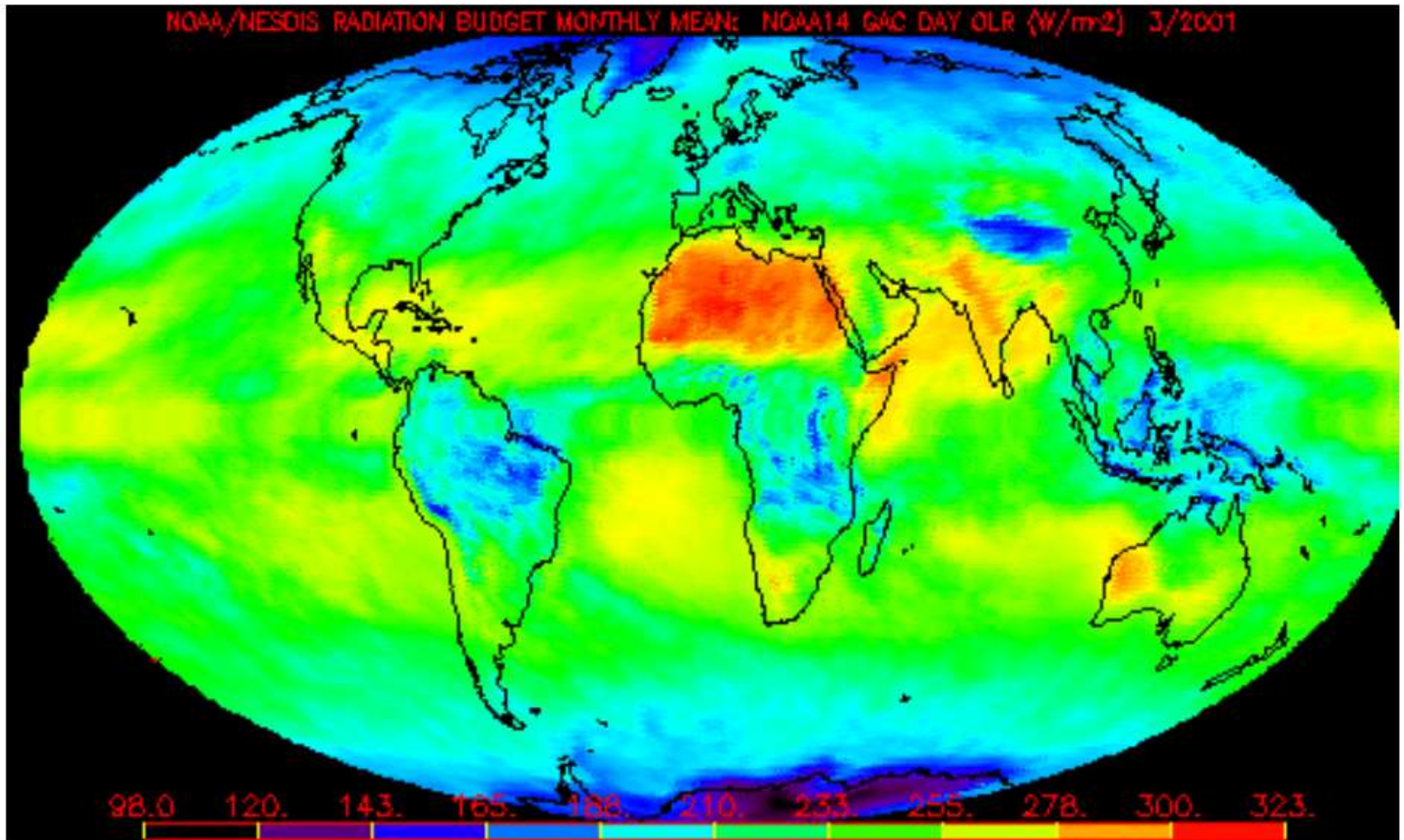


Chapitre 2: Le bilan radiatif terrestre



Le rayonnement infrarouge de la Terre peut être mesuré par des satellites équipés de capteurs sensibles à ce rayonnement et dirigés vers la Terre. L'image suivante représente une moyenne des mesures effectuées durant le mois de mars 2001.



