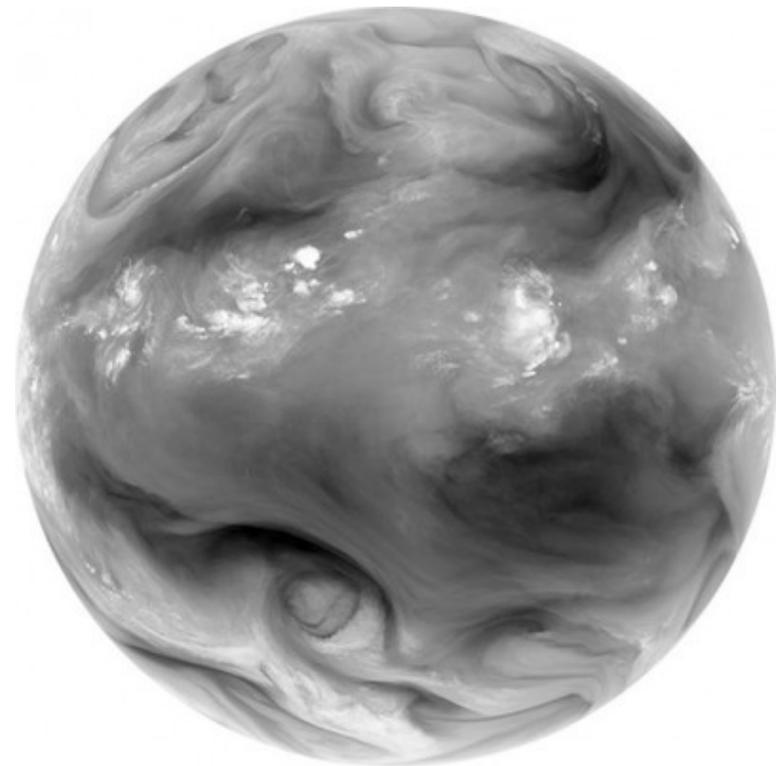


L'effet de serre

G. Rouillet
24 janvier 2023



Visible



Infra-rouge

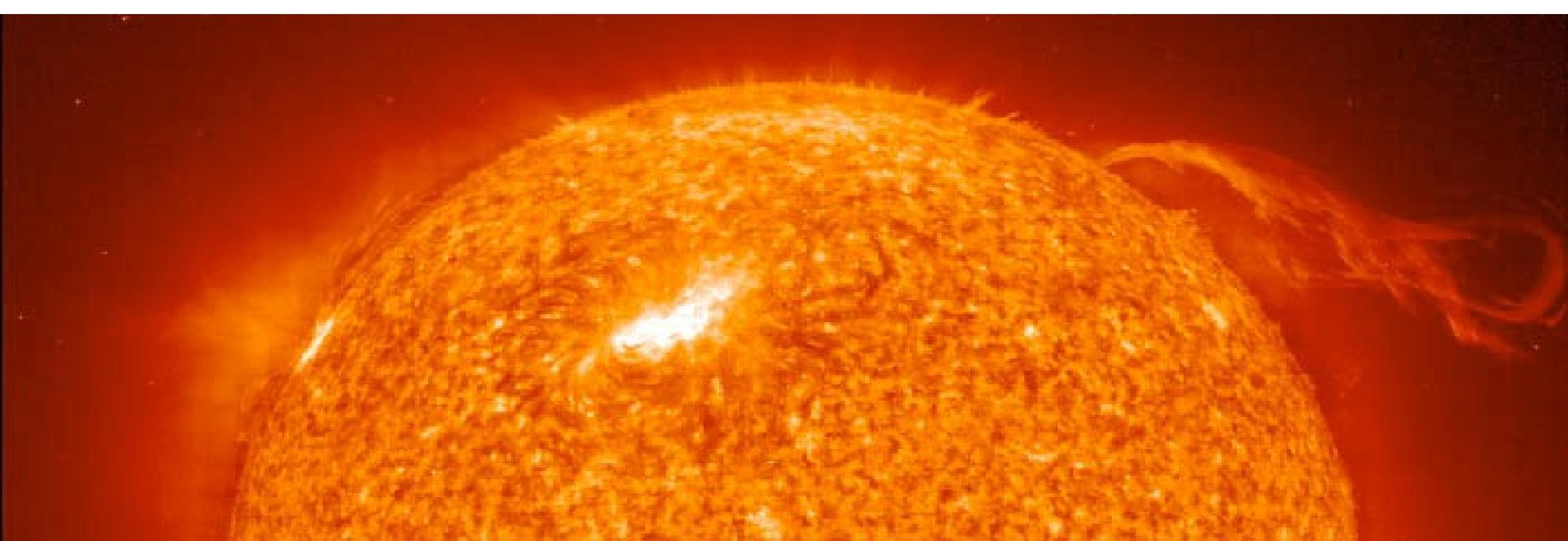
L'effet de serre en une diapo

- **L'atmosphère est opaque aux IR**, à cause des GES (gaz à effet de serre).
- **La surface de la Terre est chauffée par le soleil ET par l'atmosphère**
- **L'effet de serre est l'excès de chauffage dû à l'atmosphère**
- Son intensité est la différence entre le flux IR émis à la surface de la Terre et le flux IR émis au sommet de l'atmosphère, soit 157 W m^{-2}

