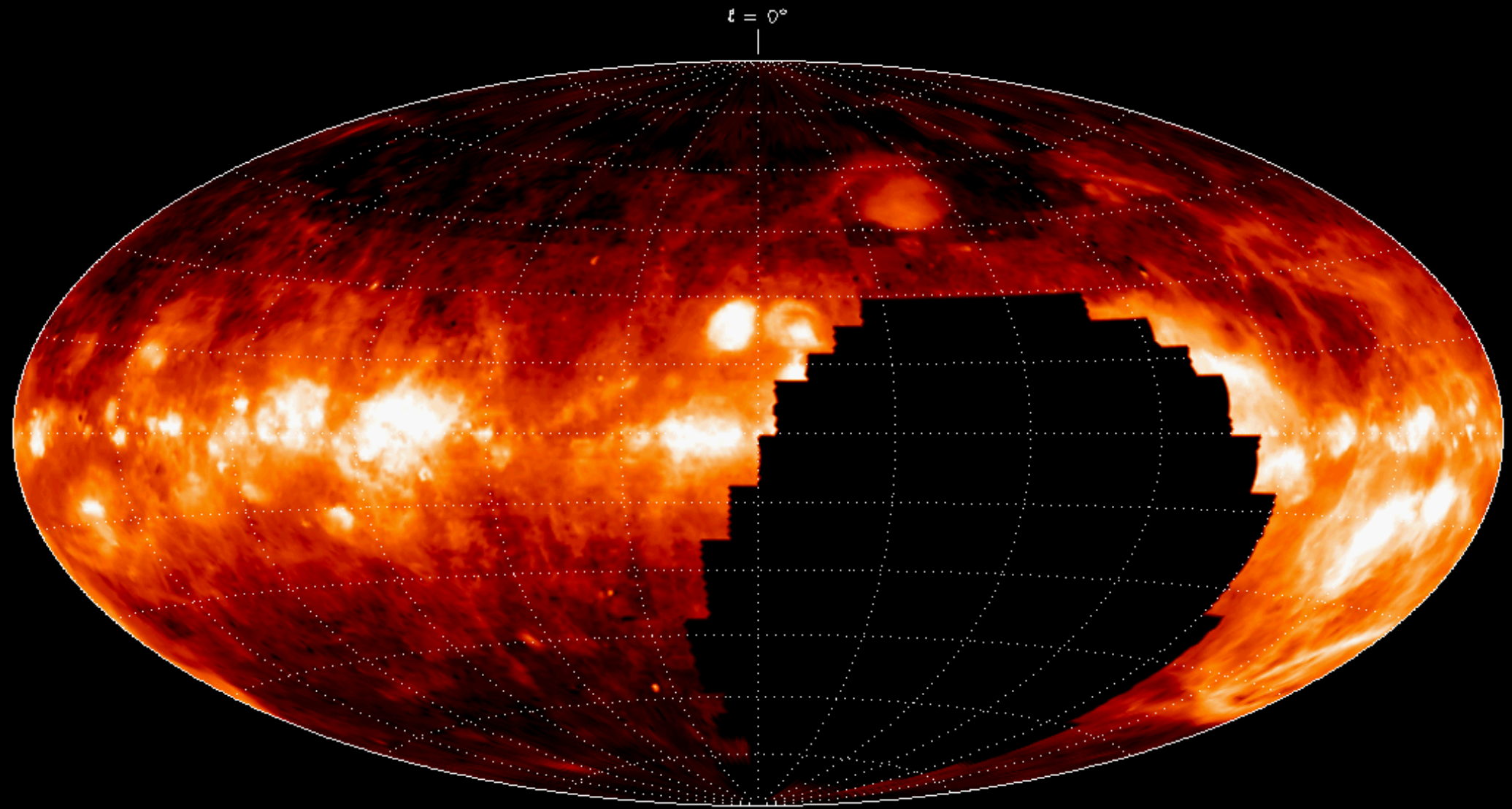
Pas de source extérieure, seul le gaz émet de la lumière.

$$I_{\lambda} = S_{\lambda} (1 - \exp(-\tau_{\lambda}))$$

1. Cas optiquement mince  $\tau_{\lambda} \ll 1$   $I_{\lambda} \simeq S_{\lambda} \tau_{\lambda}$



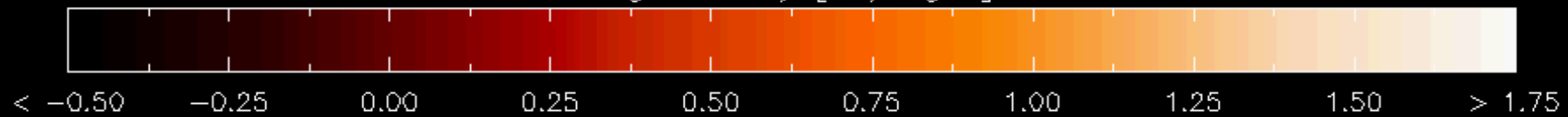
Cartographie du milieu interstellaire chaud grâce à l'émission en H $\alpha$ .



$\Delta l = 30^\circ$   
 $\Delta b = 15^\circ$

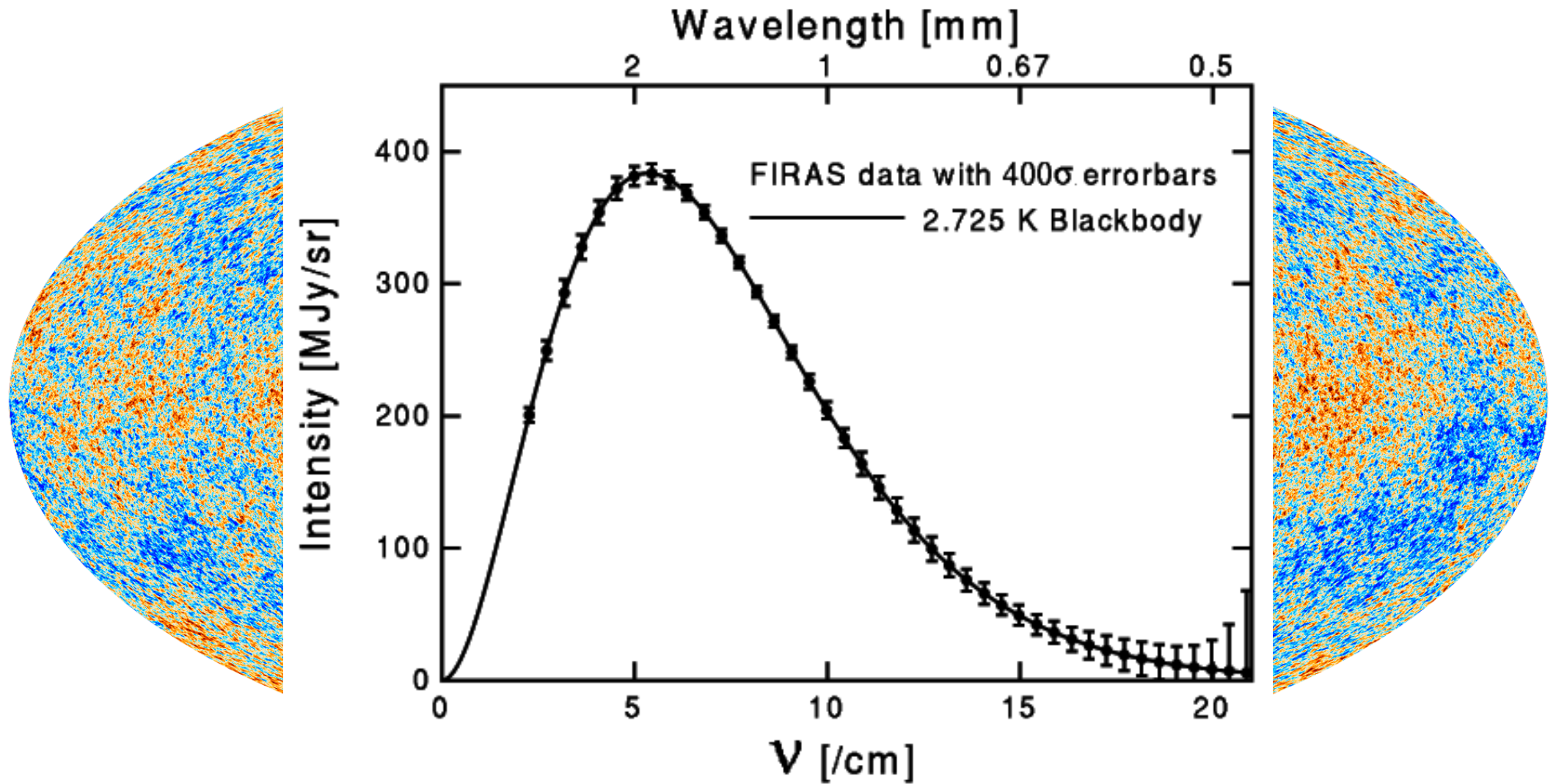
Log Intensity [Rayleighs]