Le glacier du Pré de Bar (Vallée d'Aoste) en 1929 (gauche) et en 2007 (droite)



Le glacier du Grand Aletsch (Valais) en 1856 (gauche) et en 2001 (droite)

Septembre 1979

Surface : $4,58 \times 10^6 \text{ km}^2$



Septembre 2000

Surface : $4,35 \times 10^6 \text{ km}^2$



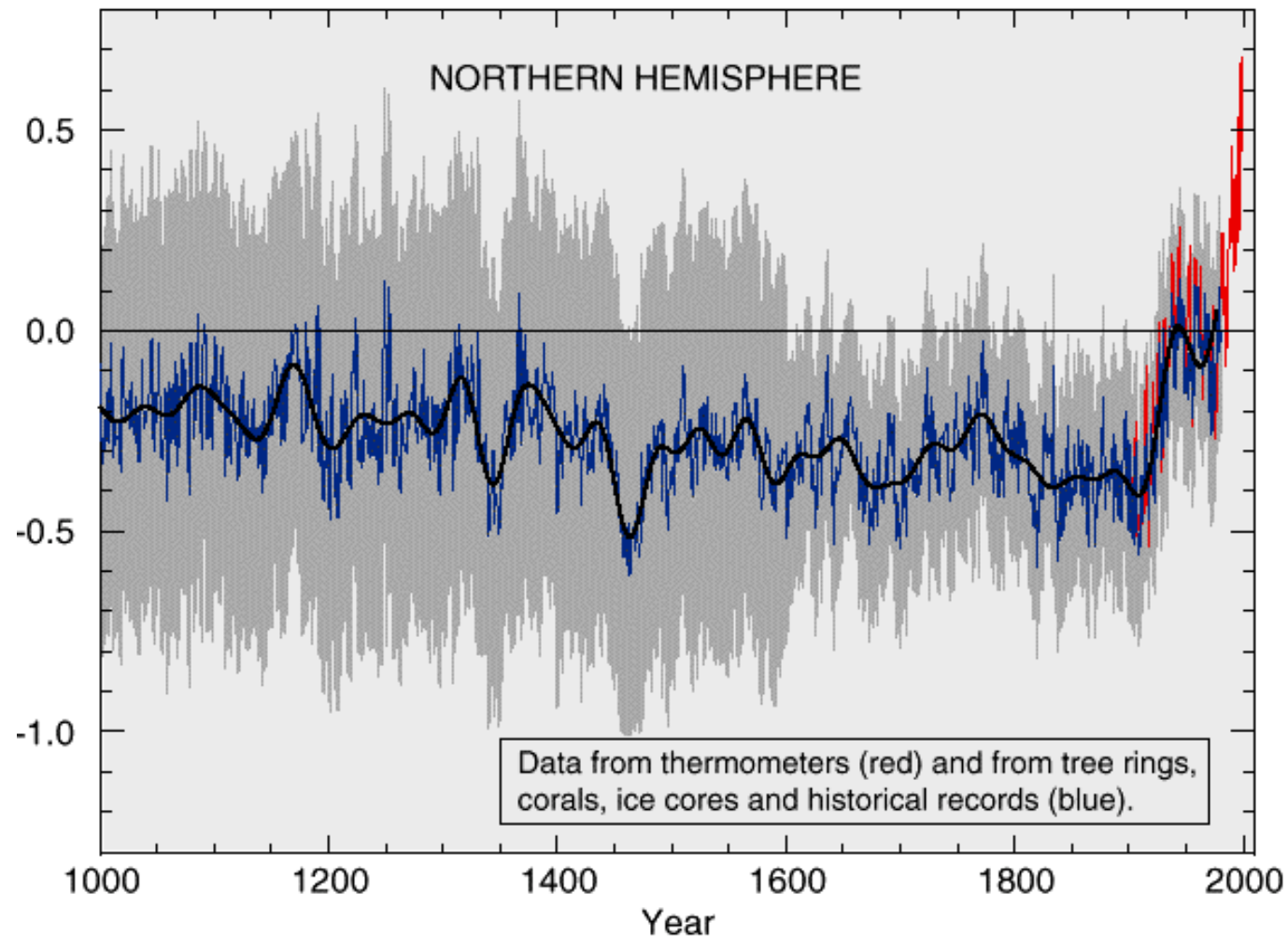
Septembre 2018

Surface : $3,3 \times 10^6 \text{ km}^2$

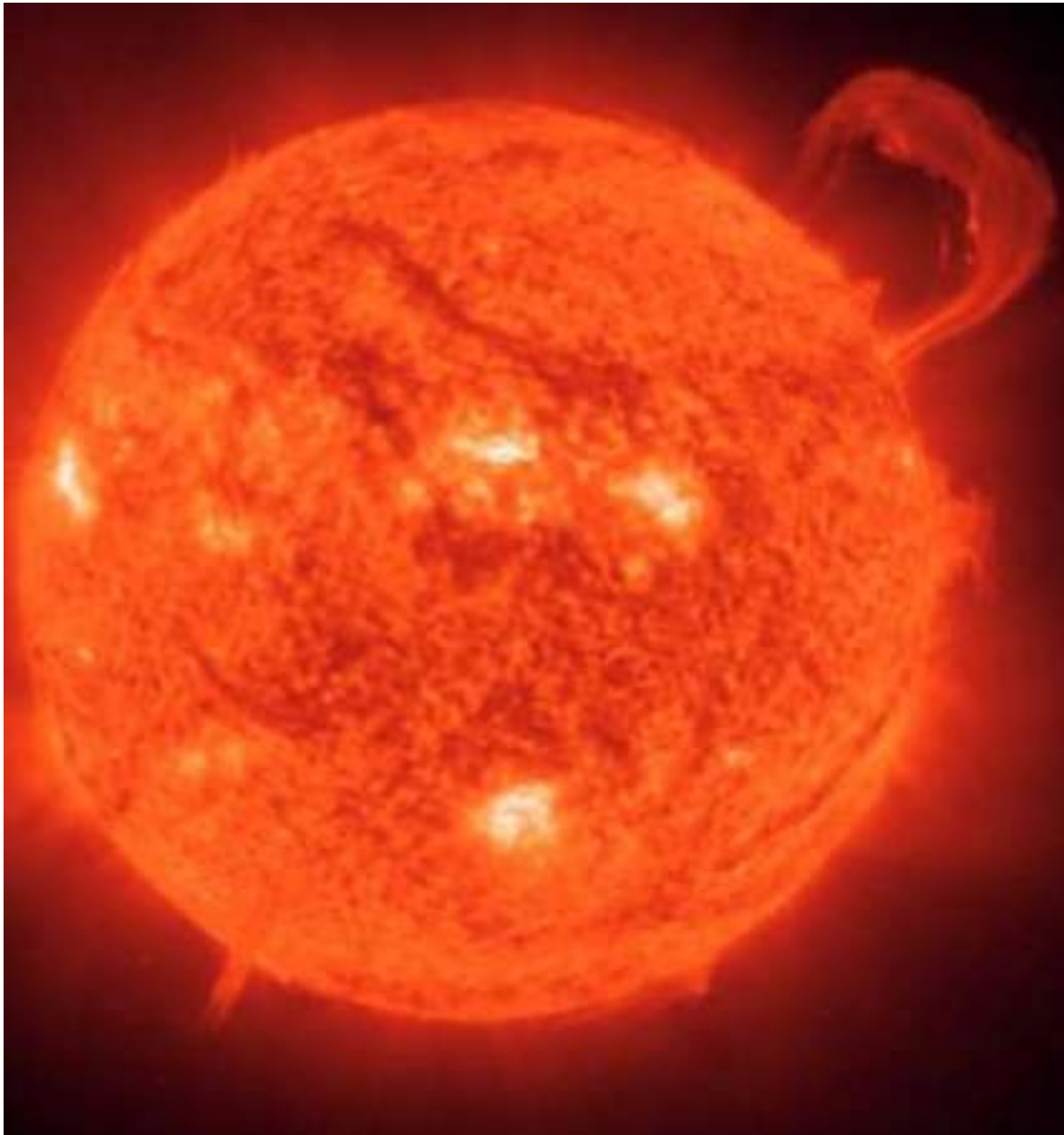


C Évolution
de la surface minimale
de la banquise arctique
de 1979 à 2018
(valeurs moyennes
de septembre).

