Rapide présentation des notions de base sur le rayonnement thermique.

6 Juin 2012

Intervenante : Catherine Freydier, ENM/EGM

catherine.freydier@meteo.fr

Plan de l'intervention :

- ✓ Les différents modes de transfert d'énergie dans l'atmosphère
- ✓ Le rayonnement thermique … onde ou flux de corpuscules ?
- ✓ Le modèle du corps noir
- ✓ Les corps naturels
- ✓ Le rayonnement solaire et ses interactions avec le système Terre/atmosphère
- ✓ Le rayonnement terrestre et atmosphérique
- ✓ L'effet de serre
- ✓ Bilans radiatifs

Les différents modes de transfert d'énergie dans l'atmosphère

La conduction :
Il s'agit du transfert de la chaleur d'un endroit à l'autre d'un milieu, sous l'influence d'un gradient de température, sans mouvements macroscopiques.

Peu efficace dans l'atmosphère, sauf au voisinage immédiat de la surface terrestre.

L'agitation thermique des atomes situés à l'extrémité chauffée de la barre augmente et se transmet de proche en proche dans la direction inverse du gradient thermique.

Les différents modes de transfert d'énergie dans l'atmosphère

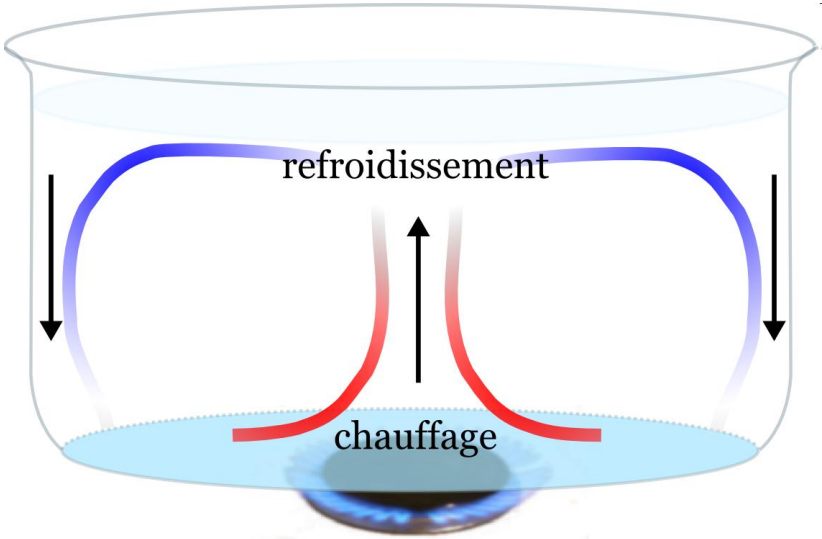
La convection :

La convection implique le transport de la chaleur par une partie d'un fluide qui se mélange avec une autre partie.

La convection concerne exclusivement les fluides (gaz ou liquides) puisqu'elle prend sa source dans un transport macroscopique de matière.

La convection tente de s'opposer au gradient thermique par un mouvement de fluide.

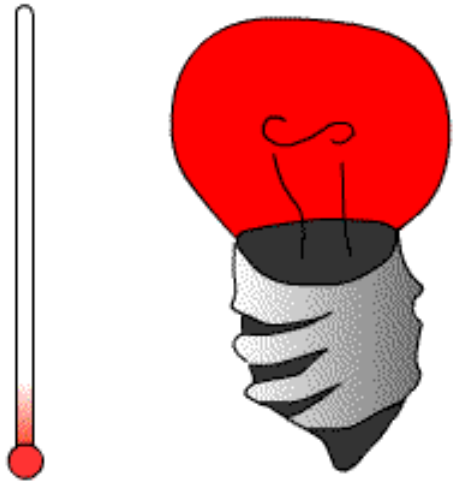
Très important dans l'atmosphère



http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Convection_casserole.png

Le rayonnement :

Un corps qui n'est pas au zéro absolu émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit "thermique" est qu'il peut se propager dans le vide.



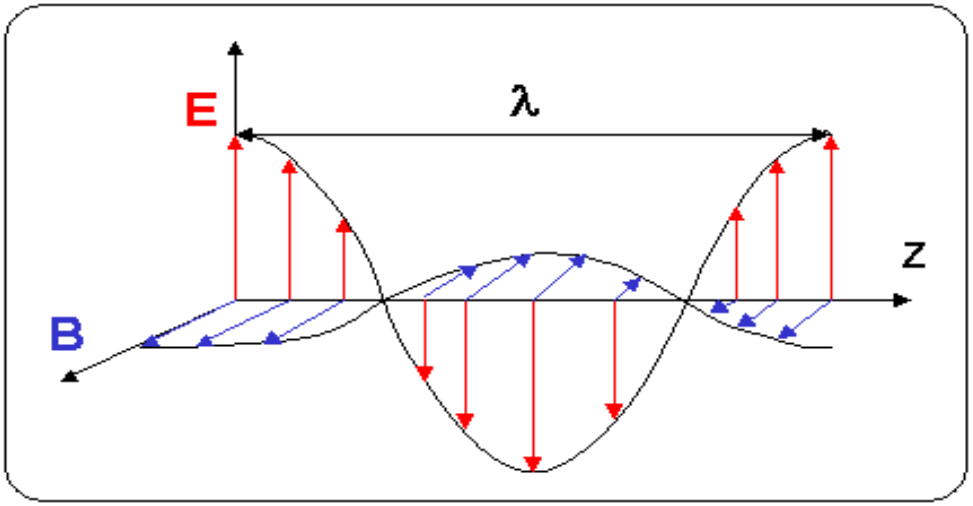
Le filament de tungstène utilisé dans les lampes à incandescence a une couleur caractéristique de sa température. A faible température, il est rouge-orangé, puis jaune puis blanc.

http://gershwin.ens.fr/vdaniel/Enseignement/Cours-Rayonnement/partie1/partie1_1.html#partie1-1

Le rayonnement thermique … onde ou flux de corpuscules ?

On peut décrire le rayonnement comme un processus de nature ondulatoire qui permet un transfert d'énergie sans aucun support matériel.

Il consiste en un **ensemble d'ondes électro-magnétiques** qui se propagent dans le vide, et à des degrés divers dans la matière, cette dernière modifiant parfois notablement leurs caractéristiques.



E = champ électrique oscillant

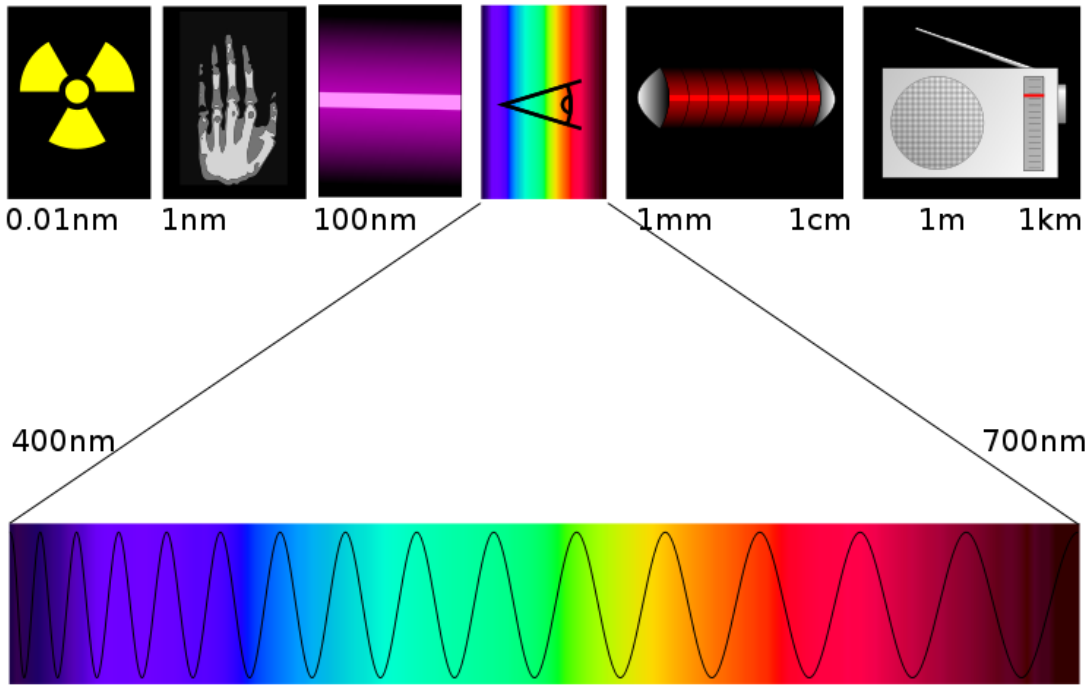
B = champ magnétique oscillant

λ = longueur d'onde

Source image : http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/

Les domaines spectraux

On distingue habituellement, dans toute le spectre des longueurs d'onde, de grands domaines, définis ci-après :



Source image : http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_électromagnétique

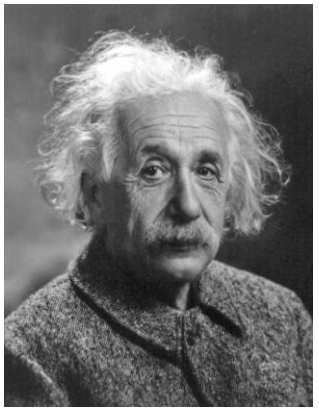
Le rayonnement thermique … onde ou flux de corpuscules ?

La lumière, on vient de le voir, est un ensemble d'ondes électromagnétiques, chacune de ces ondes pouvant être caractérisée par sa longueur d'onde et sa période.

Mais on peut aussi décrire la lumière comme un flux de particules étonnantes, immatérielles et sans masse, **les photons.**

James Maxwell (1831, 1879)

Max Planck (1858,1947)



Albert Einstein (1879,1955)

Chaque photon d'un rayonnement (lumière visible, ondes radios, rayons X...) est porteur d'un quantum d'énergie caractéristique de sa fréquence
(fréquence de la lumière visible = couleur).

La formule donnant le quantum d'énergie d'un photon est :

$$\Delta W = h\nu$$

où h = 6,63.10-34 J.s (constante de Planck) et ν est la fréquence du rayonnement.

Le modèle du corps noir

Définition d'un corps noir

Un corps noir est un corps idéal qui **absorbe l'intégralité du rayonnement qu'il reçoit**, l'absorption désignant ce processus physique par lequel l'énergie radiative est convertie en énergie interne par le système qui absorbe le rayonnement.

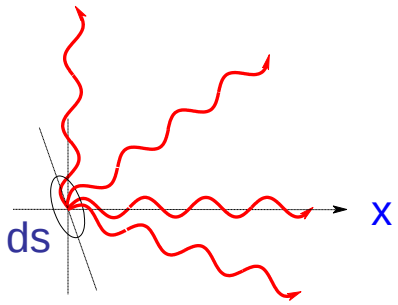
En pratique, un tel objet matériel n'existe pas, mais il représente un cas **idéalisé** servant de référence pour les physiciens.

Le rayonnement du corps noir présente des propriétés remarquables, que nous allons examiner.

Le modèle du corps noir

La loi de Stefan-Boltzmann

- ✓ Tout corps noir émet un rayonnement électromagnétique.
- ✓ La puissance de ce rayonnement émis est fonction de la température du corps, elle est d'autant plus grande que la température du corps est élevée.



$$M(T) = \sigma T^4$$

➢ M(T) : exitance, c'est-à-dire puissance émise par le corps noir, par unité de surface, dans toutes les directions du demi-espace ; unité : le W m^{-2}

➢ T : température du corps noir, en K

➢ σ : constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5{,}67.10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$

Le modèle du corps noir

Le corps noir émet un rayonnement dans toute une gamme (un spectre) de longueurs d'onde.

La loi de Stefan-Boltzmann nous permet de calculer la puissance rayonnée par le corps noir, toutes longueurs d'onde confondues.

On peut aussi s'intéresser à la puissance émise par le corps noir, par unité de surface, et **par bande élémentaire de longueur d'onde**.

Par exemple, en considérant que ma table est un corps noir, que vaut son émission **autour de 10 nm** ???