<http://www.astr.wisc.edu/wham/>



## 2. Cas optiquement épais $\tau_\lambda \gg 1$ $I_\lambda \simeq S_\lambda$

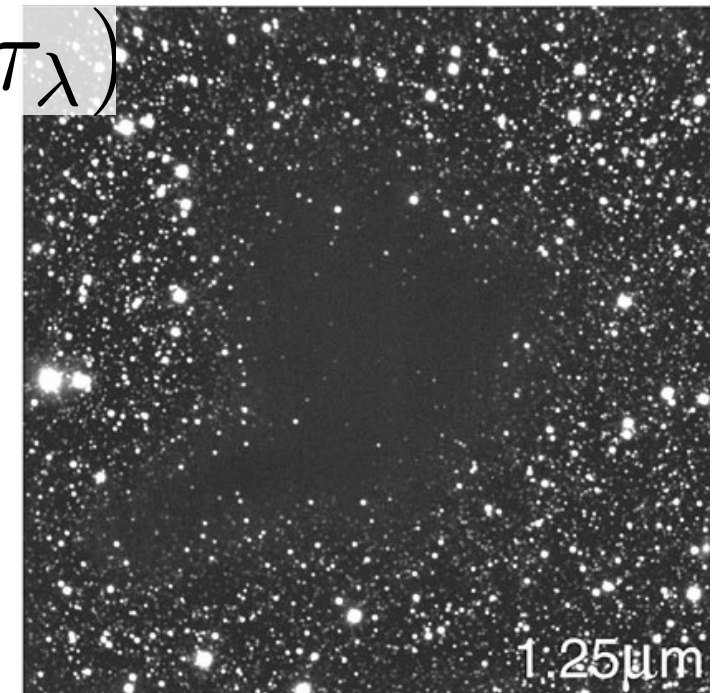
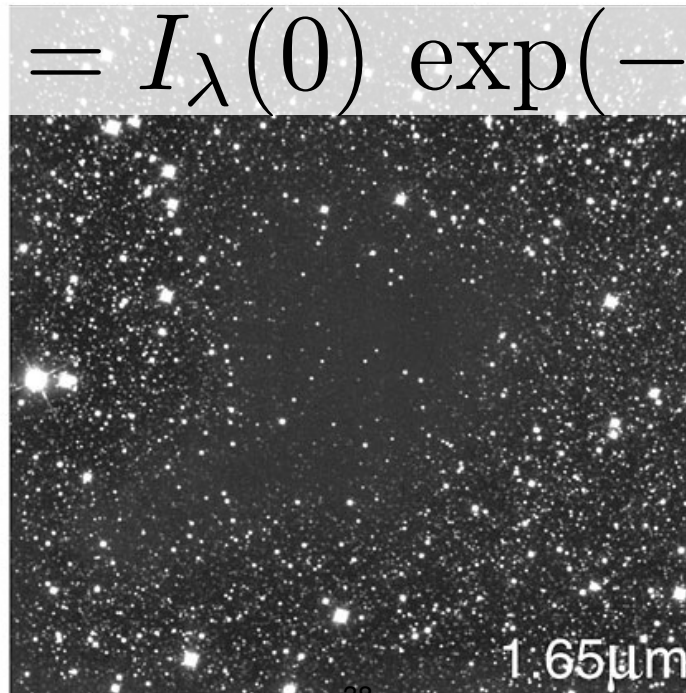
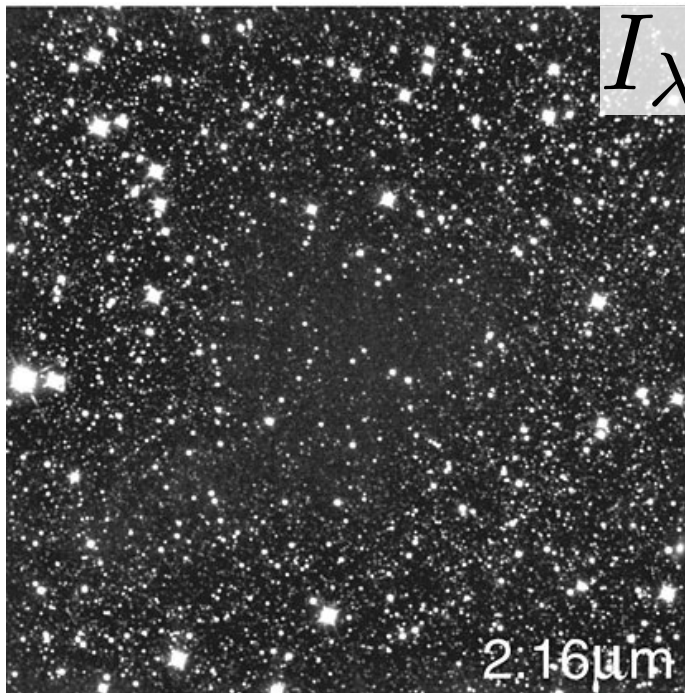
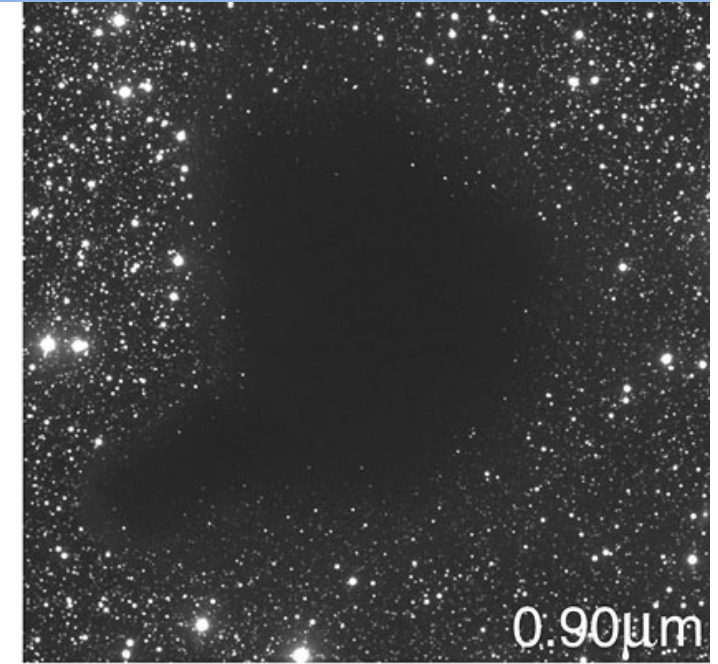
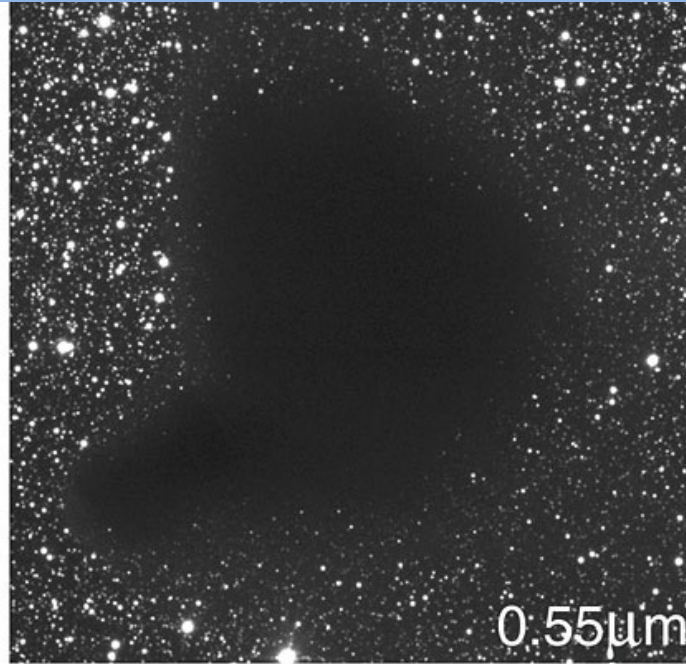
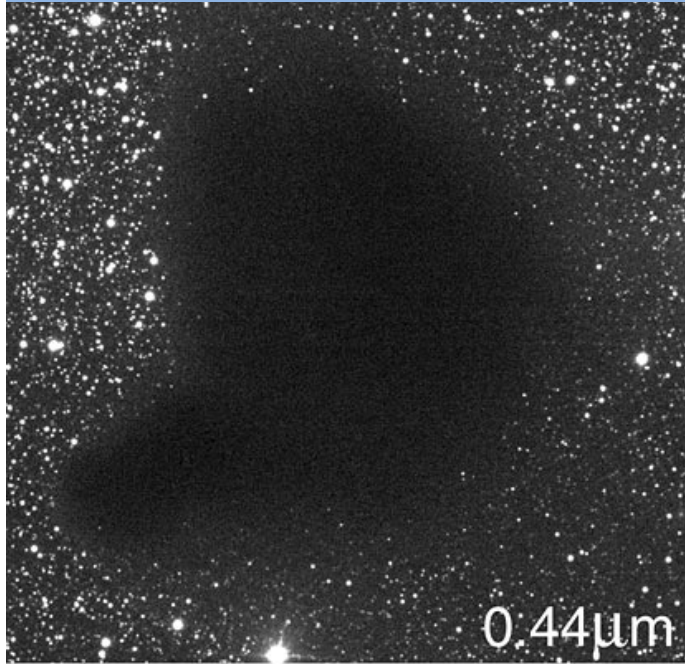
A l'équilibre thermodynamique, émission thermique de Planck  $S_\lambda = B_\lambda(T)$