DOC 1 : Écart de température terrestre estimé ou mesuré par rapport à la moyenne des températures de 1961 à 1990

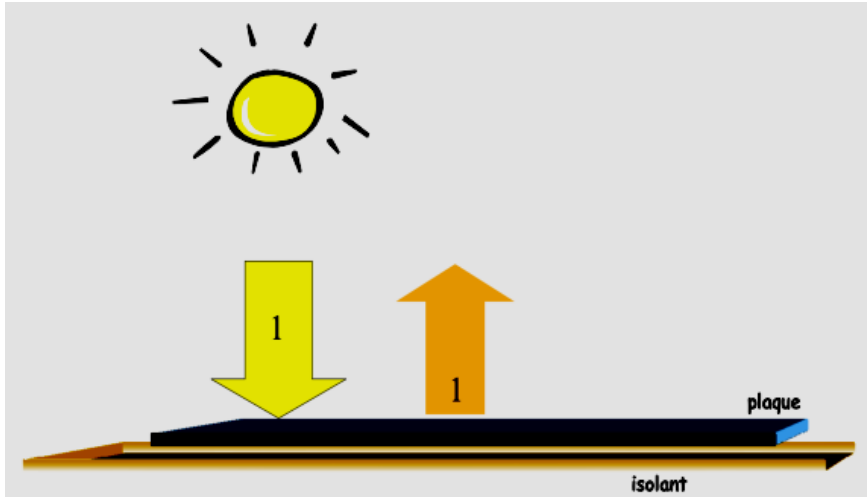


En rouge les températures mesurées par des thermomètres; en bleu des estimations déduites de différentes méthodes (cernes d'arbres, données isotopiques de coraux et glaces)

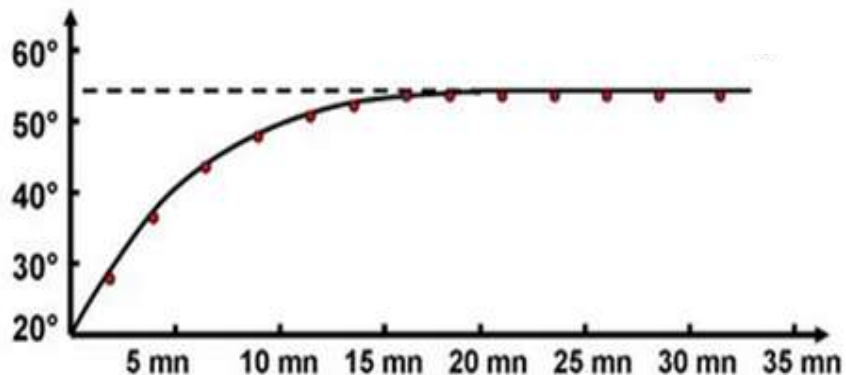


DOC 2 : Expérience

On mesure l'évolution de la température d'une plaque noire exposée au soleil.
On suit l'évolution de la température de cette plaque en fonction du temps