La fonction de Planck

Soit λ une longueur d'onde, et dλ une bande élémentaire (très étroite) de longueurs d'onde autour de λ.
La puissance émise par le corps noir, par unité de surface et pour cette bande élémentaire de longueurs d'onde, est donnée par la fonction de Planck :

$$\frac{dM(\lambda,T)}{d\lambda}=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left(e^{hc/\lambda kT}-1\right)}=T^5\ f(\lambda T)$$

avec f fonction de Planck définie par $f(x)=\frac{2\pi hc^2\ x^{-5}}{e^{hc/kx}-1}$

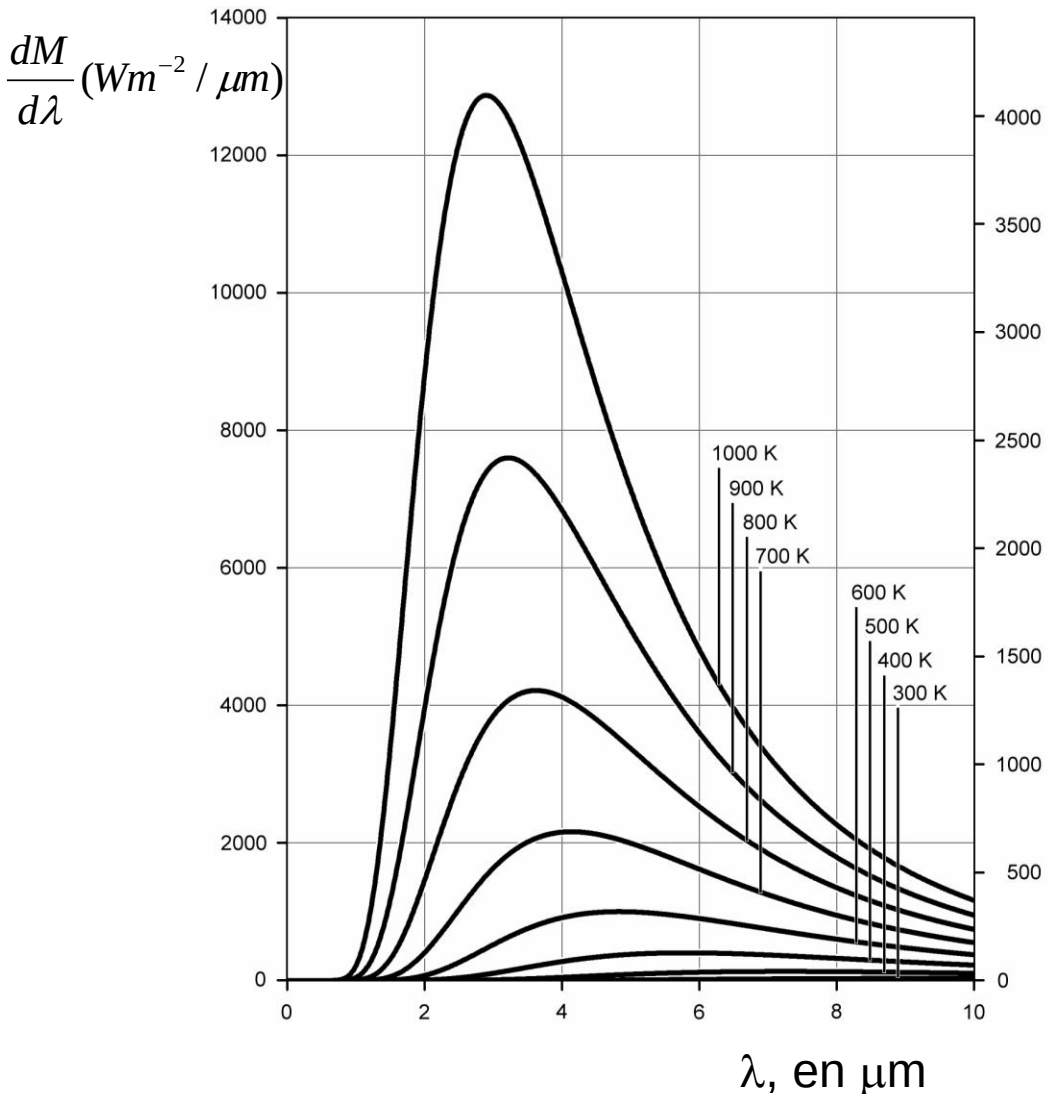
$h = \text{C}^{\text{ste}}\ \text{de Planck} = 6{,}62.10^{-34}\ J\ s$

$k = \text{C}^{\text{ste}}\ \text{de Boltzmann} = 1{,}38.10^{-23}\ J\ K^{-1}$

$c = \text{vitesse de la lumière dans le vide} = 2{,}9979.10^{8}\ m\ s^{-1}$

INP TOULOUSE ENM METEO FRANCE

La fonction de Planck



Source image : http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Planck

Soit un corps noir à une température donnée T.

✓ Son domaine d'émission commence à une longueur d'onde

$$\lambda_0 = \frac{550.10^{-6}}{T}$$

✓ L'émission maximale a lieu pour une longueur d'onde

$$\lambda_m = \frac{2897{,}8.10^{-6}}{T}$$

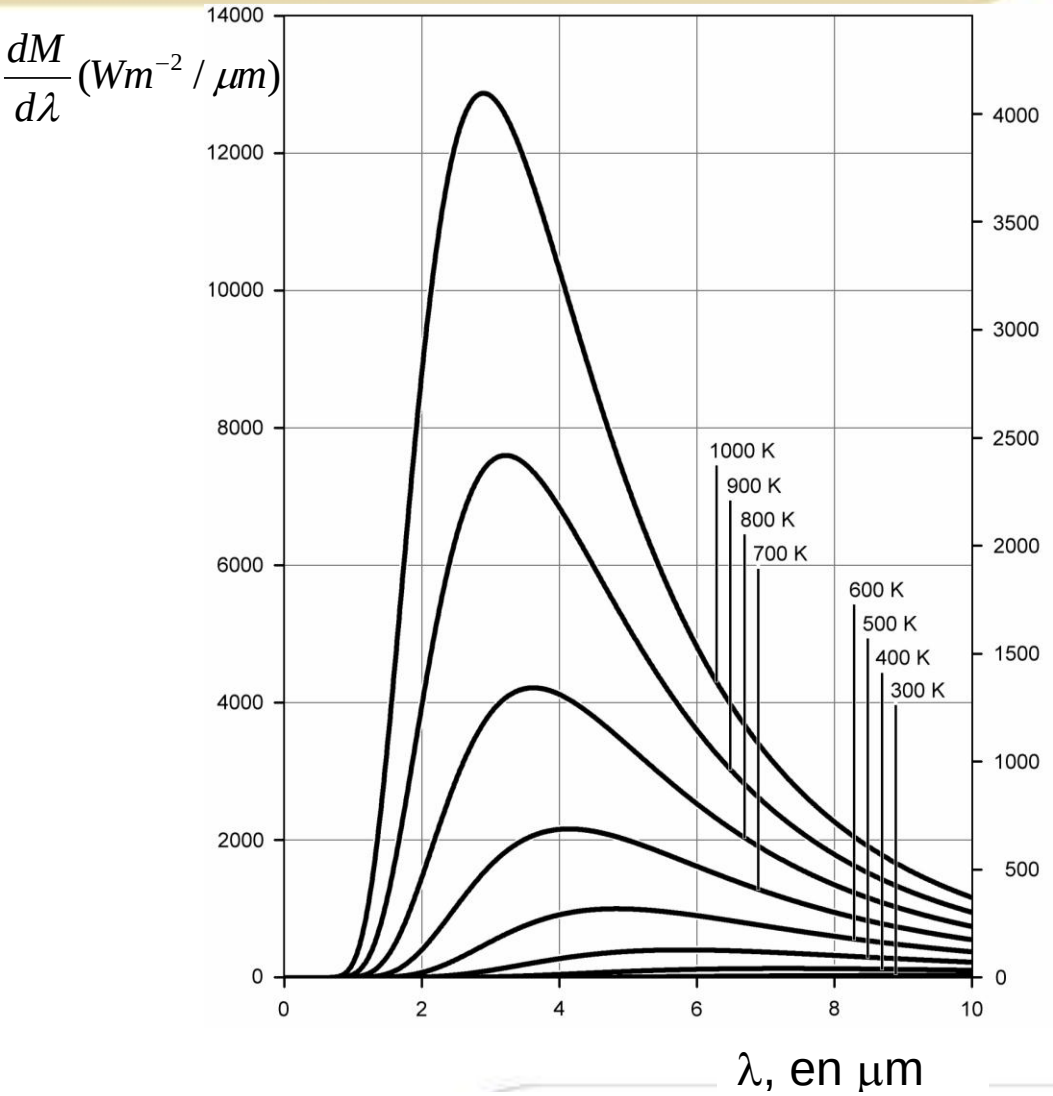
Loi de déplacement de Wien

On vient de voir qu'on peut déduire de l'étude mathématique de la fonction de Planck la longueur d'onde λ_m pour laquelle l'énergie émise par un corps noir à la température T est maximale.

Cette relation s'appelle la loi de déplacement de Wien.

$$\lambda_m . T = 2898.10^{-6}\, m\, K$$

Longueur d'onde de l'onde *la plus émise* pour un corps noir à la température T.

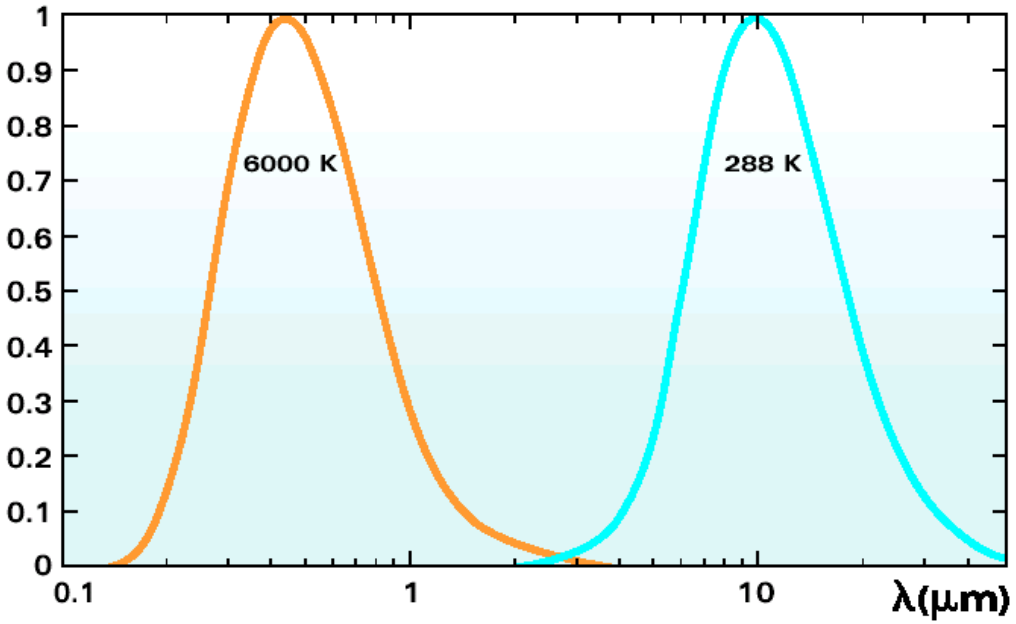


Source image : http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Planck

Spectres d'émission du soleil et de la Terre… s'ils étaient des corps noirs.