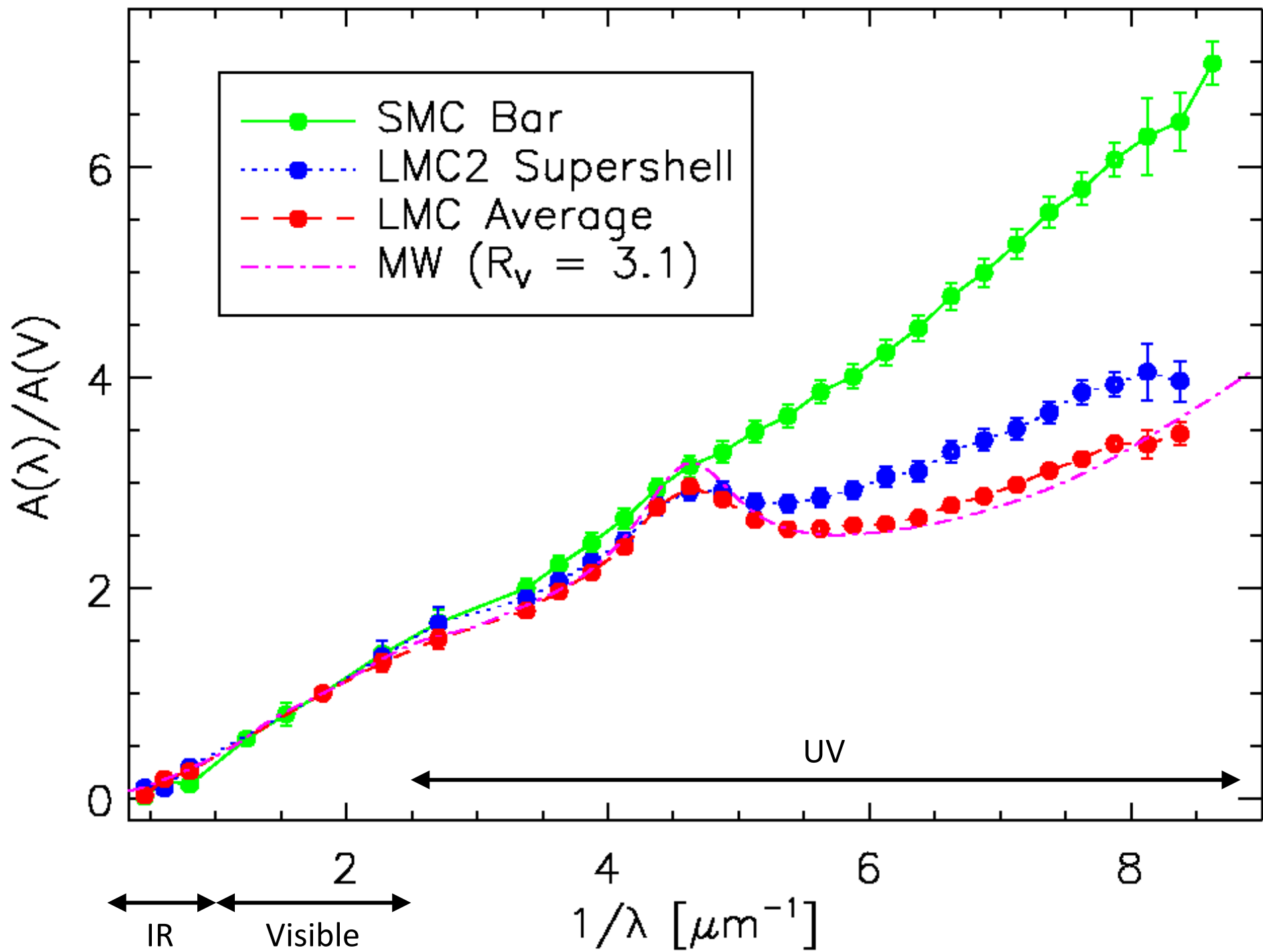
Les fluctuations de température du fond diffus cosmologique (satellite Planck, 2013).



# Extinction interstellaire



$$I_{\lambda} = I_{\lambda}(0) \exp(-\tau_{\lambda})$$





Nuage moléculaire géant dans la nébuleuse de l'Aigle (M16) : évaporation due au rayonnement des étoiles jeunes alentours