Source d'énergie : le Soleil

- Température à la surface du Soleil : $T = 6000 \text{ K}$ (photosphère)
- Lumière visible blanche
- Luminosité (puissance émise dans tout l'espace) :

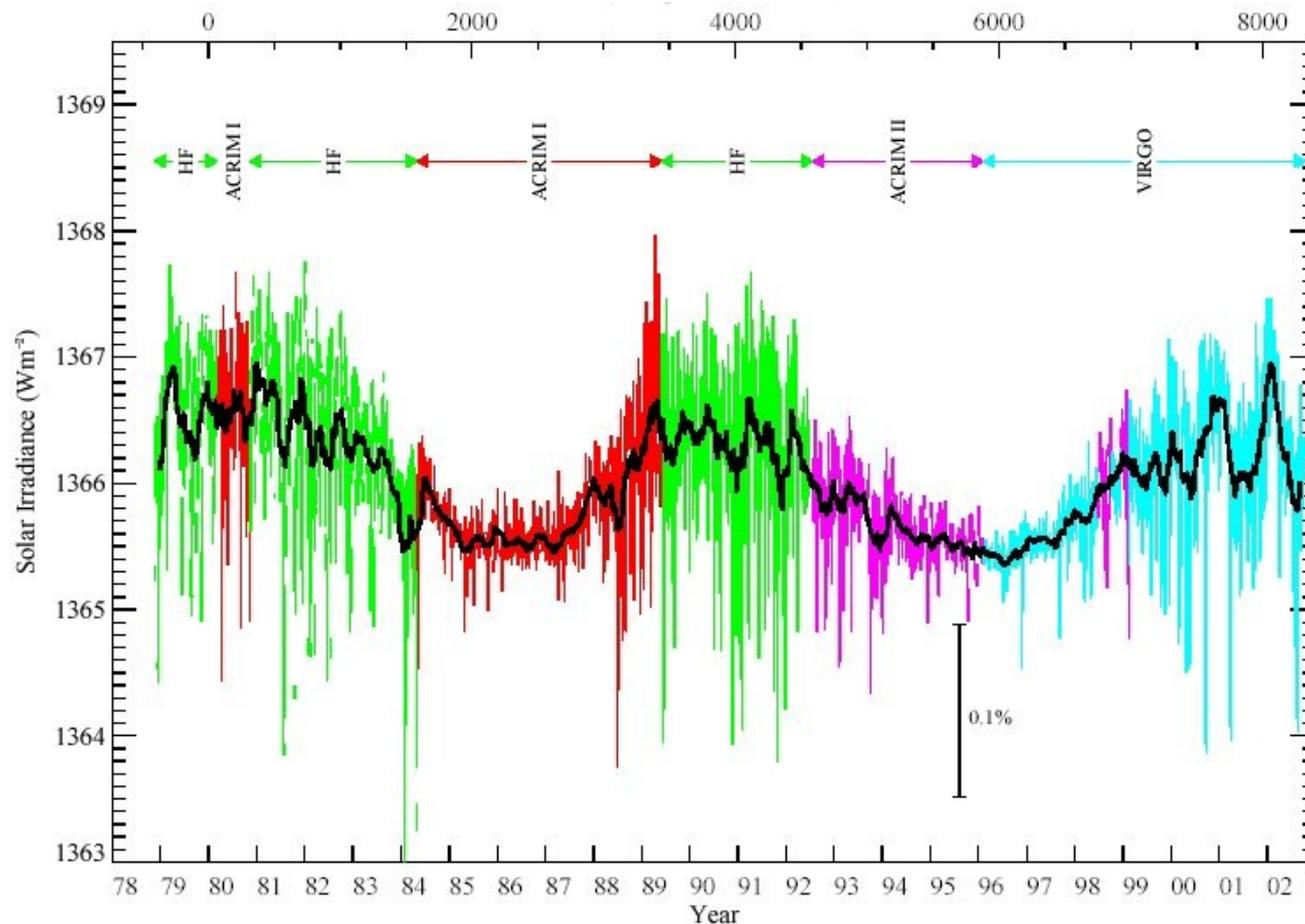
$$L_0 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$$



Flux solaire

- Au sommet de l'atmosphère : $F = 1360 \text{ W m}^{-2}$
- **En moyenne sur Terre : $F/4 = 340 \text{ W m}^{-2}$**

facteur 1/4 car 1/2 pour le côté nuit, et 1/2 pour la sphéricité (surface disque vs surface sphère)