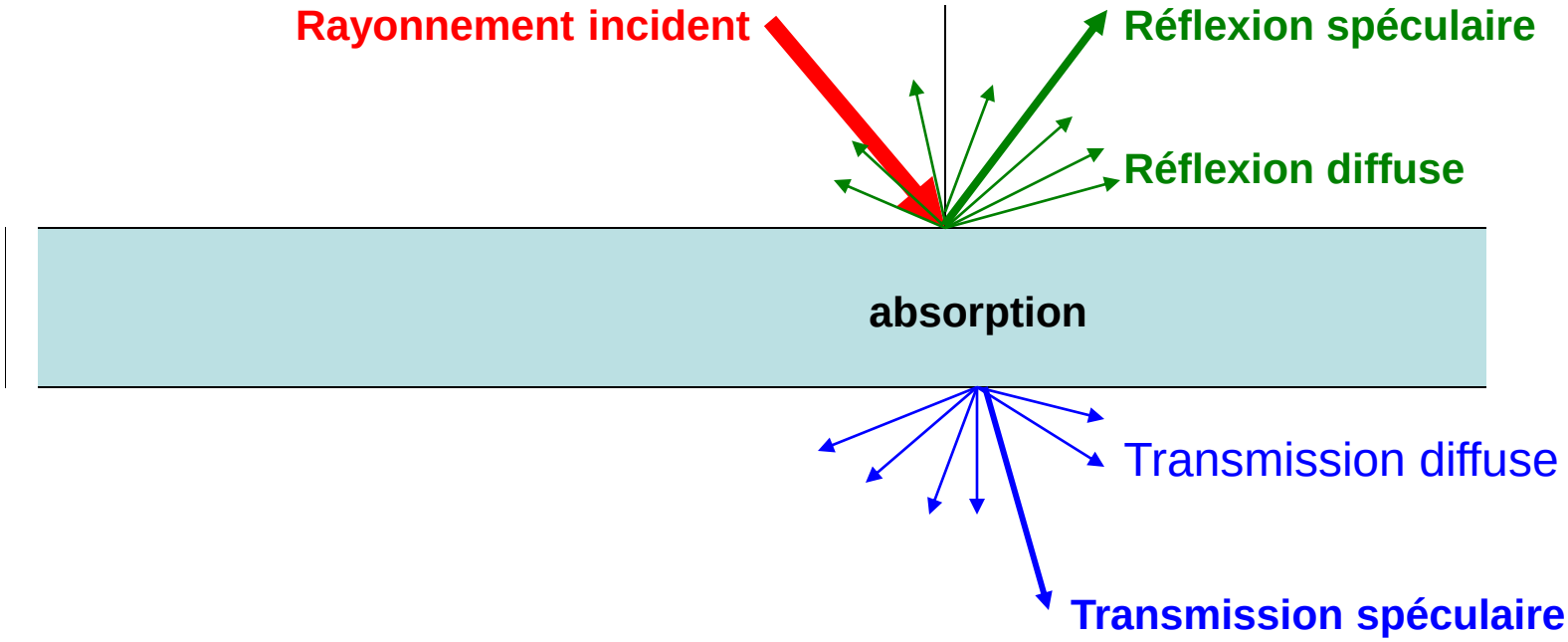
On remarque qu'il y a un très faible recouvrement entre le spectre du rayonnement solaire et celui du rayonnement tellurique.

Fonction de Planck en fonction de la longueur d'onde, normalisée par la valeur de l'émission maximale, **pour un corps noir émettant à 6000 K** et **un corps noir émettant à 288 K.**



[Malardel, 2005]

Les corps naturels : que font-ils quand ils reçoivent un rayonnement ?

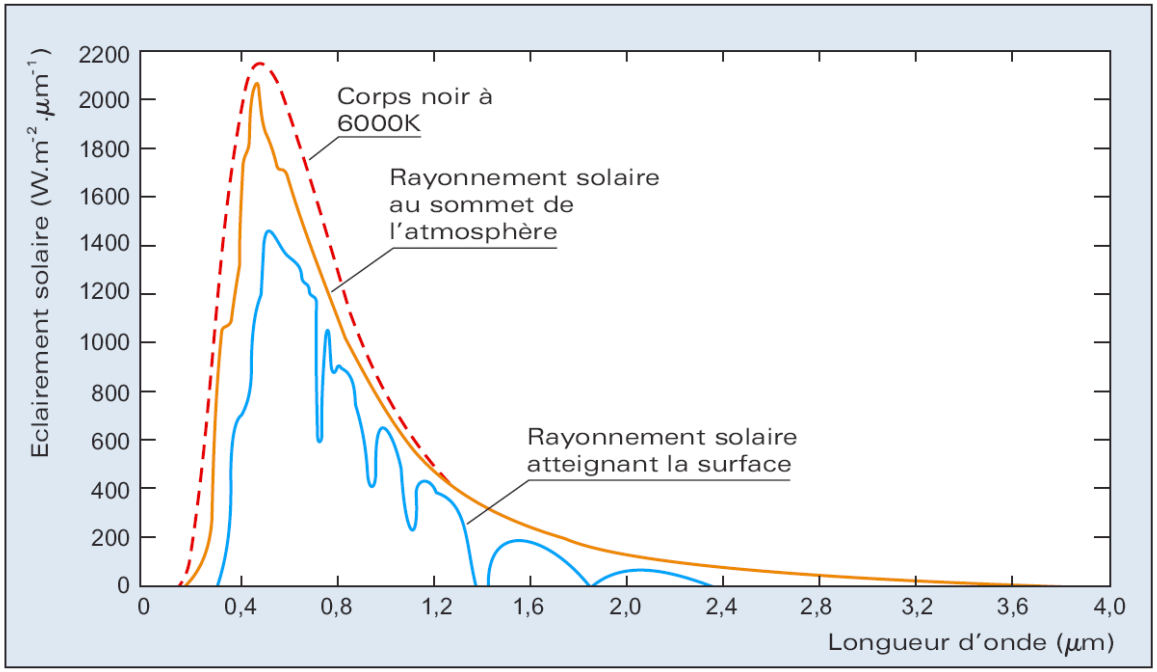


Flux incident = **absorption** + **réflexion** spéculaire et diffuse + **transmission** spéculaire et diffuse

Néanmoins un corps naturel pourra se comporter presque comme un corps noir **sur une plage de longueurs d'onde.**

Le rayonnement solaire

Répartition spectrale



[Malardel, 2005] – D'après Kidder and Vonder Haar, 1995

Au sommet de l'atmosphère, le rayonnement solaire est constitué de

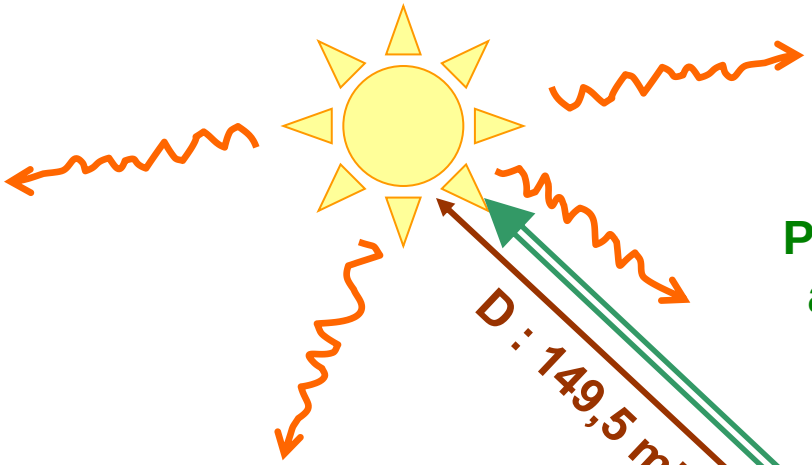
- ✓ rayonnement γ (λ <0,01 Å)
- ✓ rayonnement X (0,01 Å< λ< 100 Å)
- ✓ UV (100 Å< λ< 0,4 µm)

} 8%

- ✓visible (0,4 µm < λ< 0,7 µm) 41%
- ✓IR (0,7 µm< λ<500 µm) 51%

Maximum d'intensité dans la lumière visible bleue : λ= 0,48 µm

Le rayonnement solaire



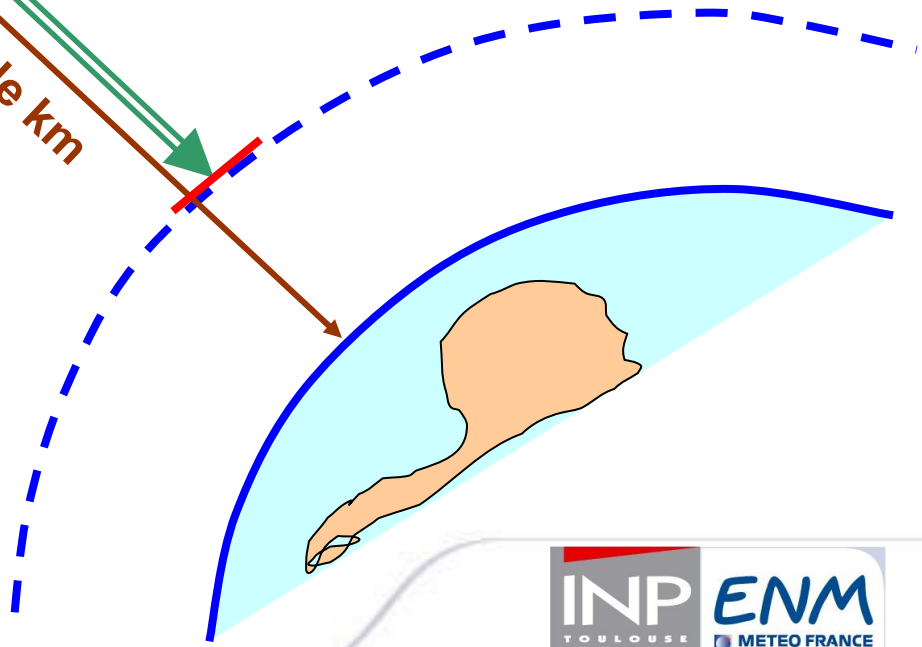
D : 149,5 millions de km

Constante solaire :

Puissance du rayonnement solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, par une surface de 1m² exposée perpendiculairement aux rayons incidents.

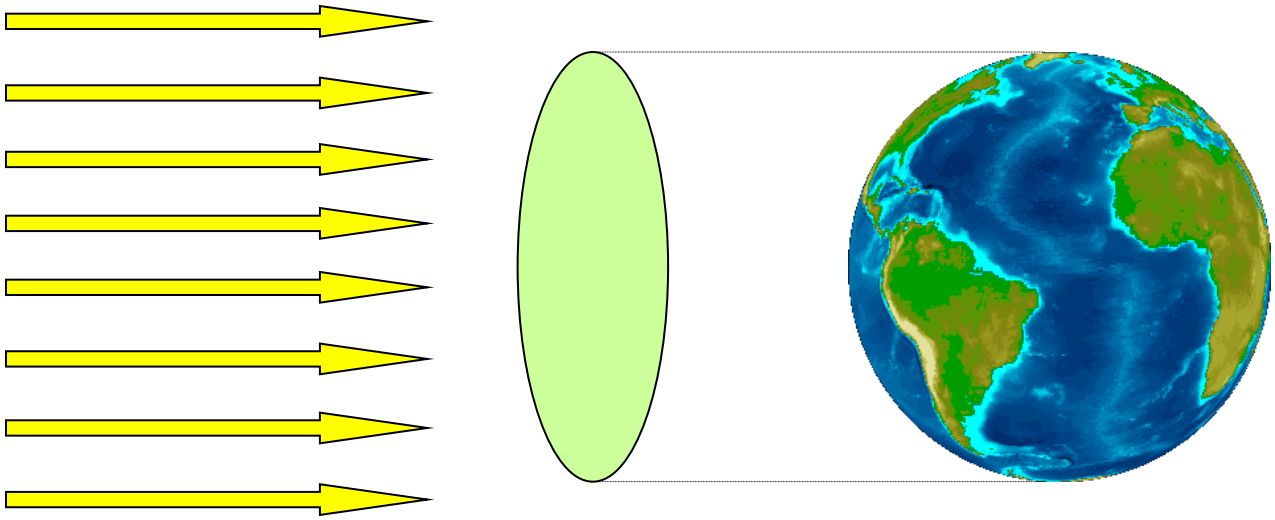
C_s = 1 370 W/m²

Variations ≈ 3%



Question :

Quelle est la puissance reçue du soleil, en moyenne, par une surface de 1 m^2 au sommet de l'atmosphère ?