Far Infrared



Visible



Visible



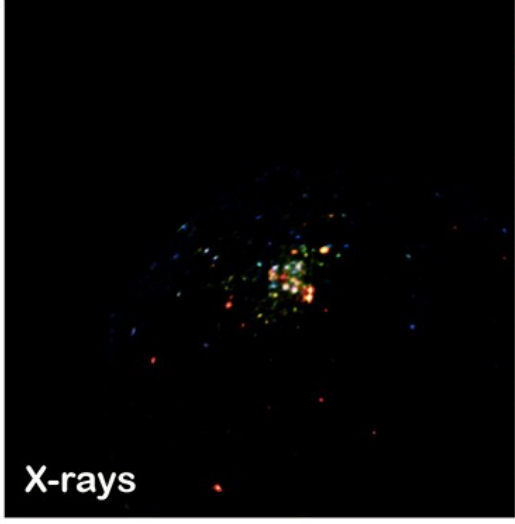
Far Infrared & X-rays



Near Infrared



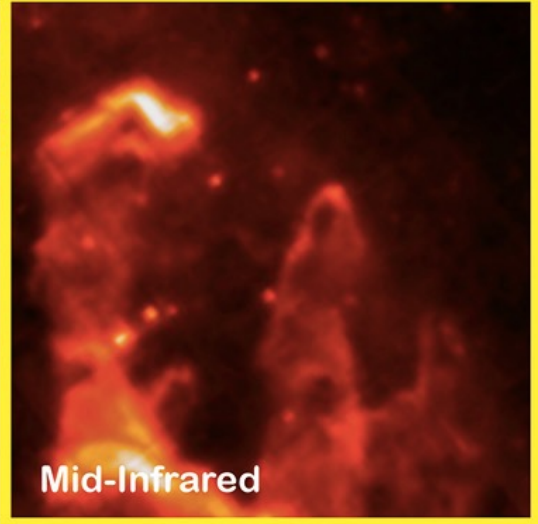
X-rays



Visible & Infrared & X-rays



Mid-Infrared



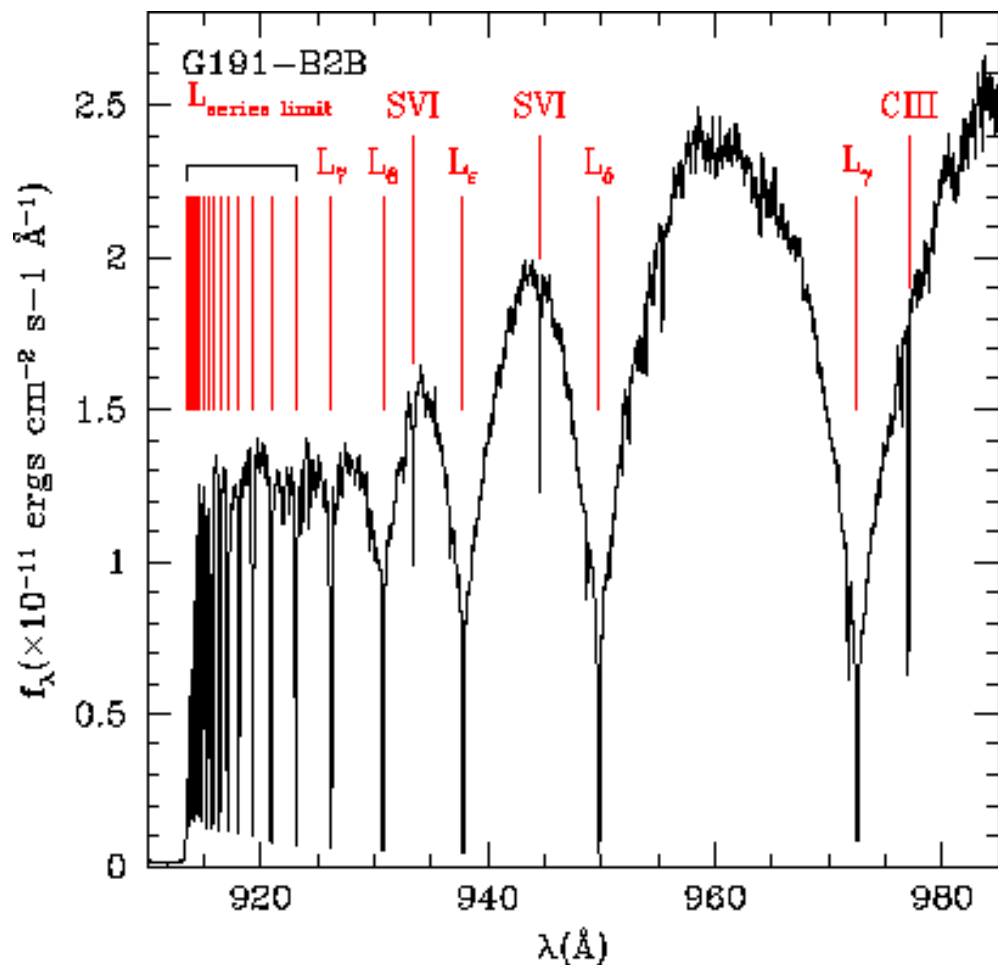


# Absorption vs émission

$$I_\lambda = I_\lambda(0) \exp(-\tau_\lambda) + S_\lambda (1 - \exp(-\tau_\lambda))$$

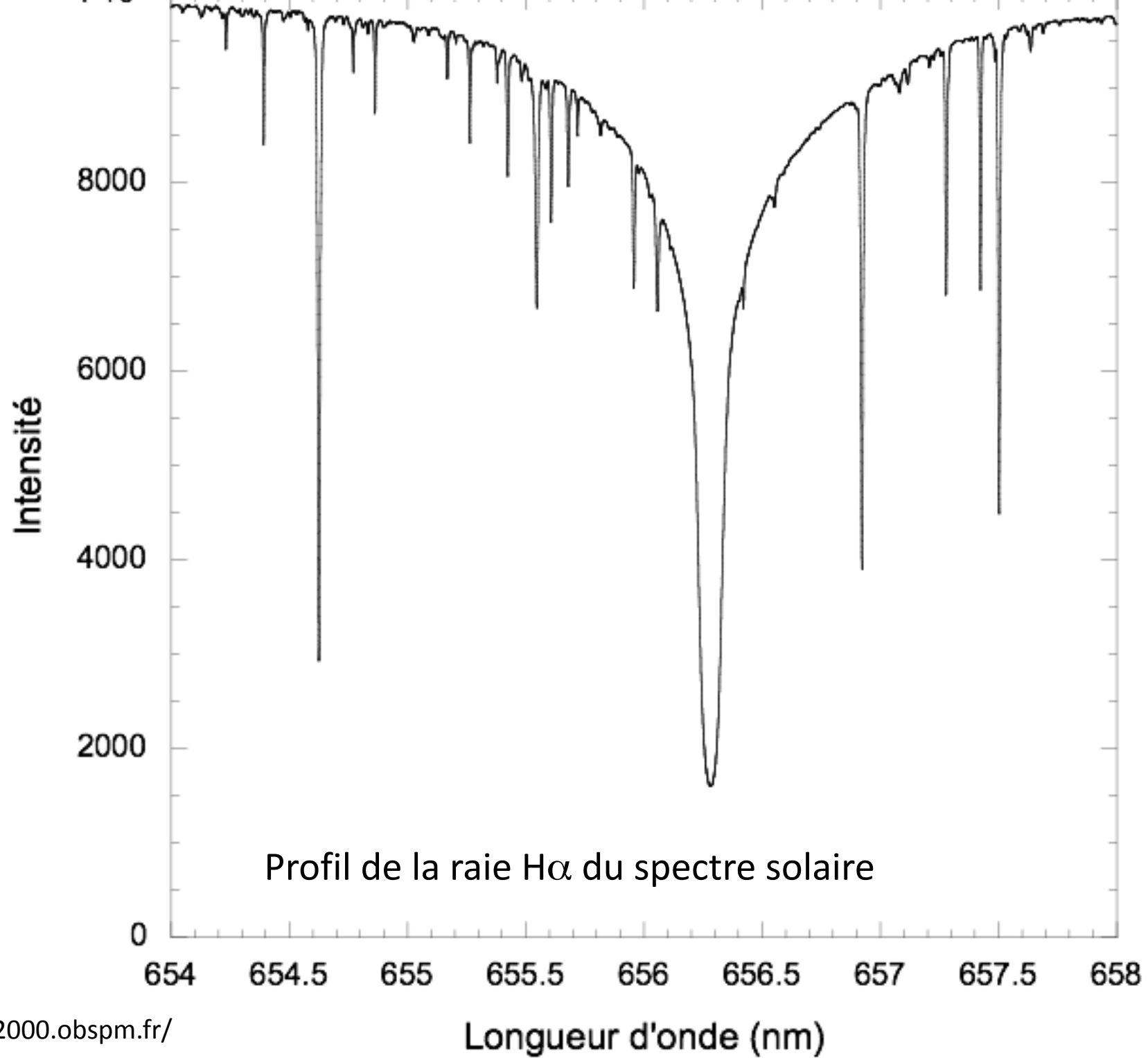
Cas optiquement mince  $\tau_\lambda \ll 1$

$$I_\lambda \simeq (1 - \tau_\lambda) I_\lambda(0) + \tau_\lambda S_\lambda \simeq I_\lambda(0) - \tau_\lambda (I_\lambda(0) - S_\lambda)$$