Mesure de F
par satellite

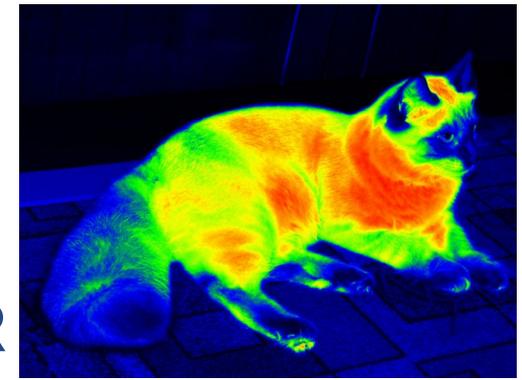
(cycle à 11
ans!)

Equilibre radiatif

- **Flux entrant = Flux sortant !**
- Le flux sortant est infra-rouge (IR), il vaut 340 W m^{-2}
- Pourquoi ce flux infra-rouge ???
- Tout corps rayonne de l'énergie → modèle du corps noir
- Plus le corps est chaud, plus il rayonne d'énergie et plus le rayonnement est « visible »



Le rayonnement des corps



- Un corps à la température ambiante émet de l'énergie sous forme de **rayonnement IR**
- Ce rayonnement se mesure en ... Watt. C'est une puissance.
- La **puissance P** rayonnée dépend de
 - La **surface S** du corps
 - La **température T** du corps (donné en Kelvin)