$c_s = 1370$ W/m^2

Disque : surface πR_t^2

Sphère : surface $4\pi R_t^2$

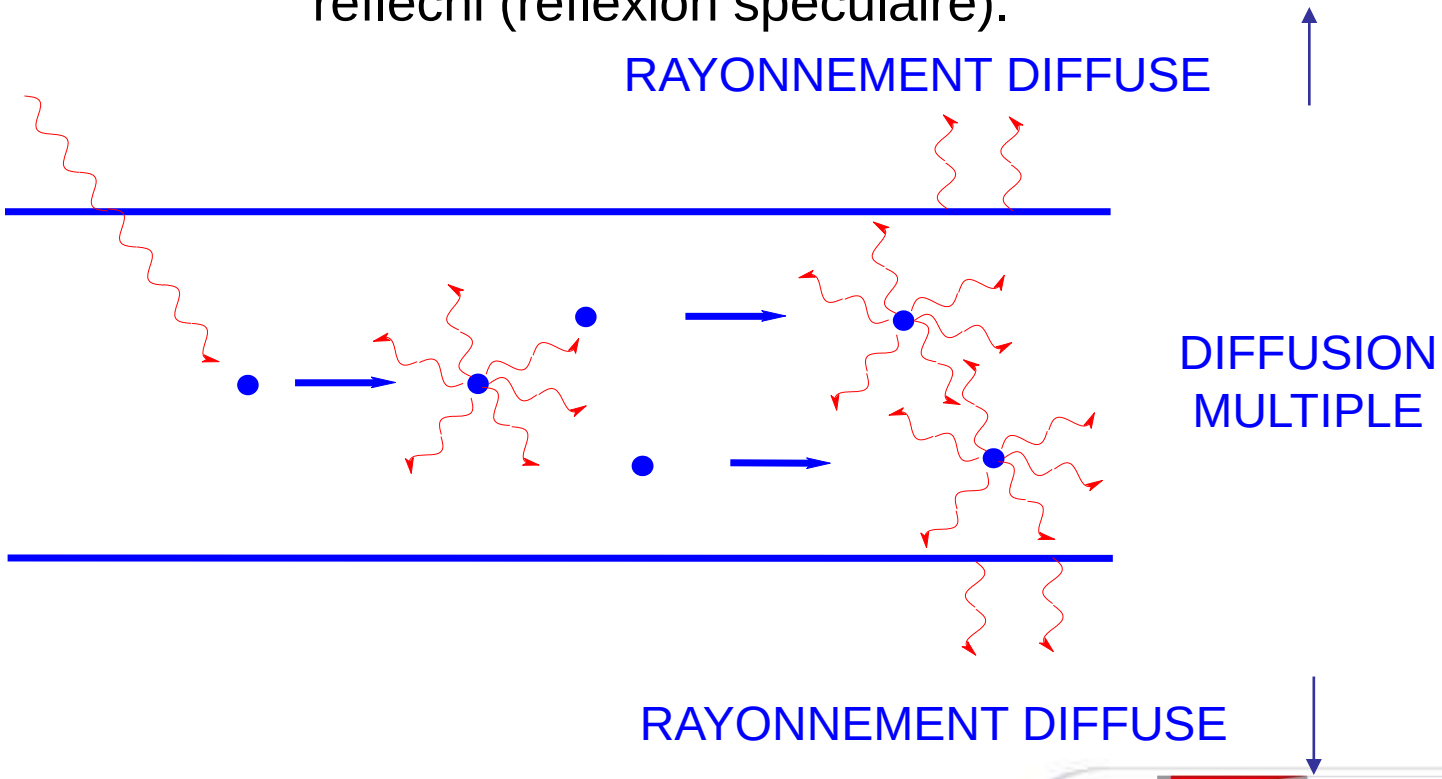
L'énergie reçue par le disque est distribuée sur la sphère.

$$\bar{c} = \frac{c_s}{4} \approx 350\ W/m^2$$

Interaction entre le rayonnement solaire incident et le système Terre-atmosphère.

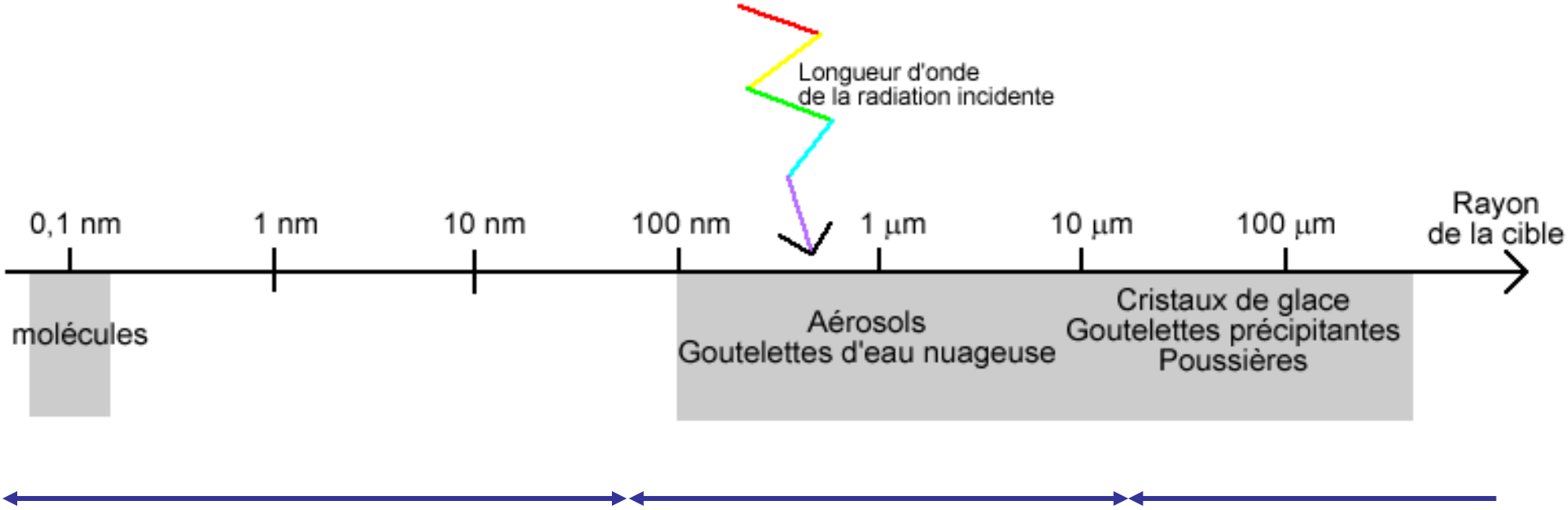
Le rayonnement solaire incident va interagir avec les molécules de gaz atmosphérique, les aérosols, les nuages, la surface terrestre.

Ce rayonnement va être absorbé, diffusé (réflexion et transmission diffuse) et réfléchi (réflexion spéculaire).



La diffusion

On distingue plusieurs types de diffusion selon la taille des particules diffusantes :



Diffusion Rayleigh

Diffusion de Mie

Optique géométrique

L’absorption par les gaz atmosphériques

Les gaz atmosphériques sont loin d’être des corps noirs : leurs capacités d’absorption et d’émission dépendent fortement de la longueur d’onde.

Les différents constituants atmosphériques sont ainsi plus ou moins transparents aux rayonnements électromagnétiques en fonction de leur longueur d’onde.

Un intervalle de longueur d’onde pour lequel un gaz a une forte capacité d’absorption s’appelle une bande d’absorption.

Transmittance moyenne de l'atmosphère

La superposition des bandes d'absorption des différents constituants de l'air rend l'atmosphère assez opaque au rayonnement en général.

Il existe cependant plusieurs intervalles de longueurs d'onde, appelées fenêtres atmosphériques, pour lesquels l'atmosphère laisse passer une bonne partie du rayonnement.

Question

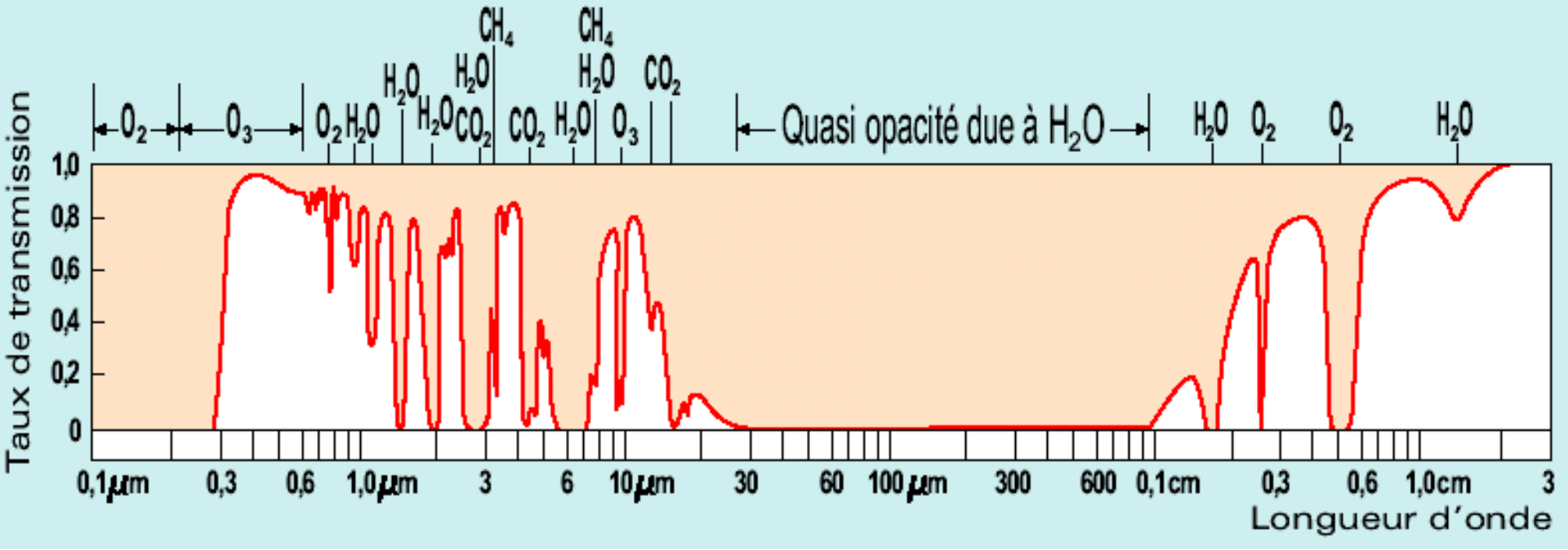
Pourquoi un gaz atmosphérique donné peut-il absorber certaines longueurs d'onde et pas d'autres ?

L'absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques est intimement liée à leurs caractéristiques énergétiques.

Une molécule possède des niveaux énergétiques discrets ou quantifiés associés à des états de rotation, de vibration ou de configuration électronique.

Un photon peut être absorbé lorsque son énergie correspond à une transition entre le niveau fondamental et un de ses états excités.

Transmittance moyenne de l'atmosphère



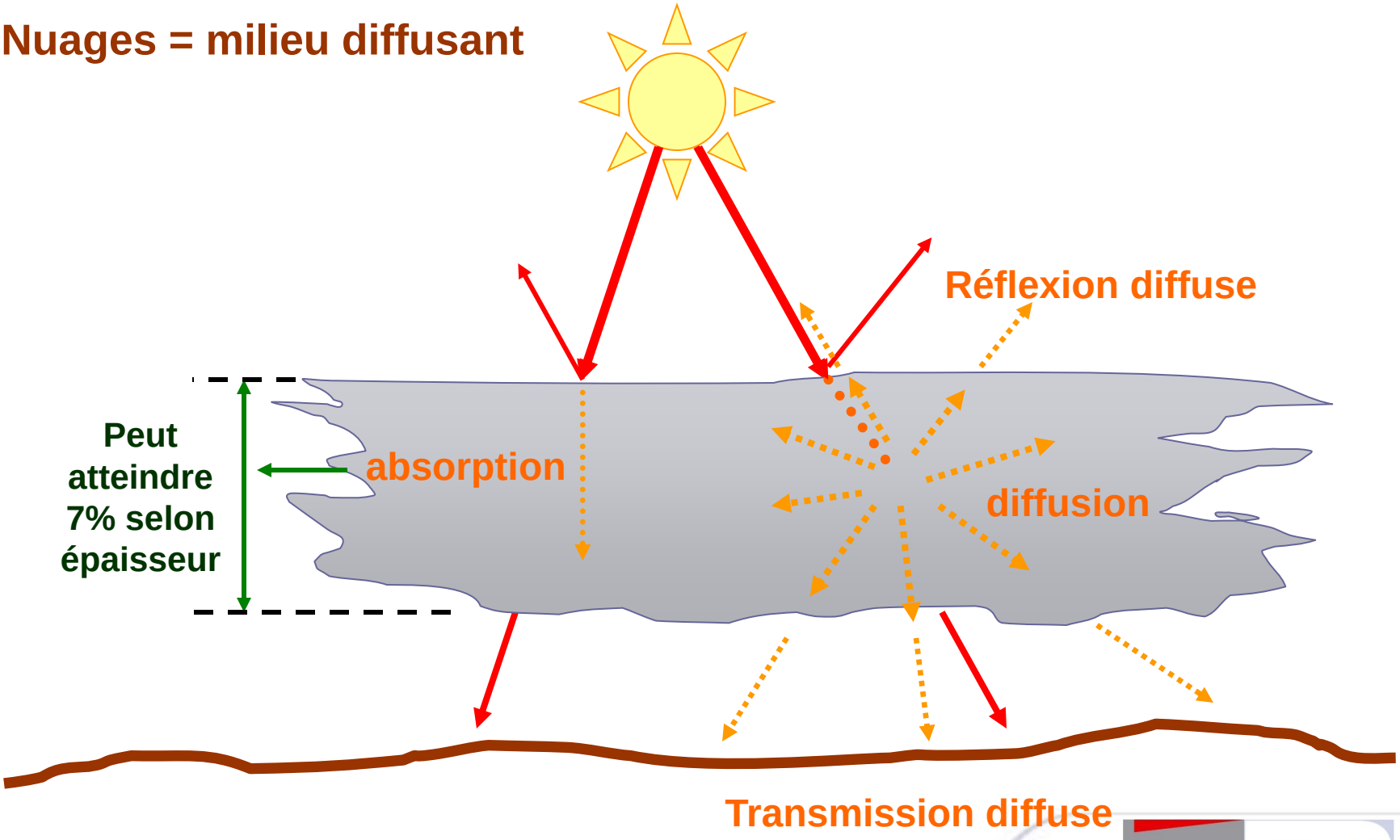
[Malardel, 2005] – D'après Kidder and Vonder Haar, 1995