Température de
la plaque



Temps de la
mesure

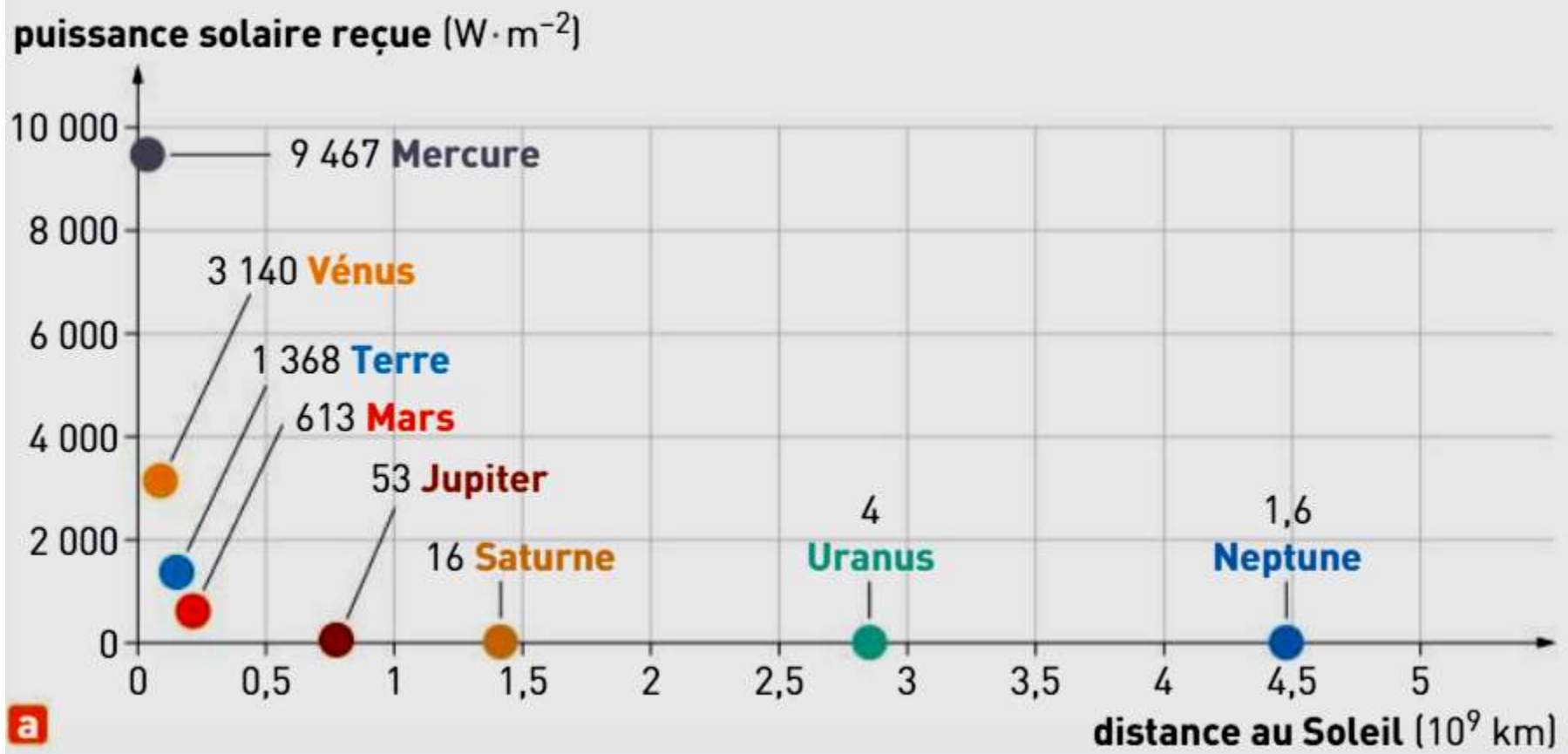
DOC 3 : Principe de l'équilibre thermique d'un système

Tout corps est en équilibre thermique = Tout corps tend à équilibrer son bilan d'énergie.
On dresse un bilan radiatif en faisant la différence entre les flux d'énergie reçue et émis. Si cette différence est nulle : le bilan est à l'équilibre, ce qui signifie que la température moyenne est constante. Si il y a davantage d'énergie reçue, la température augmente et si il y a davantage d'énergie émise, la température baisse.