IR = infra-rouge

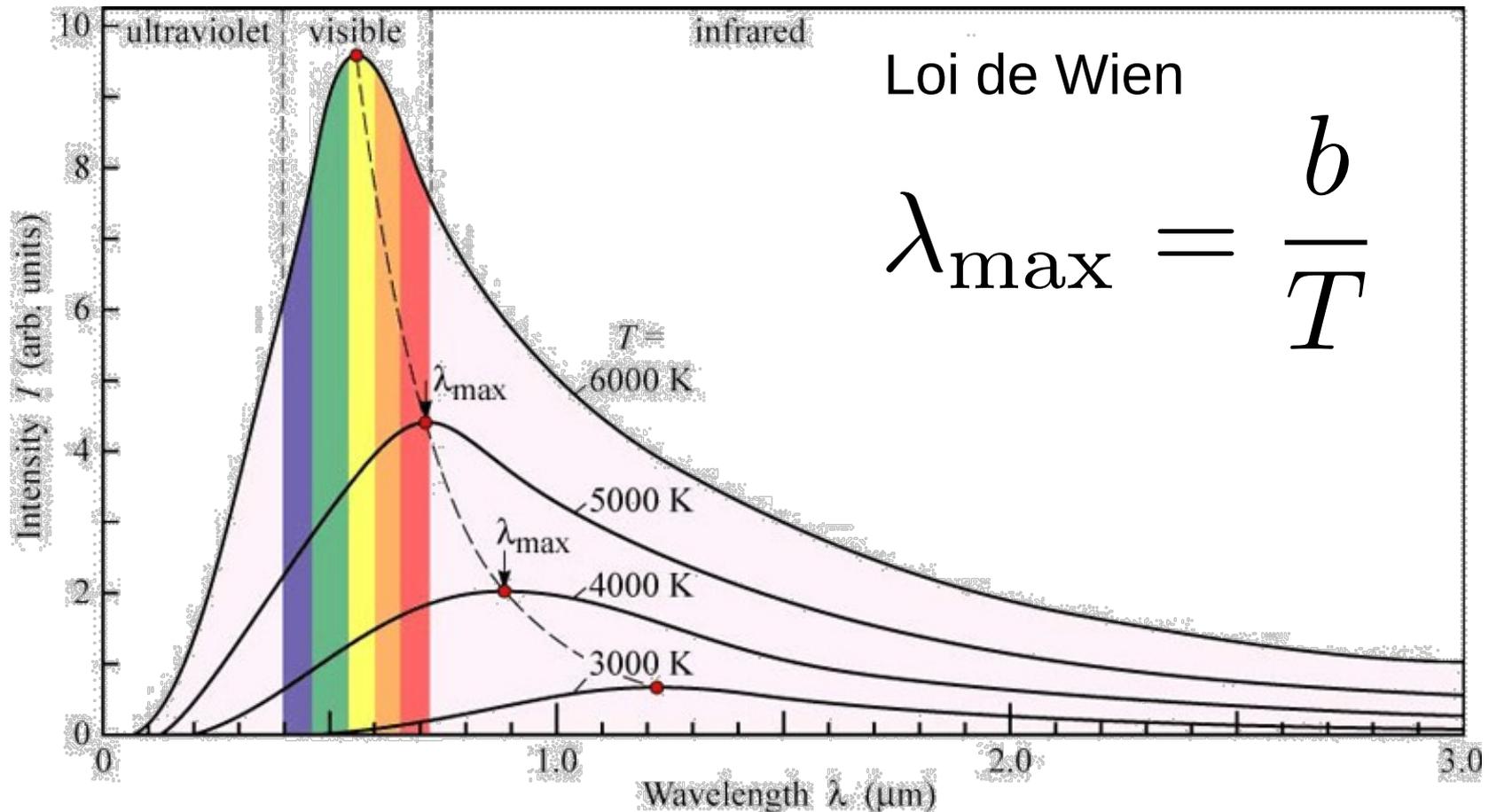
$$P = \sigma S T^4$$

- Constante (universelle) de Stefan-Boltzmann

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

$$T[^\circ\text{C}] = T[\text{K}] + 273,15$$

Modèle du « corps noir »



Spectre d'émission d'un corps à la température T

Constante de déplacement de Wien

$$b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m K}^{-1}$$

Premier bilan radiatif

- Flux sortant : rayonnement IR de la Terre !
 - Puissance émise : $P = \sigma S T^4$
 - Surface de la Terre $S = 4\pi R^2$
 - Flux sortant

$$F_{sortant} = \sigma T_{Terre}^4$$

- d'où une première estimation

$$\sigma T_{Terre}^4 = 340 \text{ W m}^{-2}$$

- soit $T_{Terre} = \left(\frac{340}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Le bilan radiatif complet