L'atmosphère est presque complètement opaque dans l'ultraviolet, très transparente dans le domaine visible, mais pratiquement opaque dans une bonne partie de l'infrarouge sauf pour quelques fenêtres dans le proche infrarouge et dans la fenêtre 8,5-12,5µm.

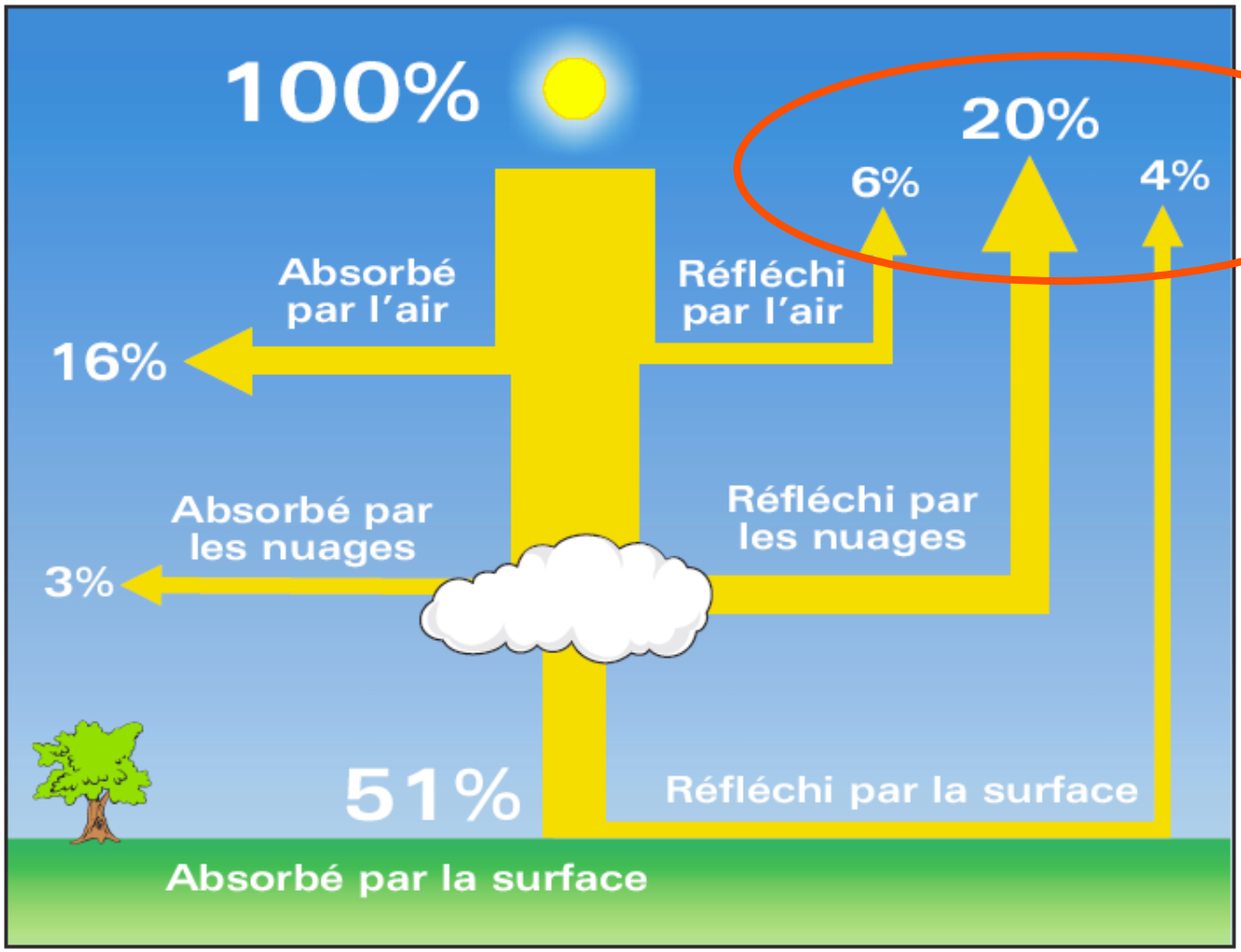
L'atmosphère est de nouveau assez transparente dans une bonne partie du domaine micro-ondes.

Interaction des nuages avec le rayonnement solaire

Nuages = milieu diffusant



Bilan radiatif dans le domaine des longueurs d'onde **solaires.**



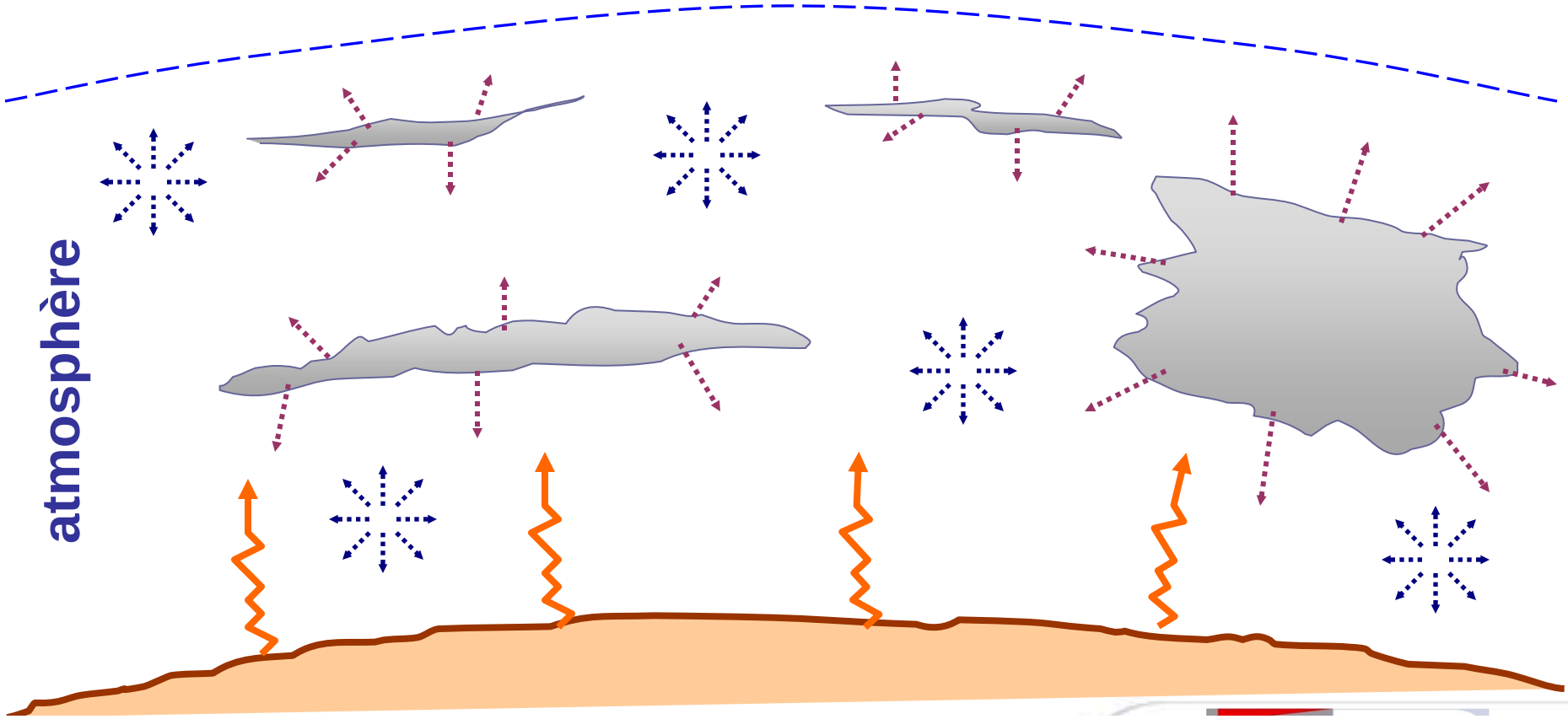
Valeur moyenne de **l'albédo** du système terre-atmosphère : **30%**

Albédo= rapport de l'énergie réfléchie par diffusion à l'énergie incidente.

[Malardel, 2005]

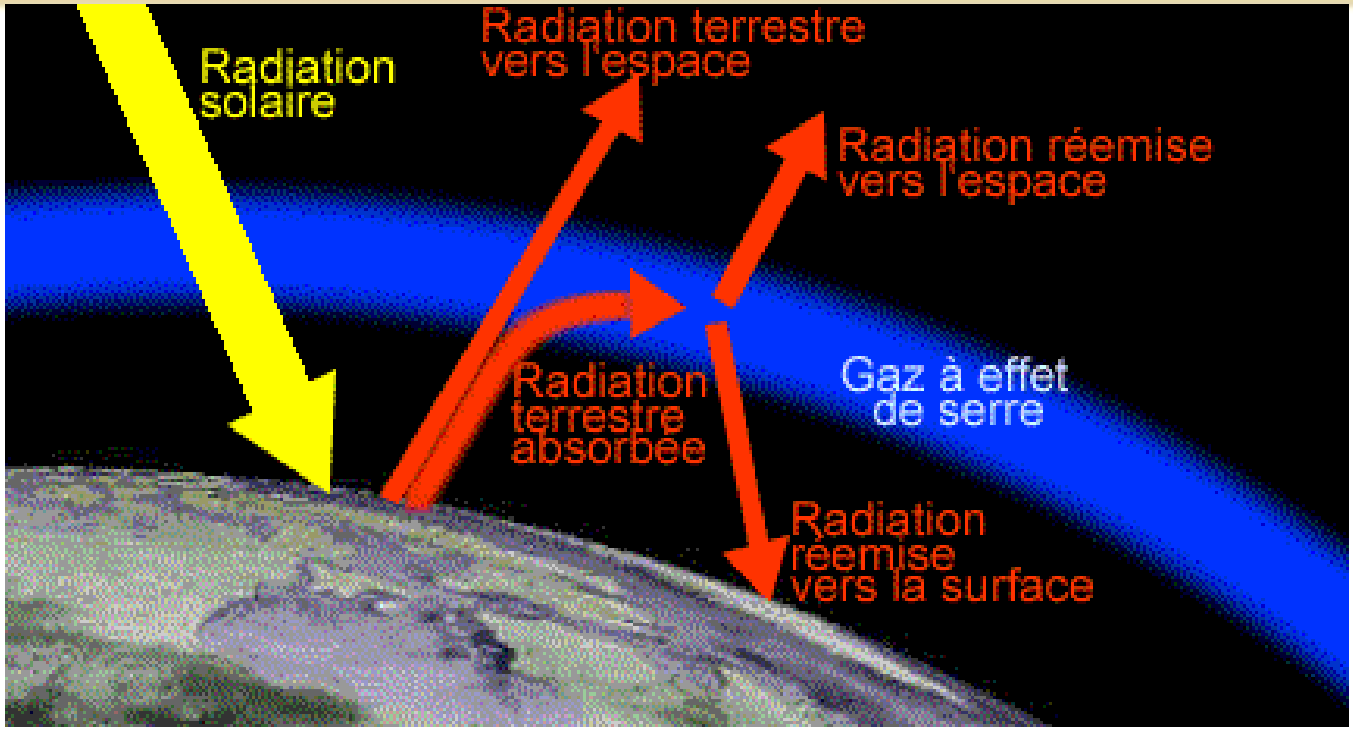
Le rayonnement atmosphérique et terrestre

La surface terrestre, les gaz atmosphériques, les aérosols et les nuages émettent du rayonnement électromagnétique dans la gamme infrarouge (entre 4 et 100 μm, **maximum vers 12 μm**).