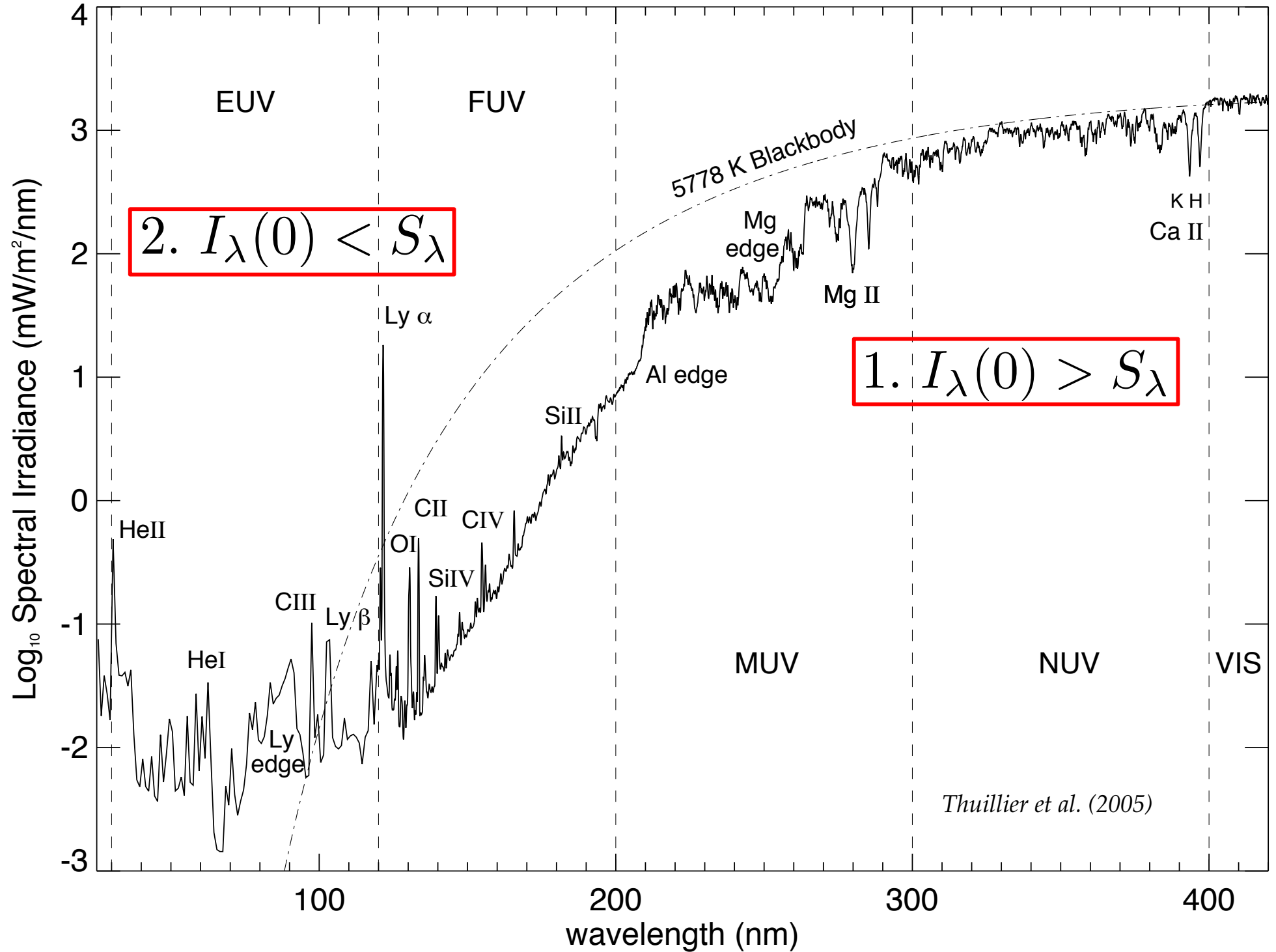


$$1. I_\lambda(0) > S_\lambda$$

Etude du milieu interstellaire chaud par spectroscopie d'absorption (dans l'UV) du rayonnement d'une naine blanche.



# Solar Ultraviolet Irradiance Spectrum





# TRANSPORT D'ÉNERGIE DANS UNE ÉTOILE

Production d'énergie

Transport radiatif, conductif, convectif

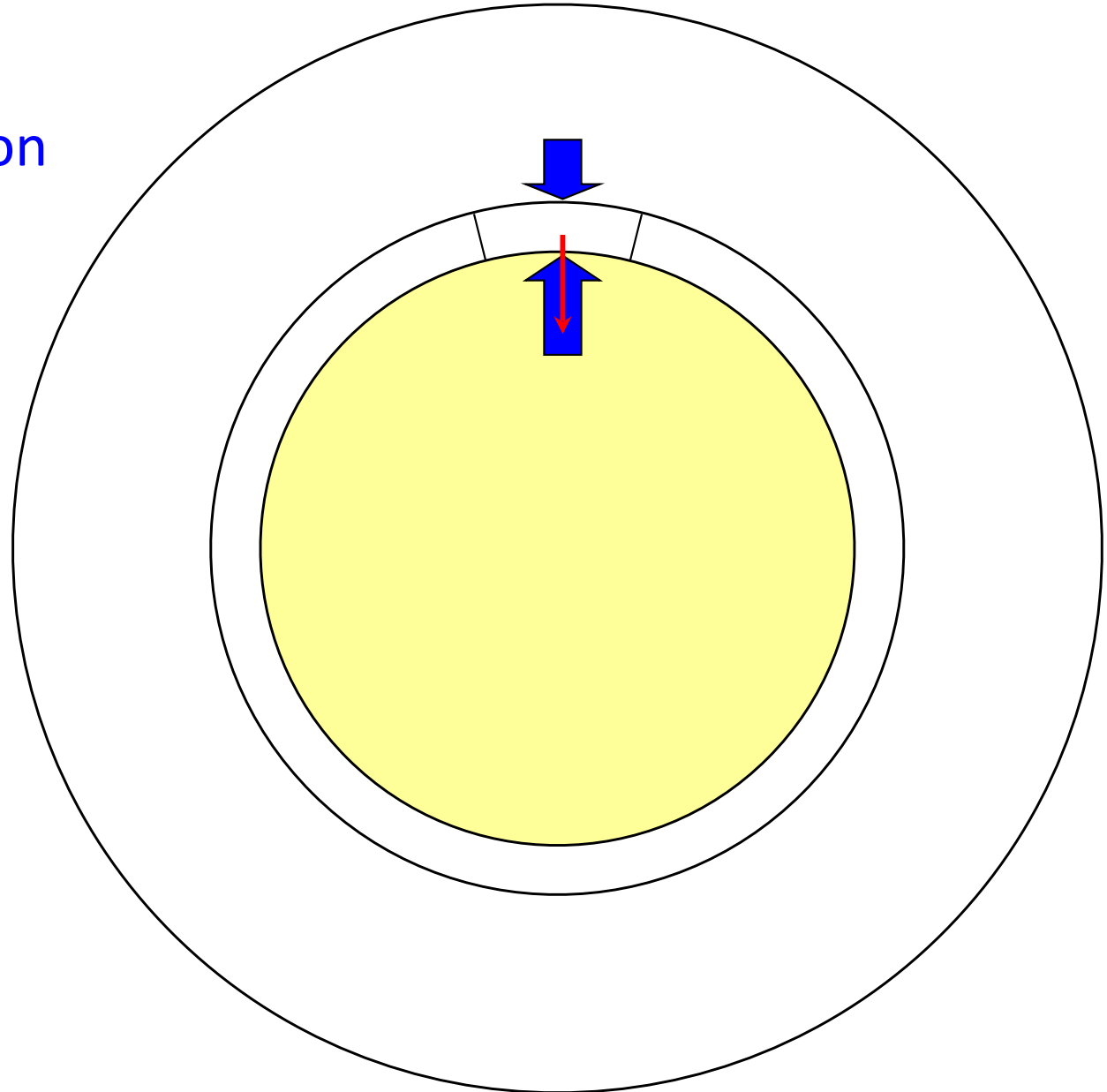
# Equilibre d'un astre auto-gravitant

$$-P(r + dr)dS + P(r)dS - \rho(r)dSdr g(r) = 0$$

Les variations de la **pression**  
équilibrent le **poids**.

Equilibre hydrostatique

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r)$$



# Le théorème du viriel

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r) \quad \Rightarrow \quad 3\bar{P}V = -U_G$$

Pour un gaz parfait  $P = \frac{2}{3} \frac{U}{V}$  et donc  $2U + U_G = 0$

L'énergie totale vaut donc  $E = U + U_G = \begin{cases} -U \\ \frac{1}{2} U_G \end{cases}$

Pour une sphère  $U_G = -\beta \frac{GM^2}{R}$  ( $\beta = 3/5$  si la sphère est homogène).

Étoile à l'équilibre = système à capacité calorifique négative !



# Durée de vie d'une étoile

Si l'étoile rayonne en prenant sur son énergie potentielle gravitationnelle alors

$$\tau = \frac{U_G}{L_\star} \quad \text{Durée de Kelvin}$$

Dans le cas du Soleil, cela donne

$$\left\{ \begin{array}{l} R_\odot = 6.96 \cdot 10^5 \text{ km} \\ M_\odot = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg} \\ L_\odot = 3.83 \cdot 10^{26} \text{ W} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U_G \approx 2.3 \cdot 10^{41} \text{ J} \\ \tau \approx 19 \cdot 10^6 \text{ ans} \end{array} \right.$$

Age du système solaire  $\approx 4.56 \cdot 10^9$  ans !

**Comment expliquer la longévité du Soleil ?**

# Quelle source interne d'énergie ?

Le Soleil a rayonné  $3.83 \cdot 10^{26}$  W pendant  $4.56 \cdot 10^9$  ans.

Il contient environ  $10^{57}$  protons.

Il a donc disposé d'une énergie de 0.38 MeV/proton !