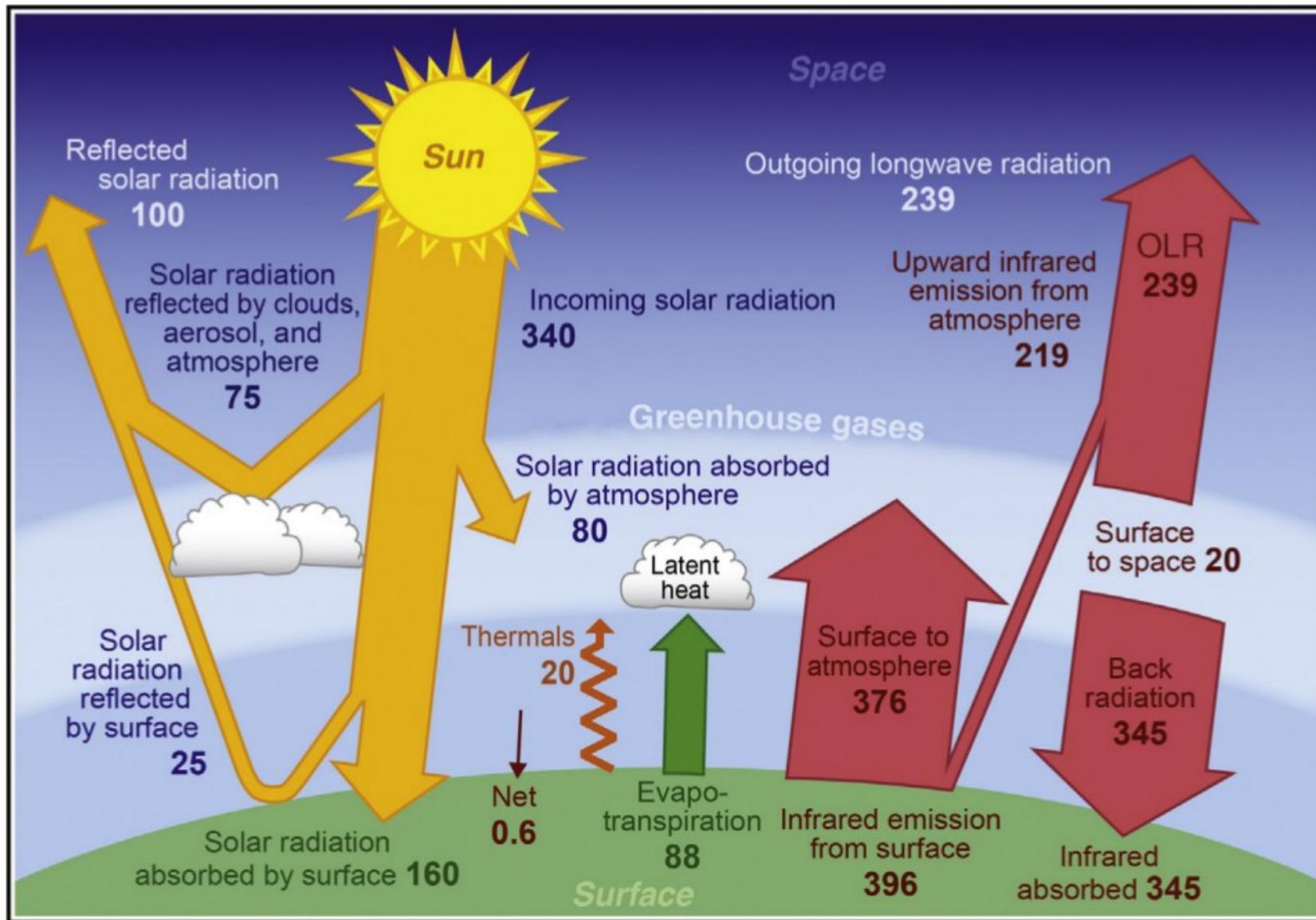


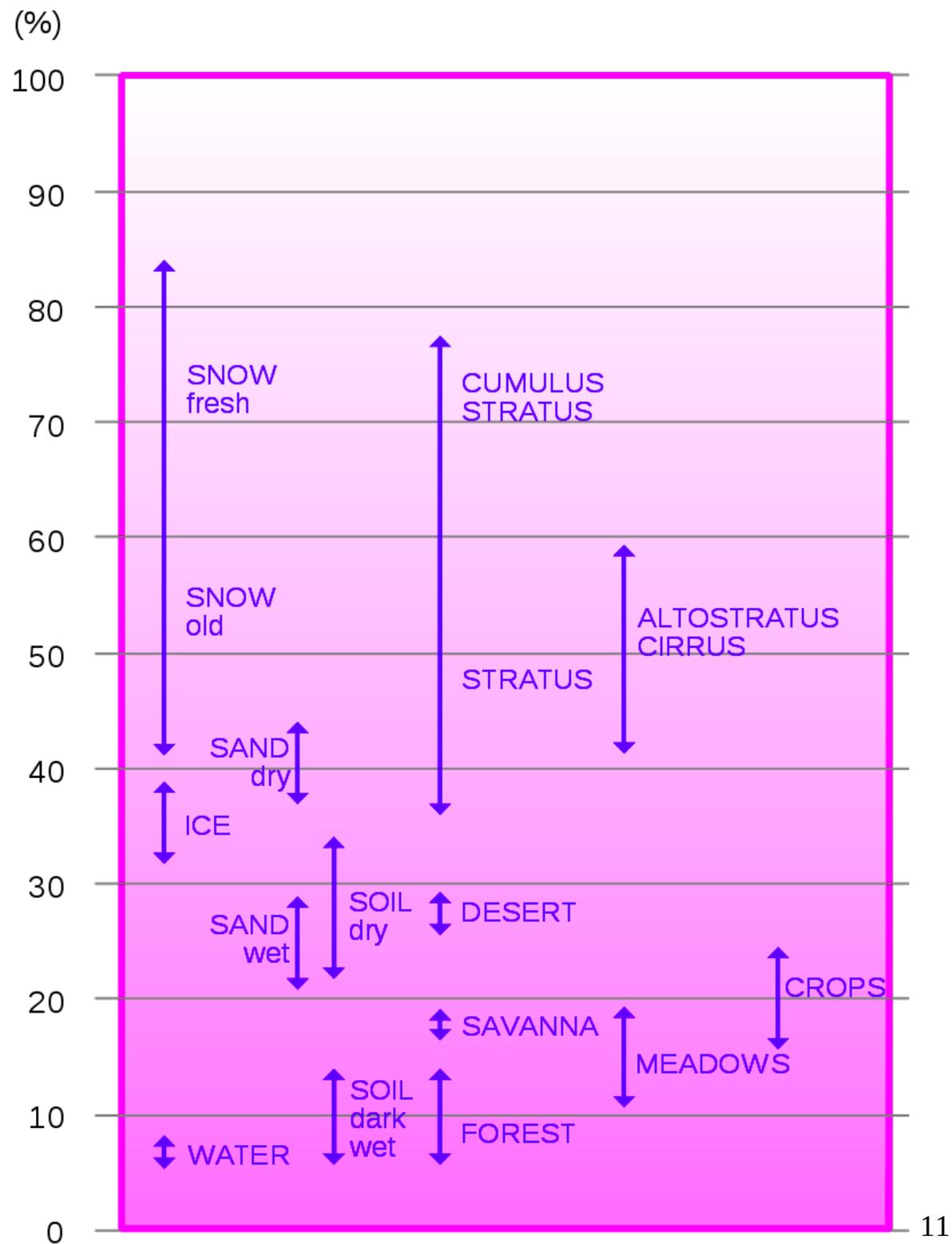
FIGURE 2.4 Global and annual average radiative and nonradiative energy-flow diagram for Earth and its atmosphere. Units are Wm⁻².