Dans ce domaine de longueurs d'onde, la terre se comporte presque comme un corps noir.

L'absorption par les gaz à effet de serre rend l'atmosphère très opaque à une bonne partie du rayonnement infra-rouge.

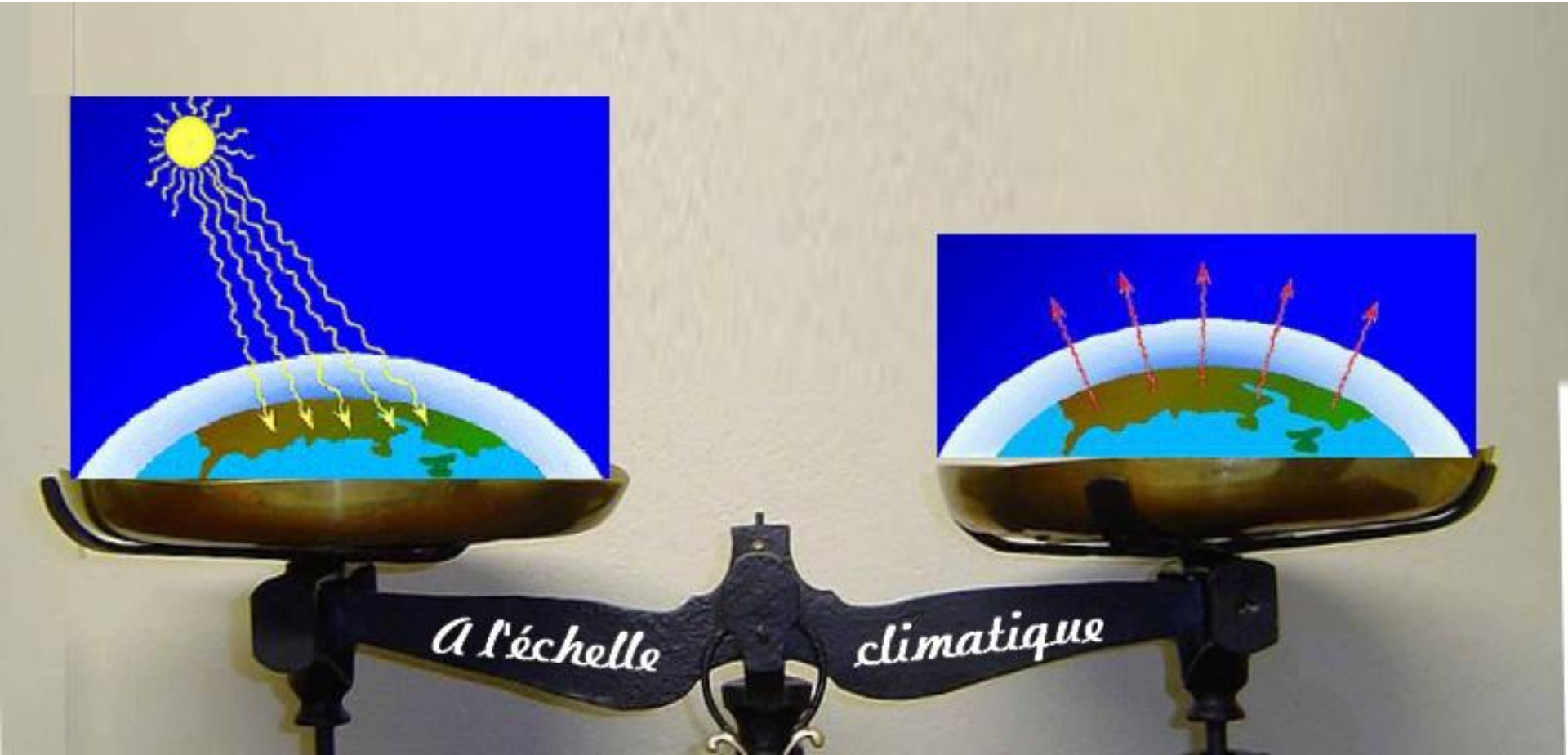


http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-bilan-radiatif-terre2.xml

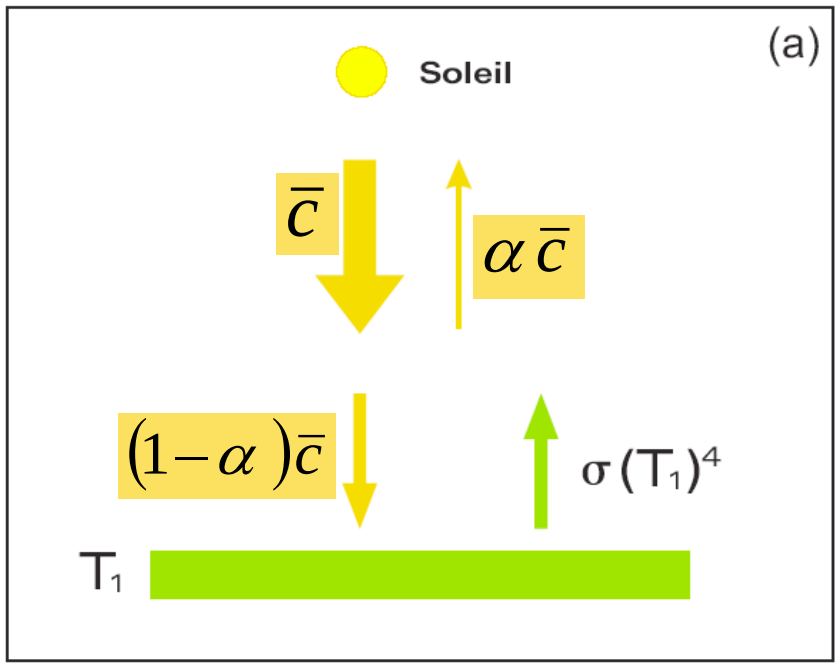
Les rayons solaires pénètrent facilement dans l' atmosphère pour chauffer la terre mais l'émission du système terre/atmosphère vers l'espace est en grande partie piégée dans l'atmosphère. Ce piégeage correspond à un gain de plus de 30°C par rapport à la température théorique d'équilibre du système qui serait de –18°C sans cet « effet de serre ».

L’effet de serre

Estimation de la température moyenne d’équilibre de la surface terrestre



Effet de serre 0 : pas d'atmosphère



Chaque unité de surface terrestre reçoit en moyenne une énergie

$$\bar{c} = \frac{c_s}{4} \approx 350\ W/m^2$$

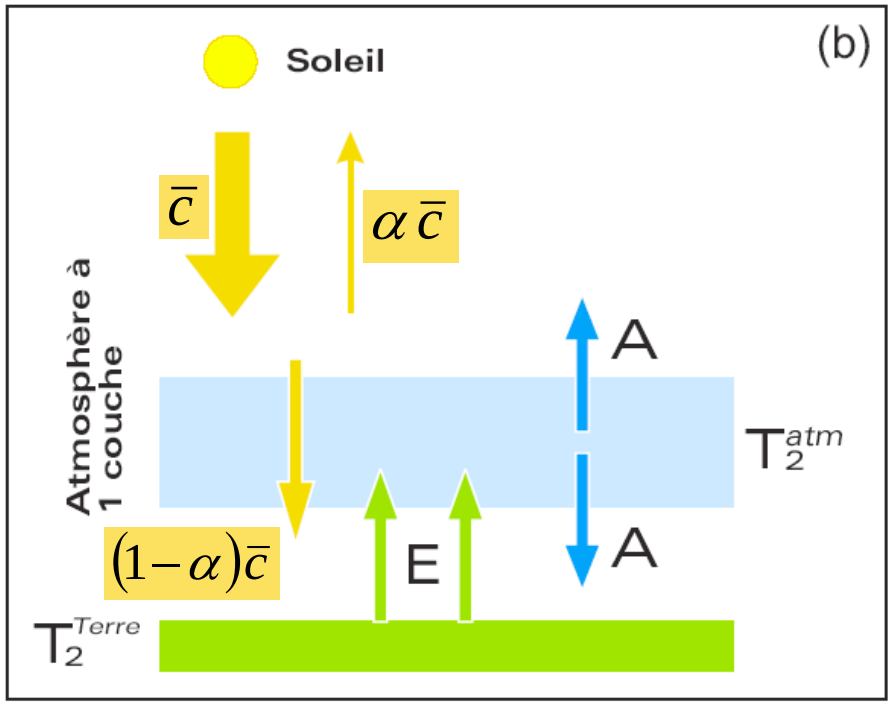
[Malardel, 2005]

Si α est l'albédo moyen du système, le bilan équilibré du système sans atmosphère s'écrit alors

$$(1-\alpha)\bar{c} = \sigma T_1^4$$

Avec un albédo moyen de 0,3 la température d'équilibre est T_1=255K (-18°C)

Effet de serre 1 : atmosphère « à une couche »



[Malardel, 2005]

Dans ce modèle très simple, on suppose que l'atmosphère est :

- transparente dans le visible
- comme un corps noir pour le rayonnement infra-rouge

$$E=\sigma\left(T_2^{Terre}\right)^4 \;;\; A=\sigma\left(T_2^{atm}\right)^4$$

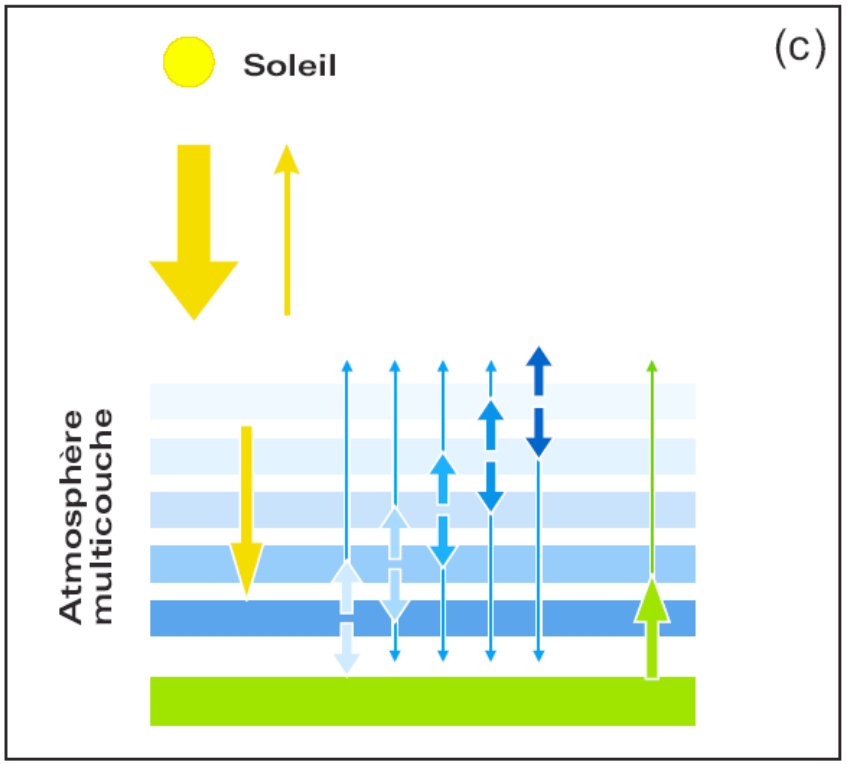
Équilibre radiatif :

$$\begin{cases} (1-\alpha)\bar{c}+A=E & \text{pour la Terre} \\ E=2A & \text{pour la couche d'atmosphère} \end{cases}$$

Gains **Pertes**

On obtient alors $T_2^{Terre}=303\,K\,;\; T_2^{atm}=255\,K$

Atmosphère multicouche



[Malardel, 2005]

On peut obtenir une atmosphère plus réaliste avec un modèle multicouche et en raffinant le comportement de chaque couche dans l'infrarouge.