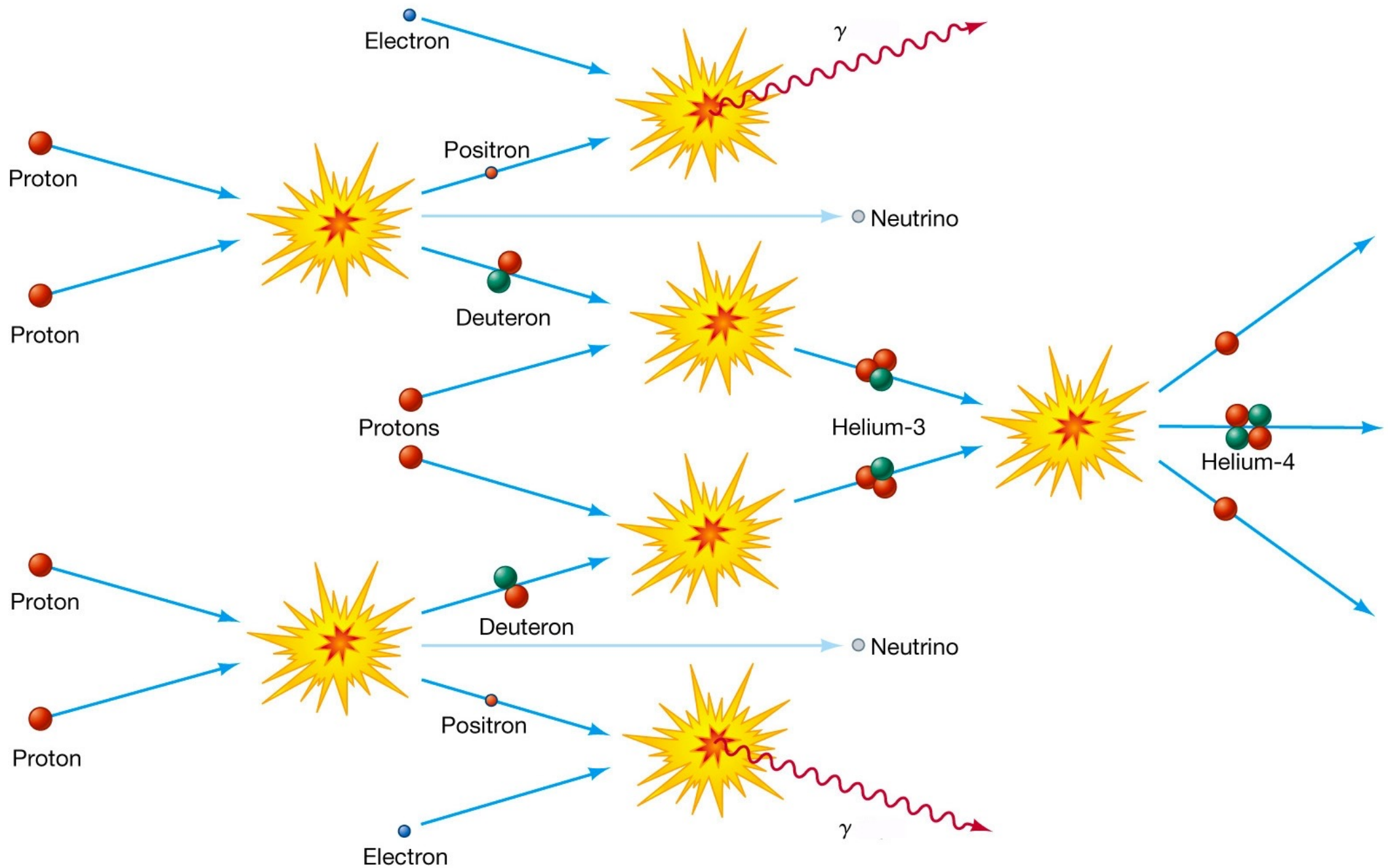
Chimie  $\approx 1$  eV/proton

Gravité  $\approx 2$  keV/proton

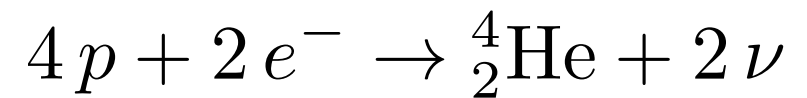
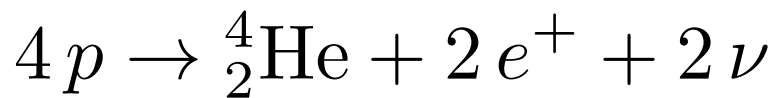
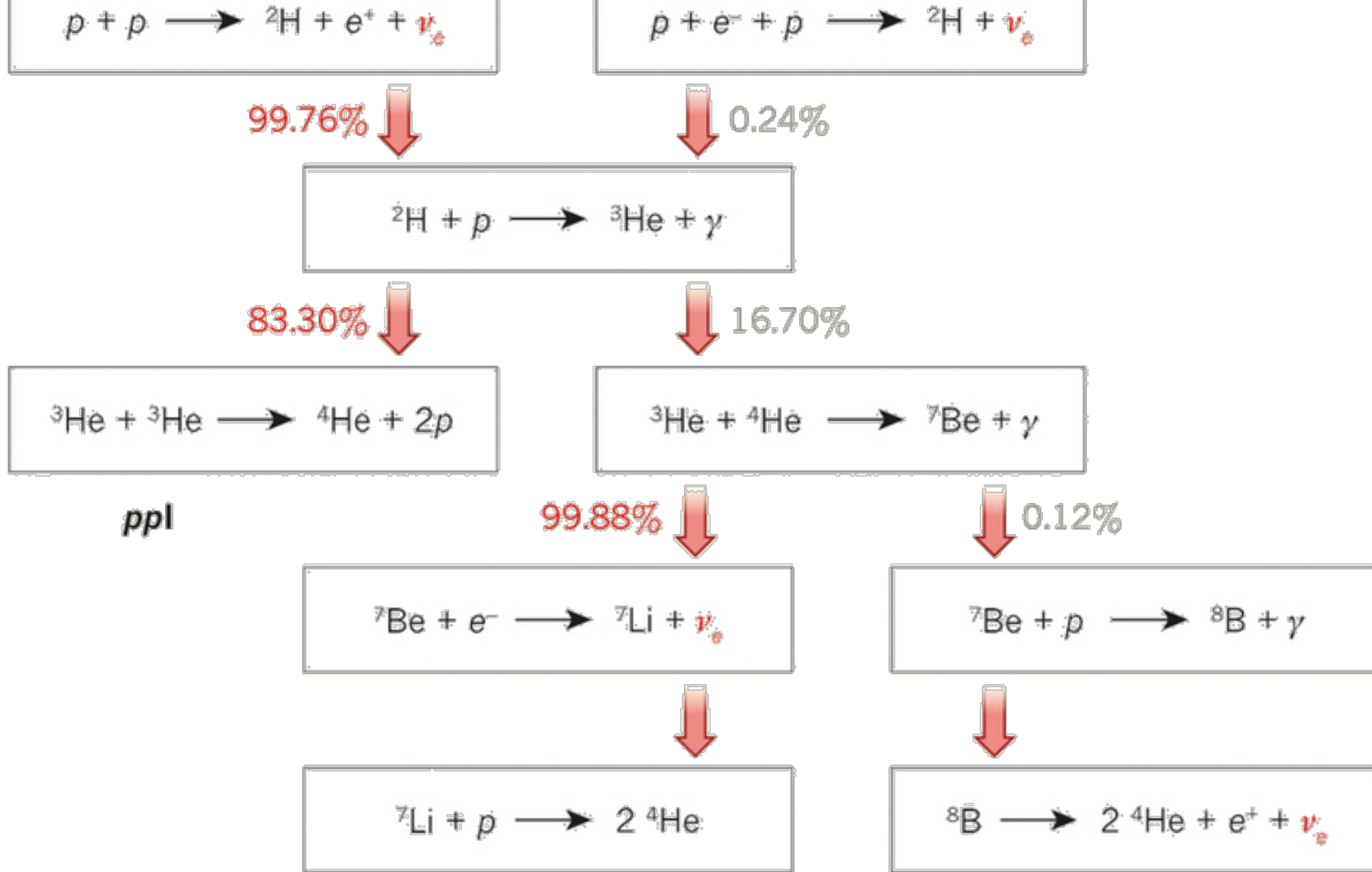
Nucléaire  $\approx 1$  MeV/proton

Comment la source nucléaire se met-elle en place ?