[Hartmann, p34]

Ingrédients clefs

- l'**albedo** : % de la lumière visible est réfléchi vers l'espace (planète bleue + nuages blancs, pas planète noire...)
 - Du fait de l'albedo 100 Wm^{-2} sont renvoyés vers l'espace et donc **seulement 240 Wm^{-2} arrive sur Terre**
- l'**effet de serre**
 - Les molécules de l'atmosphère **absorbent** une partie du rayonnement IR émis
 - L'atmosphère émet elle-même de l'IR
 - vers l'espace, ce qui équilibre le flux entrant
 - Vers la Terre, ce qui augmente le flux vers la Terre et la réchauffe : c'est l'effet de serre

L'albedo dépend des conditions à la surface et des nuages

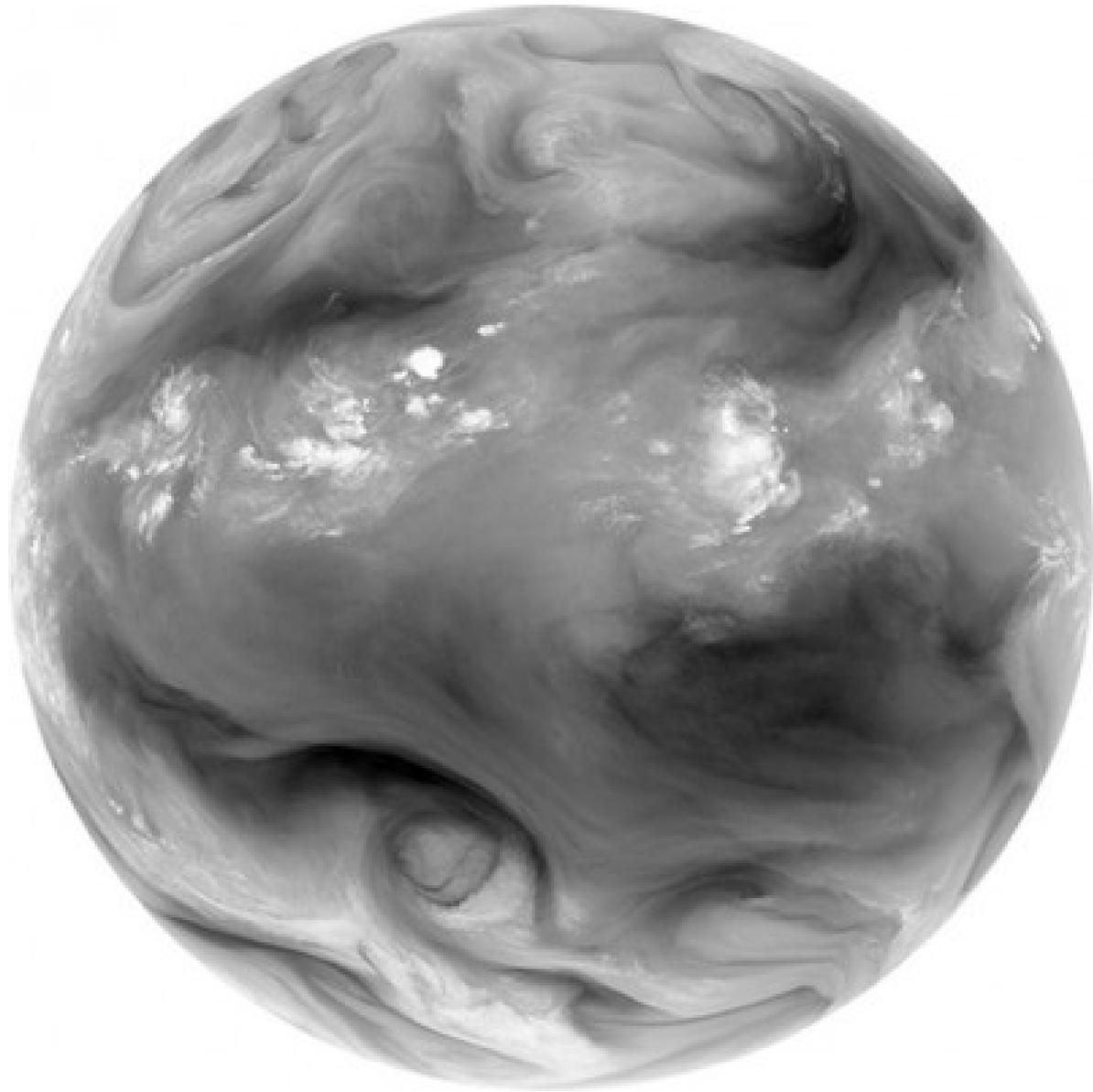


Bilan radiatif en intégrant l'albedo (30%)

$$T_{Terre} = \left(\frac{340 \times (1 - 0,3)}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = -18^{\circ}C$$

Mais sans l'effet de serre ...

La Terre vue dans l'IR



On ne voit pas la surface !

l'IR qui s'échappe de la Terre est émis dans la haute atmosphère !!!