Avec une émissivité différente de 1, chaque couche reçoit alors du rayonnement des autres couches et transmet une partie du rayonnement incident.

On obtient alors une température terrestre proche de 288K et on reproduit une décroissance des températures des couches avec l'altitude.

L'augmentation anthropique de l'effet de serre.

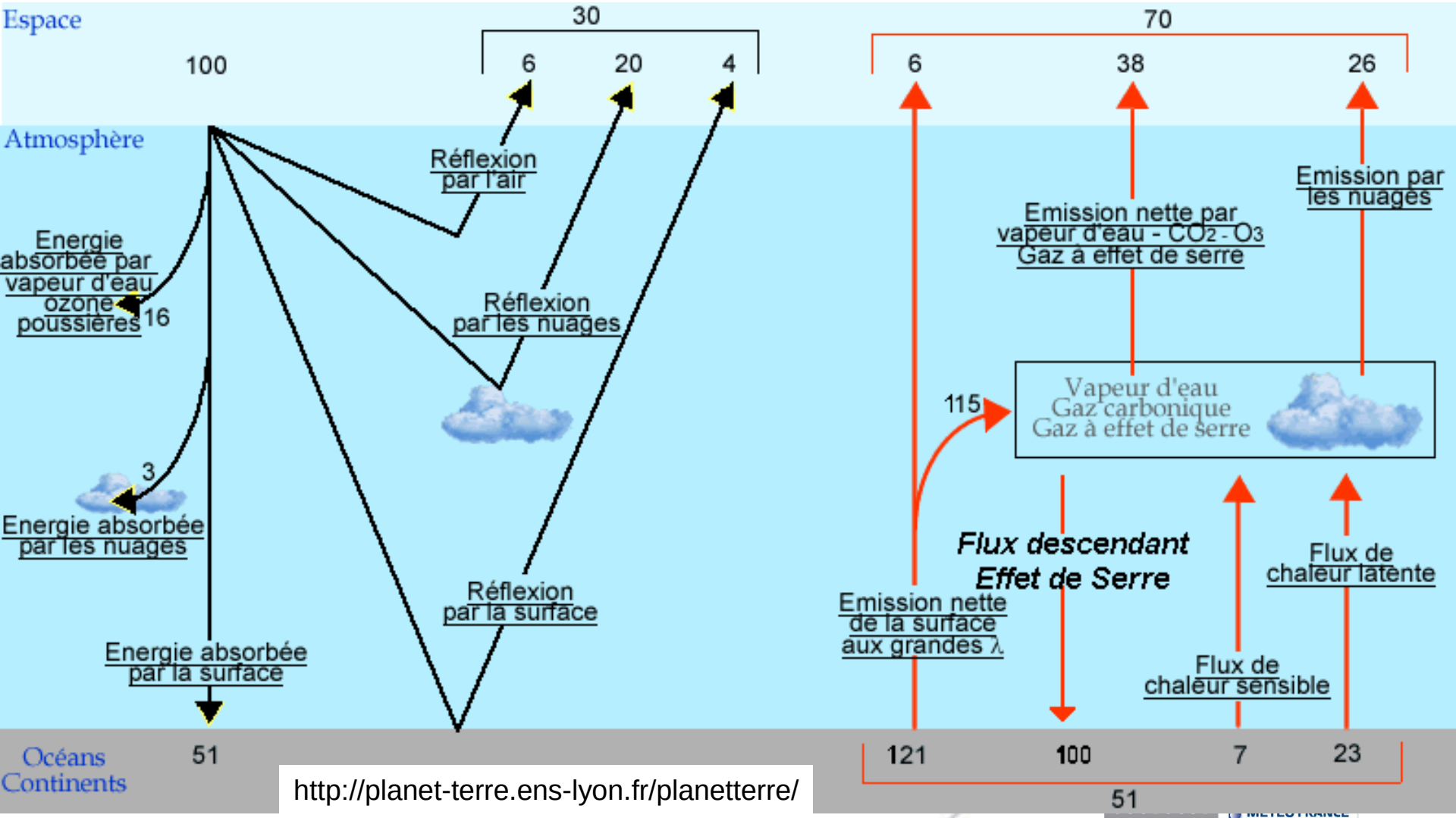
- En 1896, le chimiste suédois ***Svante Arrhenius*** attire l'attention sur le réchauffement lié aux rejets de CO2 dus à l'utilisation du charbon

« De l'influence de l'acide carbonique dans l'air… sur la température de la terre ».

Il estime qu'un doublement du taux de CO_2 causerait un réchauffement de ~5 °C (comparer aux 2 à 4,5 °C par le GIEC en 2007 !

Le bilan radiatif

Le bilan radiatif **moyen** sur la verticale



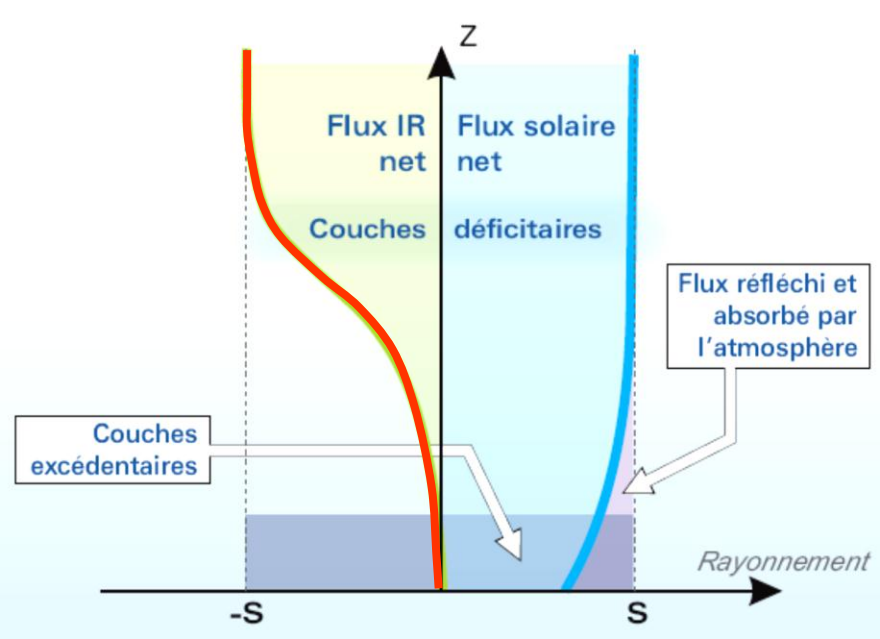
http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/

Le bilan radiatif moyen sur la verticale

Les flux sont comptés positivement vers le bas.

Courbe bleue : flux net de rayonnement solaire en fonction de l'altitude

Courbe rouge : flux radiatif net émis vers l'espace (négatif, car vers le haut)



[Malardel, 2005] – D'après [James, 1994]

✓ Le rayonnement solaire est transmis quasi intégralement vers le bas sans être absorbé dans la haute atmosphère; dans la basse atmosphère une partie est réfléchie ou absorbée.

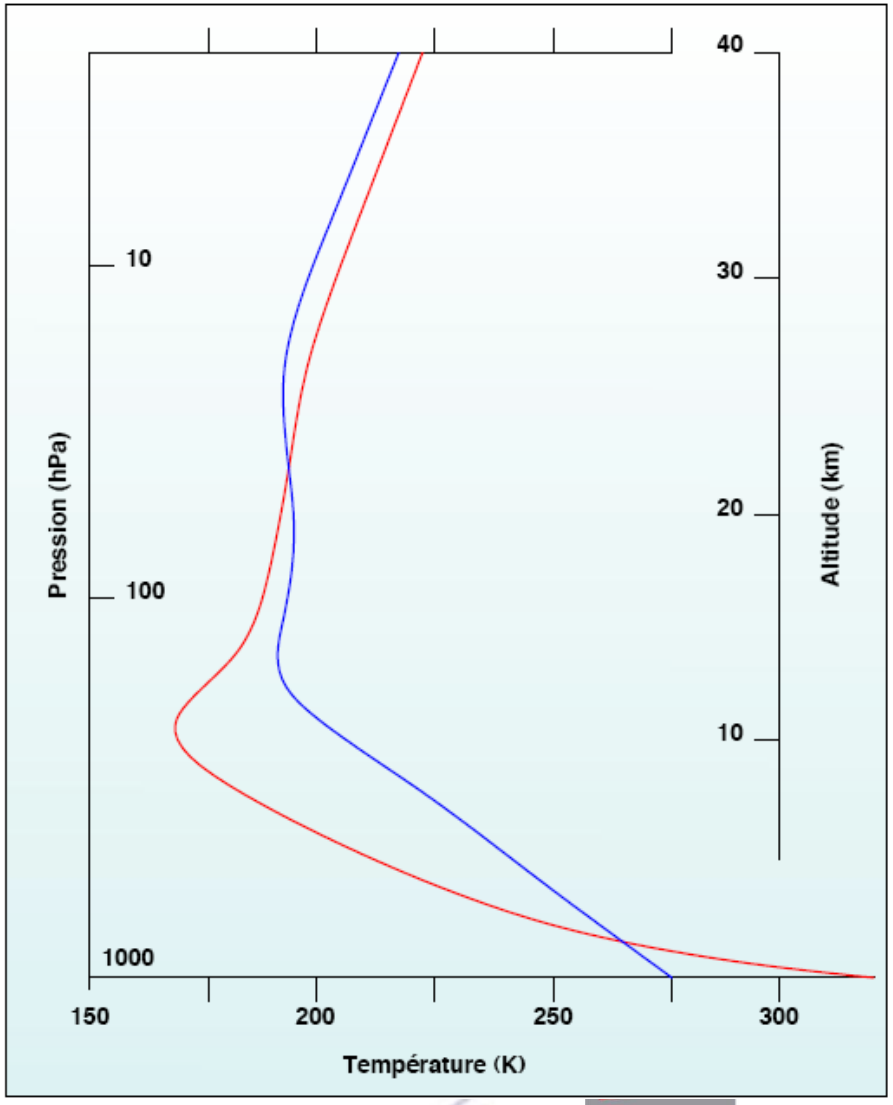
✓ Le flux IR net émis vers l'espace est proche de zéro dans les basses couches ; en altitude, l'atmosphère émet vers l'espace.

Bilan : l'atmosphère est chauffée par le bas, refroidie par le haut

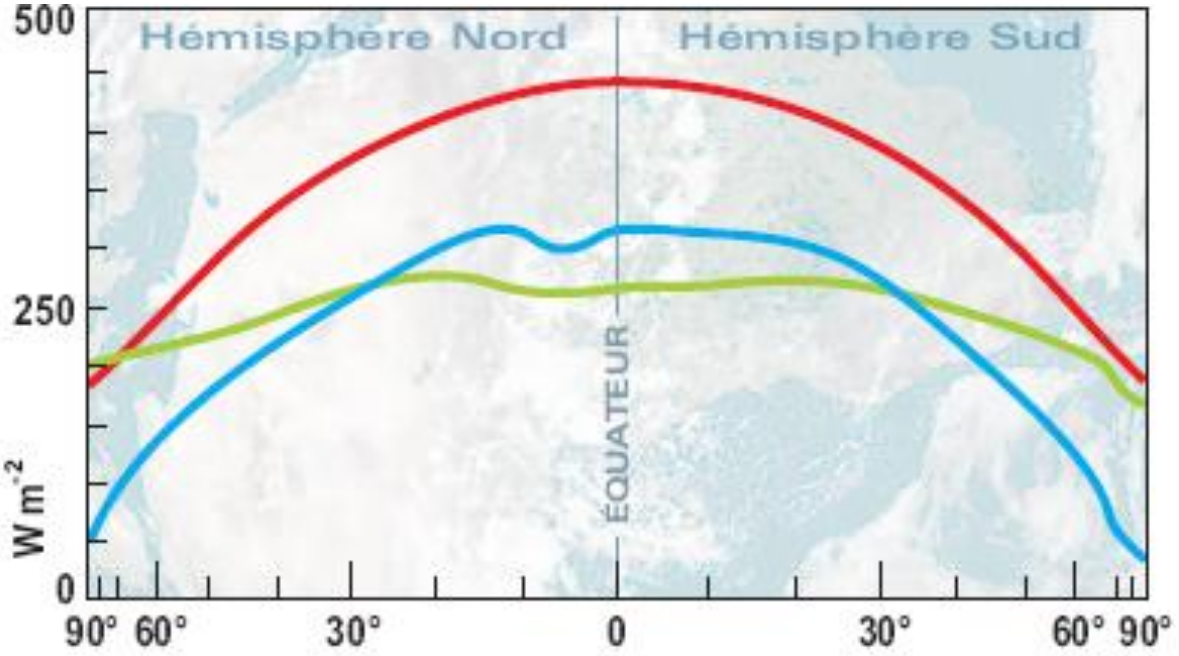
Le bilan radiatif moyen sur la verticale

L'équilibre thermique observé dans l'atmosphère (**courbe bleue**) est différent de celui qu'on aurait pour un équilibre purement radiatif (**courbe rouge**)

La décroissance plus faible dans la troposphère (6,5°/km) traduit l'influence des mouvements atmosphériques qui tendent à lisser les gradients verticaux (en particulier la convection).