# La chaîne proton-proton I







$$Q = 4m_p + 2m_e - m_{{}^4\text{He}} = 26.7 \text{ MeV} \quad \bar{E} = 0.26 \text{ MeV}$$

**Chaque seconde le Soleil transforme 600 Mt d'hydrogène en 595 Mt d'hélium, la différence est convertie en énergie.**

# Bilan d'énergie local

Conservation de l'énergie, par unité de masse

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ}{dt} - P \frac{dV}{dt}$$

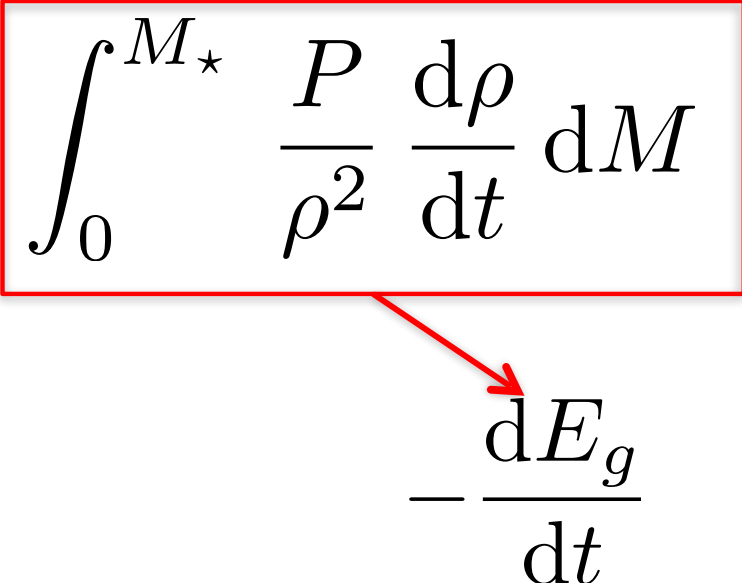
$$\varepsilon_{\text{nuc}} - \varepsilon_{\nu} + \frac{L(r) - L(r + dr)}{\rho(r) 4\pi r^2 dr} \quad \frac{1}{\rho}$$

[W/kg]

$$\frac{dL}{dM} = \varepsilon_{\text{nuc}} - \varepsilon_{\nu} - \frac{dU}{dt} + \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt}$$

Equation bilan à l'équilibre

# Bilan d'énergie global

$$L_{\star} + L_{\nu} = \mathcal{P}_{\text{nuc}} - \frac{dE_i}{dt} + \int_0^{M_{\star}} \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} dM$$

$$- \frac{dE_g}{dt}$$

$$L_{\star} + L_{\nu} = \mathcal{P}_{\text{nuc}} - \frac{d}{dt} (E_i + E_g)$$

Dans les phases d'évolution lente,  
la luminosité de l'étoile est égale à la puissance nucléaire.



# Transport d'énergie

Le contraste de température entre le centre et la surface déclenche un transport d'énergie du centre jusqu'à la surface.

Il existe trois modes de transports de l'énergie :

radiatif

conductif

convectif

# Le transport radiatif

$$dI_\nu = -\alpha_\nu I_\nu ds + j_\nu ds$$

Intensité spécifique [W/m<sup>2</sup>/sr/Hz]

Coefficient d'absorption [m<sup>-1</sup>]

Émissivité [W/m<sup>3</sup>/Hz/sr]

Sources d'opacité ( $\kappa$ , cm<sup>2</sup>/g) :

- transition lié-lié
- transition lié-libre
- diffusion Thomson sur les électrons
- diffusion Rayleigh sur les atomes

Dans le Soleil, un photon a un libre parcours moyen  $\lambda = \frac{1}{\kappa\rho} \approx 0.1 - 1 \text{ cm}$

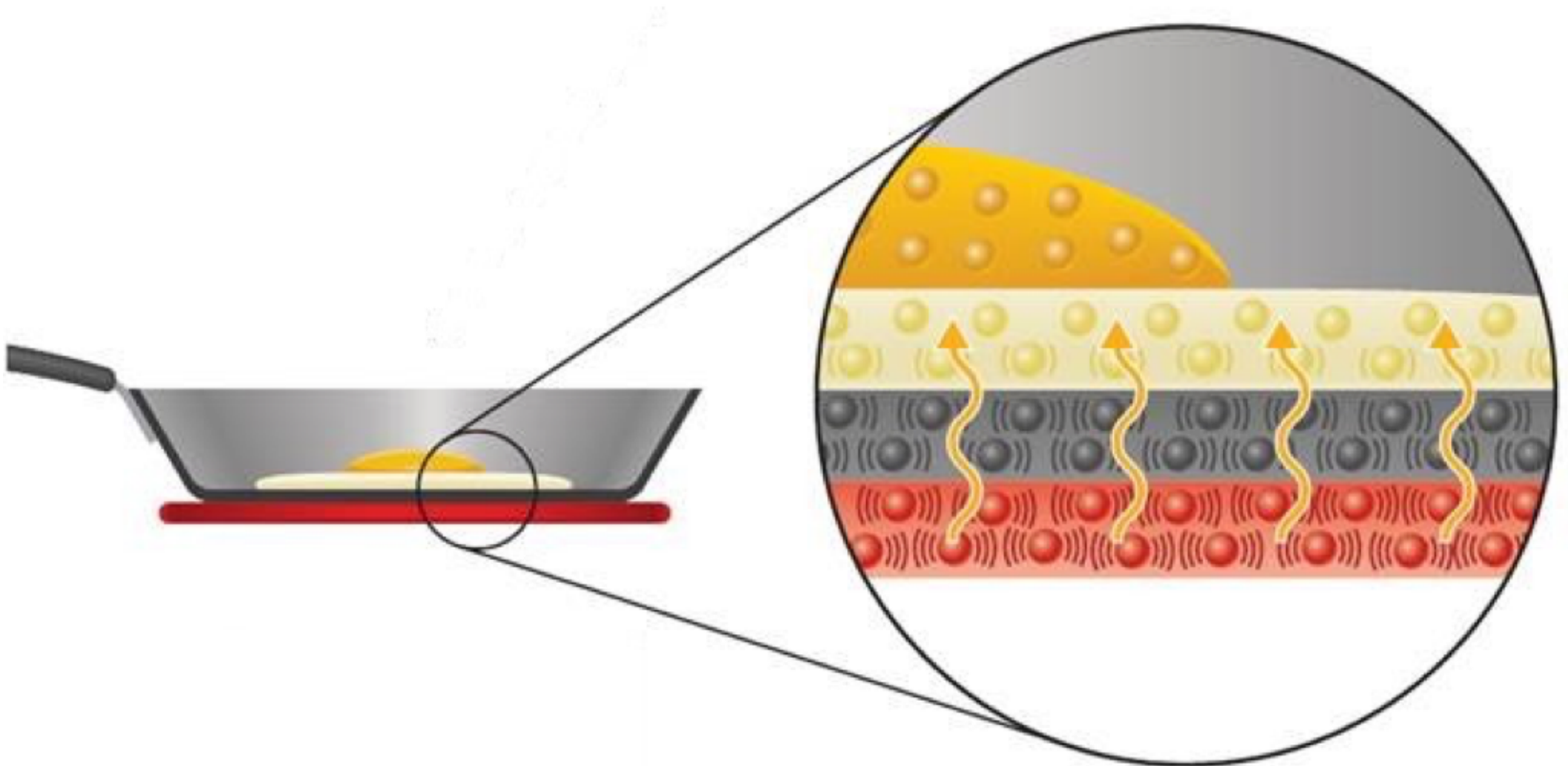
$$\frac{\lambda}{R_\odot} \ll 1 \quad \Delta t_{\text{sortie}} \sim \frac{R_\odot^2}{\lambda c} \approx 60\,000 \text{ ans}$$

On peut traiter le transport de rayonnement en régime diffusif

Mais attention au bord...

# Transfert d'énergie : conduction

La **conduction thermique** est la transmission de proche en proche de l'agitation thermique des molécules (chaleur).