**là où il fait plus froid ...
(-18°C!)**

Effet de serre

- L'atmosphère est opaque aux IR
- Les IR rayonnés à la surface de la Terre sont absorbés par l'atmosphère puis réémis vers le bas et vers le haut
- La surface de la Terre est donc chauffée par le flux solaire ET par l'IR radié par l'atmosphère !!!
- L'effet de serre est le chauffage additionnel fourni par l'atmosphère.
- Du coup la Terre est plus chaude que sans l'atmosphère
- L'intensité de l'effet de serre est la différence entre le flux IR rayonné à la surface de la Terre (396 W m^{-2}) et le flux IR émis au sommet de l'atmosphère (240 W m^{-2}), soit 157 W m^{-2} .

Bilan radiatif en intégrant tout

- L'effet de serre ajoute donc 157 Wm^{-2} de chauffage

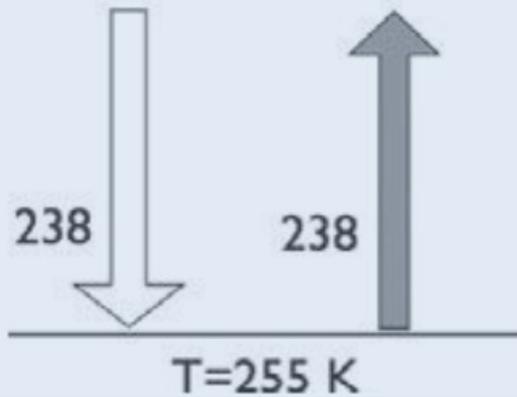
$$T_{Terre} = \left(\frac{340 \times (1 - 0,3) + 157}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{Terre} = 16^{\circ}\text{C}$$

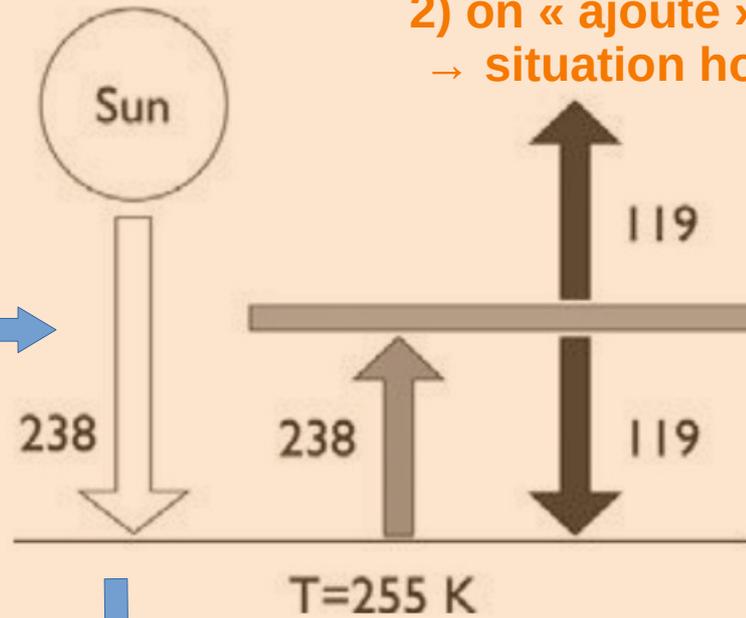
Note : en pratique, on n'estime pas la température moyenne, seulement les variations de la température moyenne !