BILAN RADIATIF EN MOYENNE ZONALE



[Malardel, 2005] – D'après [Gill, 1982]

Courbe rouge : rayonnement solaire moyen reçu au sommet de l'atmosphère par cercle de latitude.

Courbe bleue : partie du rayonnement solaire qui est absorbée.

Courbe verte : rayonnement IR moyen émis vers l'espace.

BILAN RADIATIF EN MOYENNE ZONALE

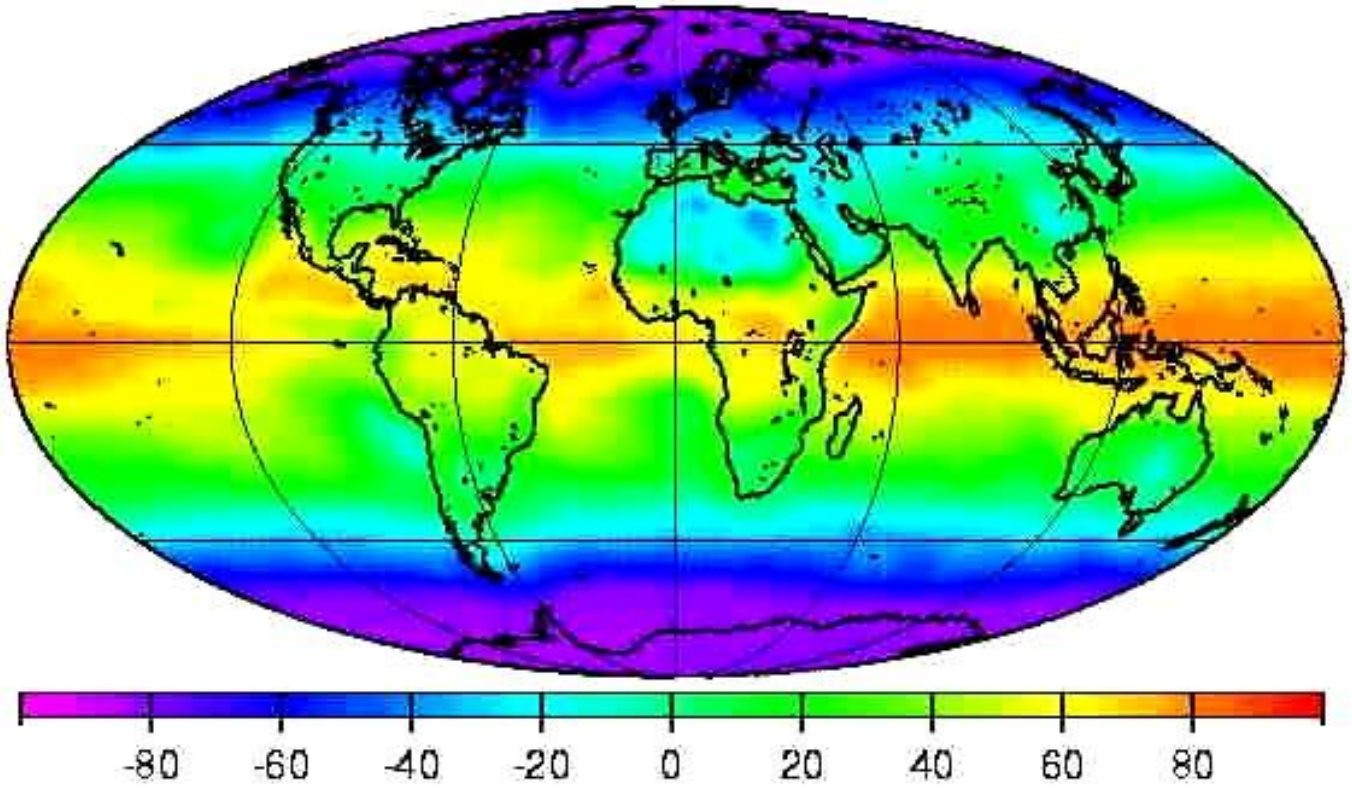
1. **Entre 30°N et 30°S le bilan radiatif du système Terre-atmosphère est excédentaire : environ 60 W.m^{-2}.**

   En dehors des tropiques le bilan radiatif du système Terre-atmosphère est déficitaire : environ -100 W.m^{-2} aux pôles.

   Ce fort déséquilibre radiatif méridien entre l'équateur et les pôles génère :

- **une circulation atmosphérique entre 30°N/30°S appelée « cellules de Hadley » et deux Jets d'Ouest Subtropicaux (JOST) ;**
- **circulations océaniques d'échelle planétaire dirigées vers les pôles (Gulf Stream, Kuroshio etc..).**

Bilan net annuel

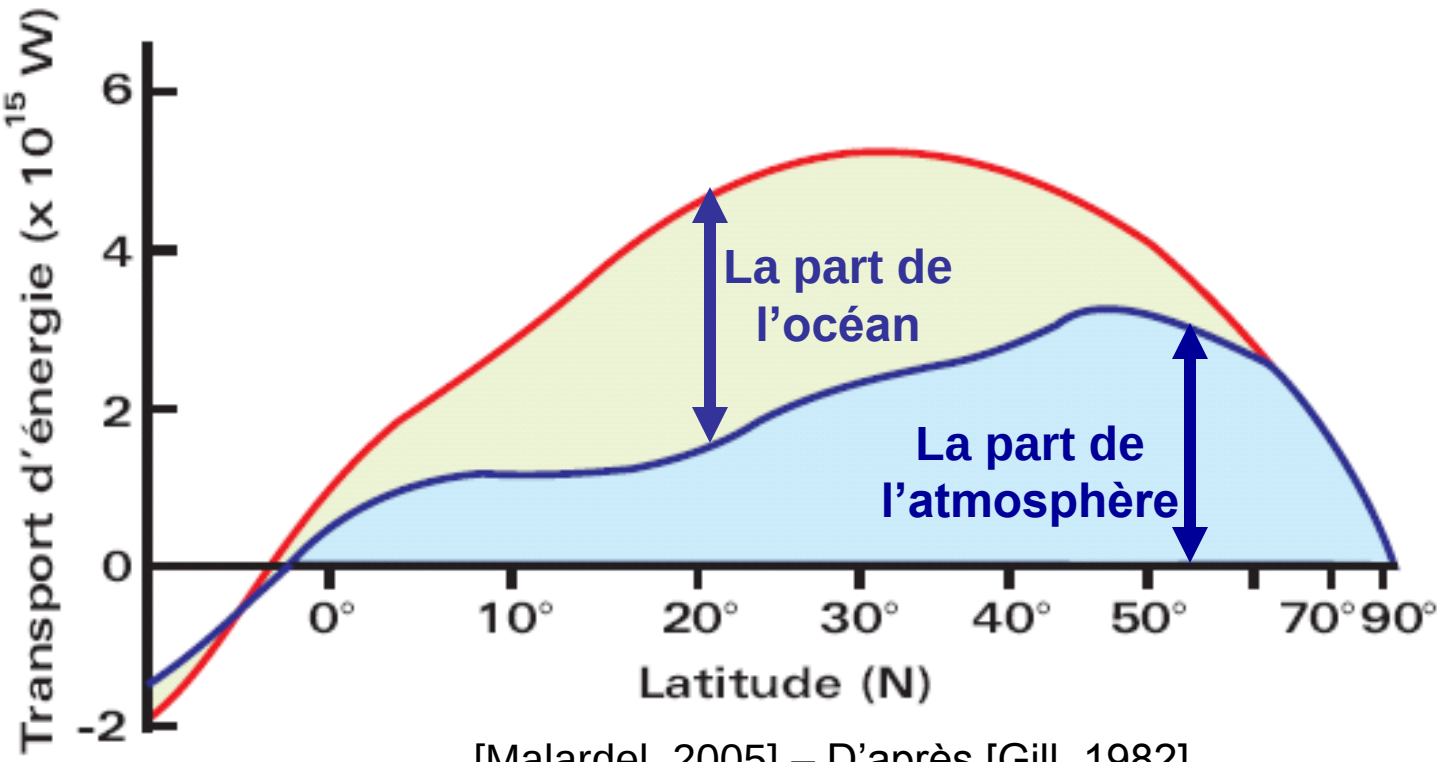


Flux radiatif net au sommet de l'atmosphère.

Source SCARAB-CNRS/LMD

W/m^2

Transport d'énergie par les fluides géophysiques vers les pôles.



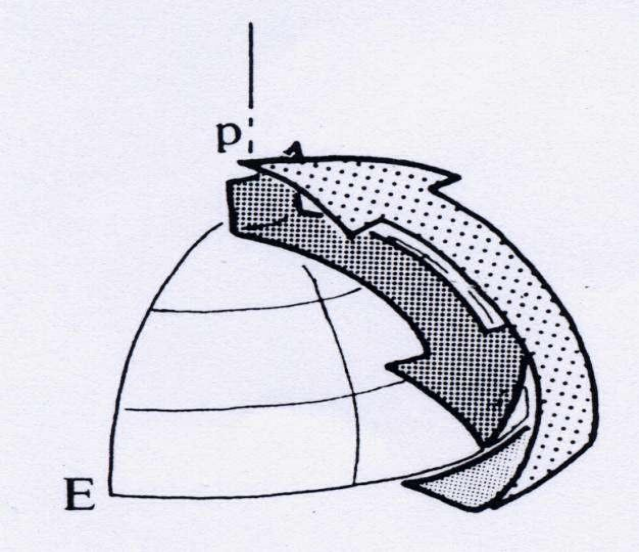
[Malardel, 2005] – D'après [Gill, 1982]

Courbe rouge : transport d'énergie total nécessaire pour équilibrer le bilan énergétique moyen.

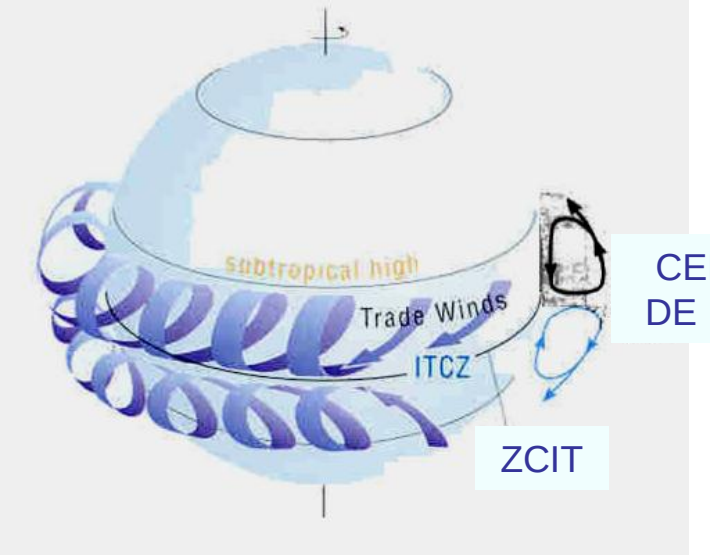
Surface sous la courbe bleue : part d'énergie transportée par l'atmosphère.

Surface entre les deux courbes : part d'énergie transportée par les océans.

TRANSPORT D'ENERGIE A GRANDE ECHELLE



sans rotation de la Terre



CELLULES DE HADLEY

avec rotation : c'est un peu plus compliqué !