# Le transport conductif

Diffusion de la quantité de mouvement (collisions de proche en proche)

$$\vec{F}_c = -D_c \vec{\nabla} T$$

Opacité conductive  $\kappa_c \equiv \frac{4acT^3}{3D_c\rho}$

Opacité totale  $\frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\bar{\kappa}} + \frac{1}{\kappa_c}$

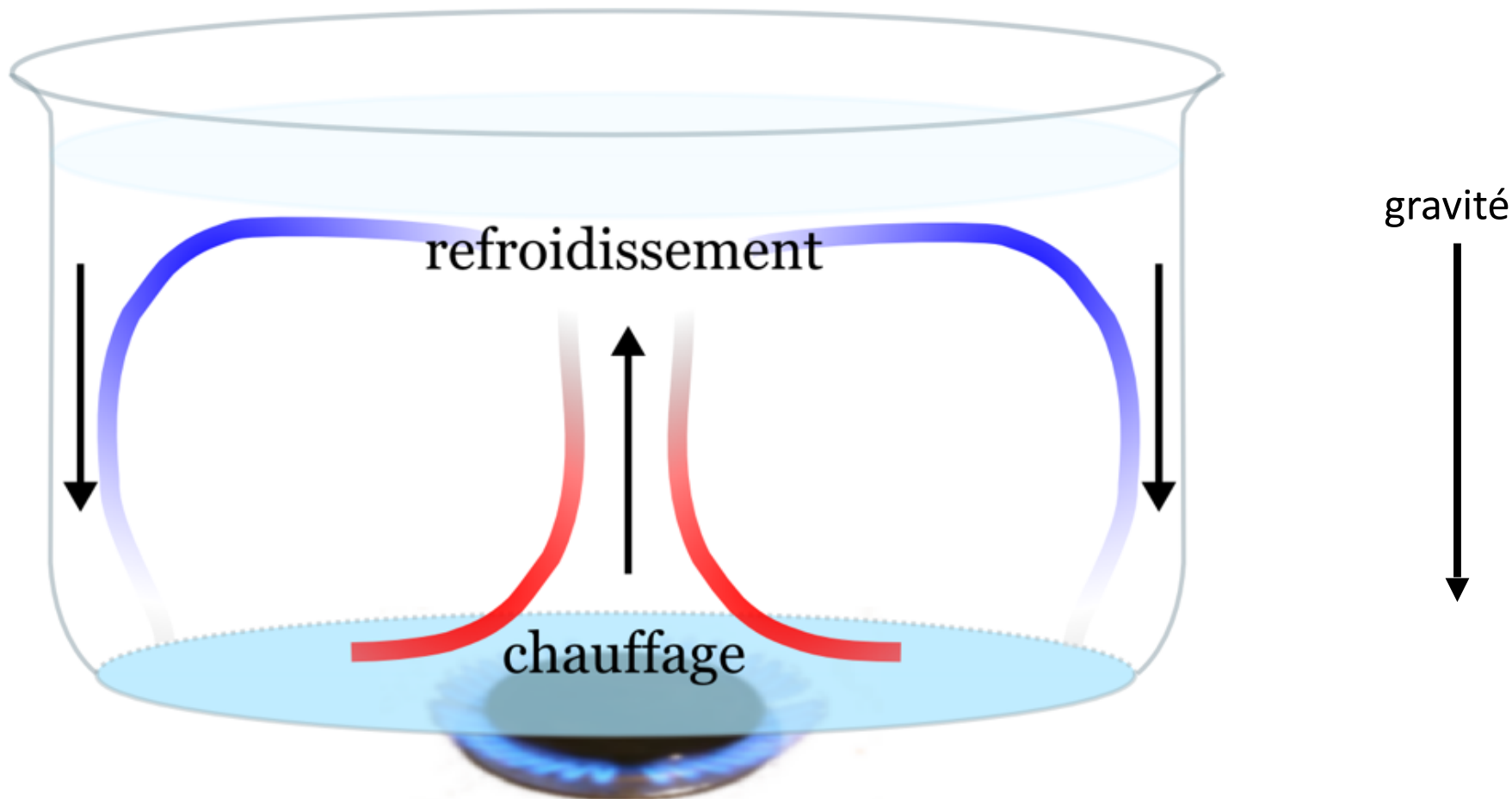
La conduction n'est importante que pour les milieux froids et denses (électrons dégénérés)  $D_c = \frac{1}{3} \lambda_c v$

- l.p.m. grand car une collision avec changement d'impulsion est peu probable (Pauli).
- vitesse moyenne grande car les électrons sont dégénérés.

# Transfert d'énergie : convection

La **convection** est le transfert de chaleur dû au mouvement global des particules d'un fluide.

Exemple : l'air chaud, moins dense, monte, transportant la chaleur du bas vers le haut.



# Le transport convectif

Un globule de gaz monte adiabatiquement : poursuit-il ou retombe-t-il ?

L'instabilité se déclenche si

$$\rho_{\text{ad}} < \rho(r + dr)$$

c'est-à-dire si

$$T_{\text{ad}} > T(r + dr)$$

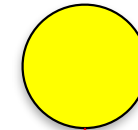
Soit, en valeur absolue

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{\star} > \left. \frac{dT}{dr} \right|_{\text{ad}}$$

**Gaz**

$$\rho_{\text{ad}}$$

$$T_{\text{ad}}$$



$dr$



$$\rho(r)$$

$$T(r)$$

**Etoile**

$$\rho(r + dr)$$

$$T(r + dr)$$

$$\rho(r)$$

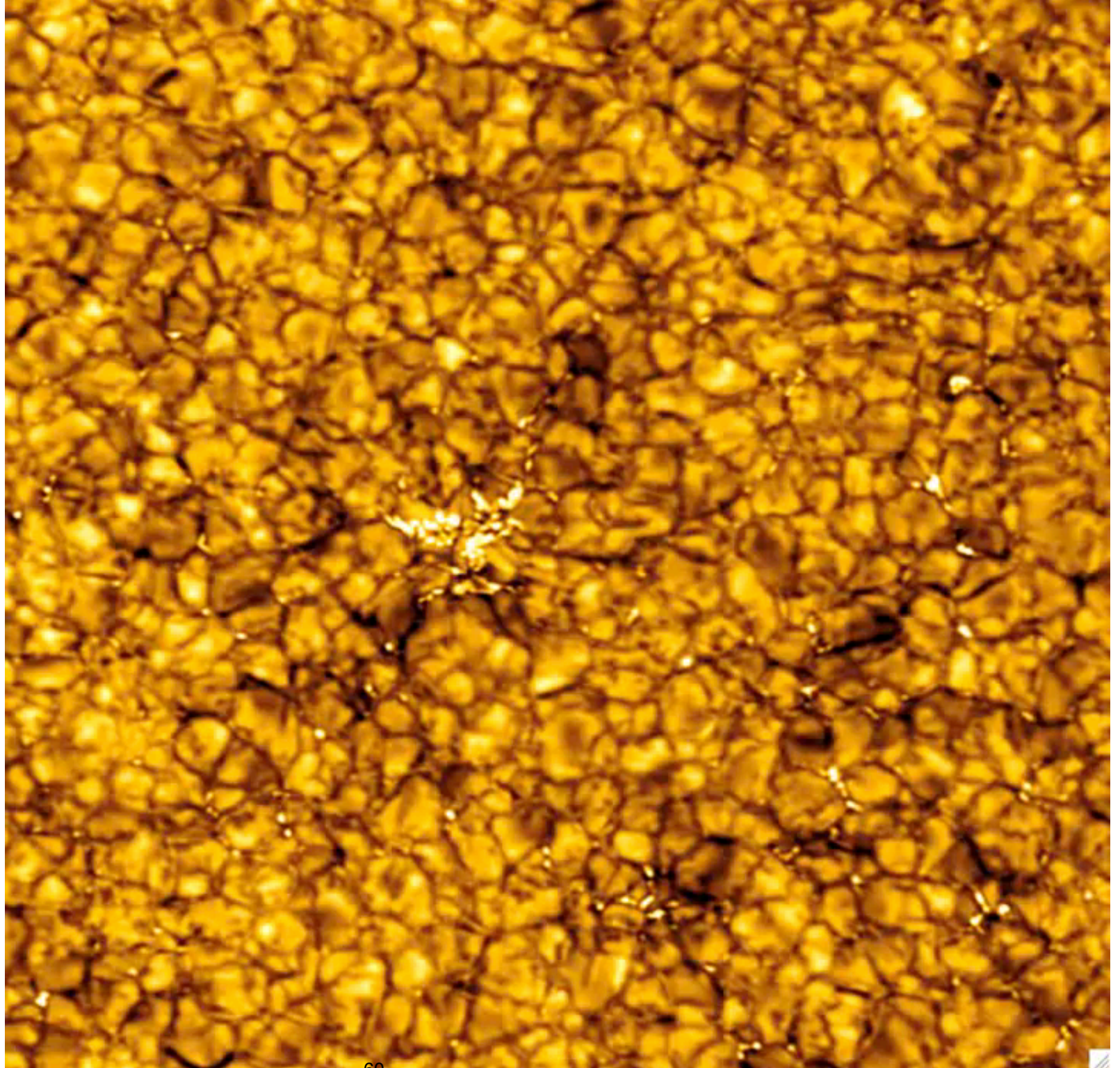
$$T(r)$$



Cumulus dit « de beau temps », résultant de la convection atmosphérique. Remarquez le « plancher » de condensation.



# La convection solaire





# Structure schématique du Soleil