Modèle simplifié

1) Équilibre sans atmosphère

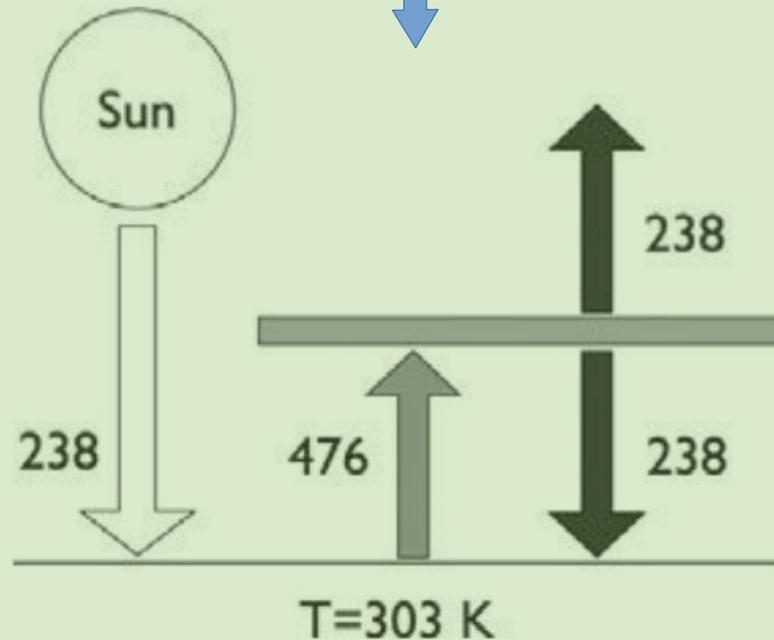


2) on « ajoute » l'atmosphère
→ situation hors d'équilibre



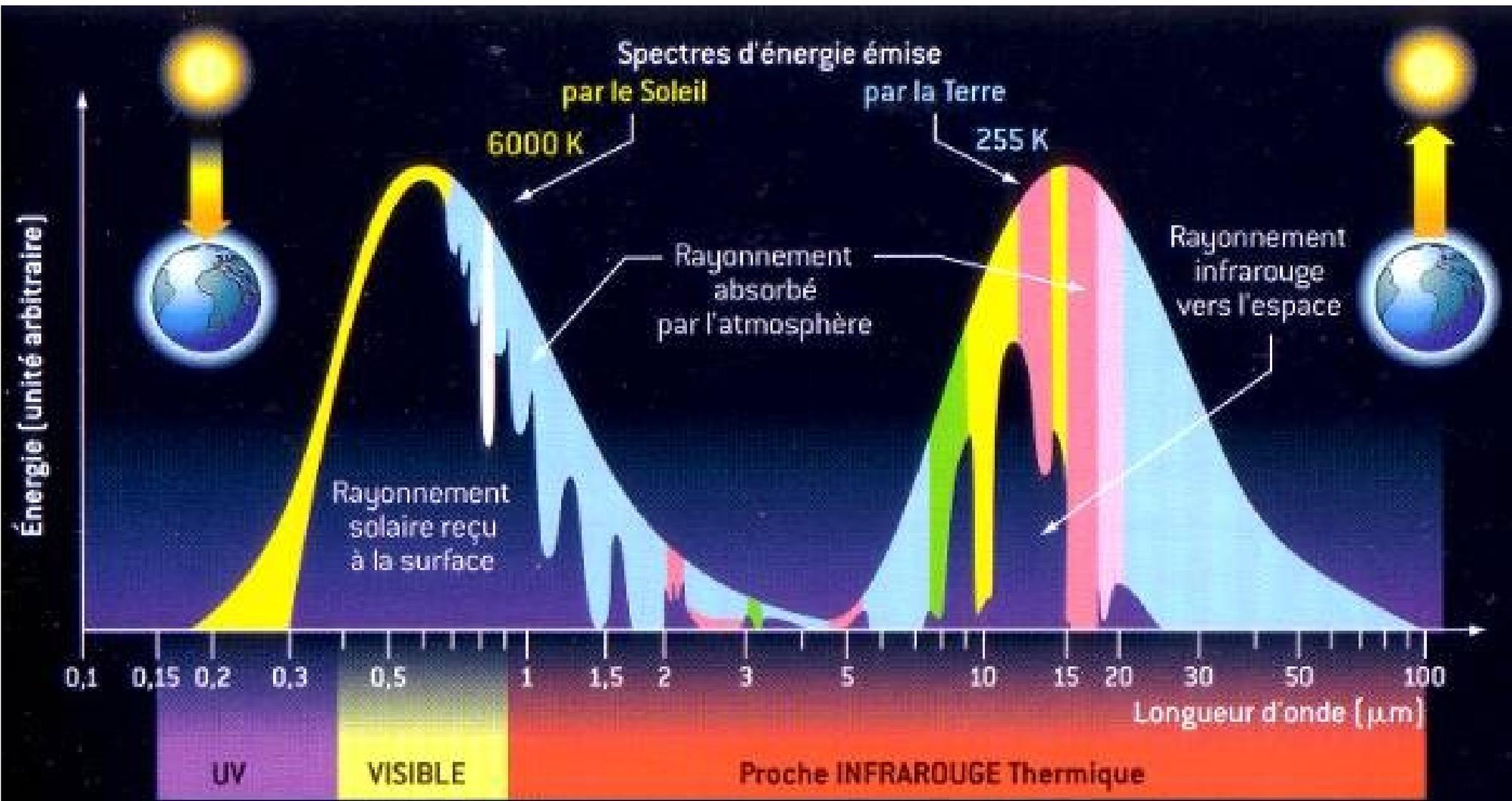
Les chiffres
sont les flux,
en $W.m^{-2}$

3) Le système se remet
à l'équilibre, avec une
atmosphère.



**Comparez
1) et 3)**

A schematic of energy fluxes on a planet (a) with no atmosphere, (b) the instant after a one-layer atmosphere is added to the planet, and (c) after the climate reaches its new equilibrium. *Livre de Dessler, p83*



Spectres d'énergie émise

Vapeur d'eau

Gaz carbonique

Ozone

Méthane

Oxygène

Protoxyde d'azote

Concentration de CO₂ : 423 ppm