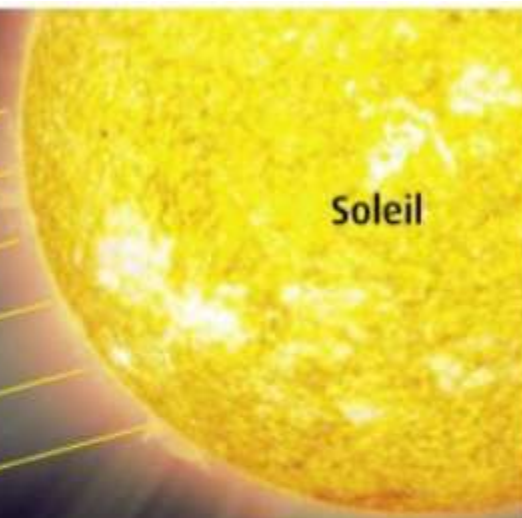
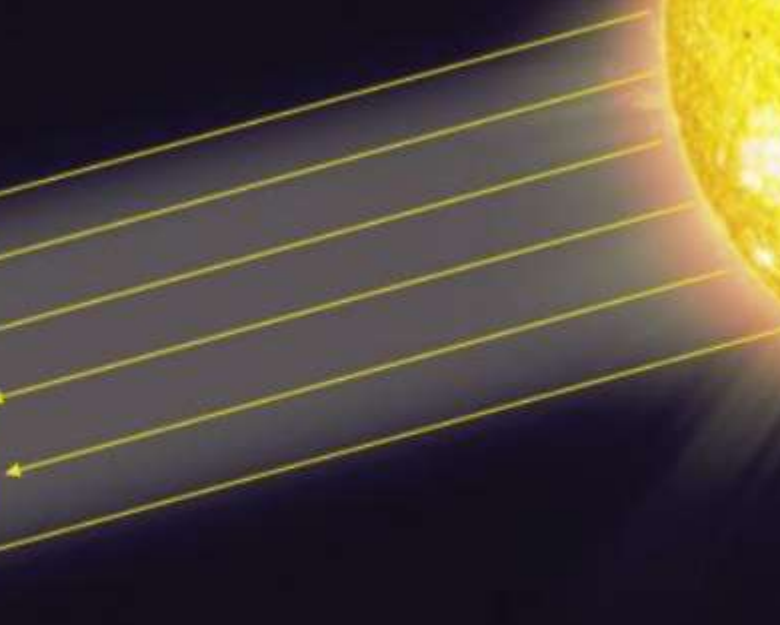
I – Comme tous les objets du système solaire, la Terre ne reçoit qu'une infime partie de la puissance solaire totale

1. Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique de puissance totale P_T dans toutes les directions de l'espace. Cette énergie est issue des réactions nucléaires se produisant au cœur du Soleil. Elle s'exprime en Watts.

$$P_T = 3,85 \times 10^{26} \text{ W.}$$



$R_T = 6\,371\text{ km}$

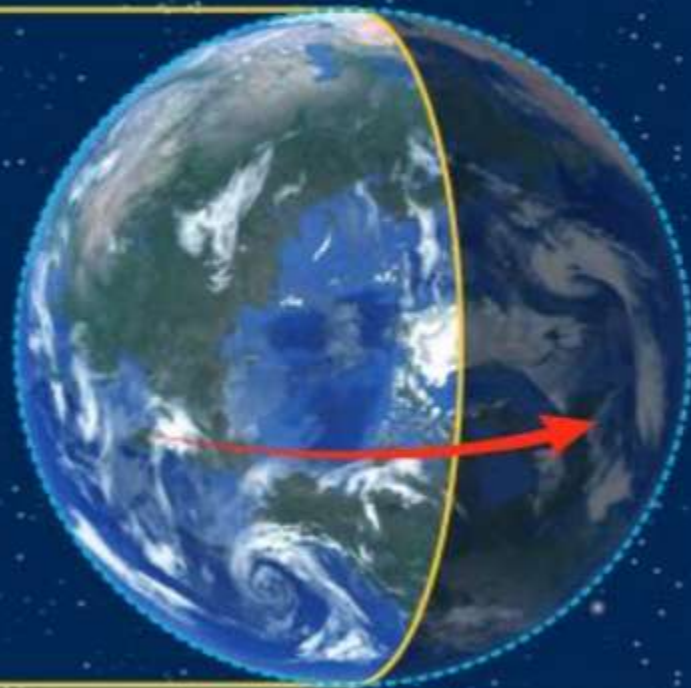


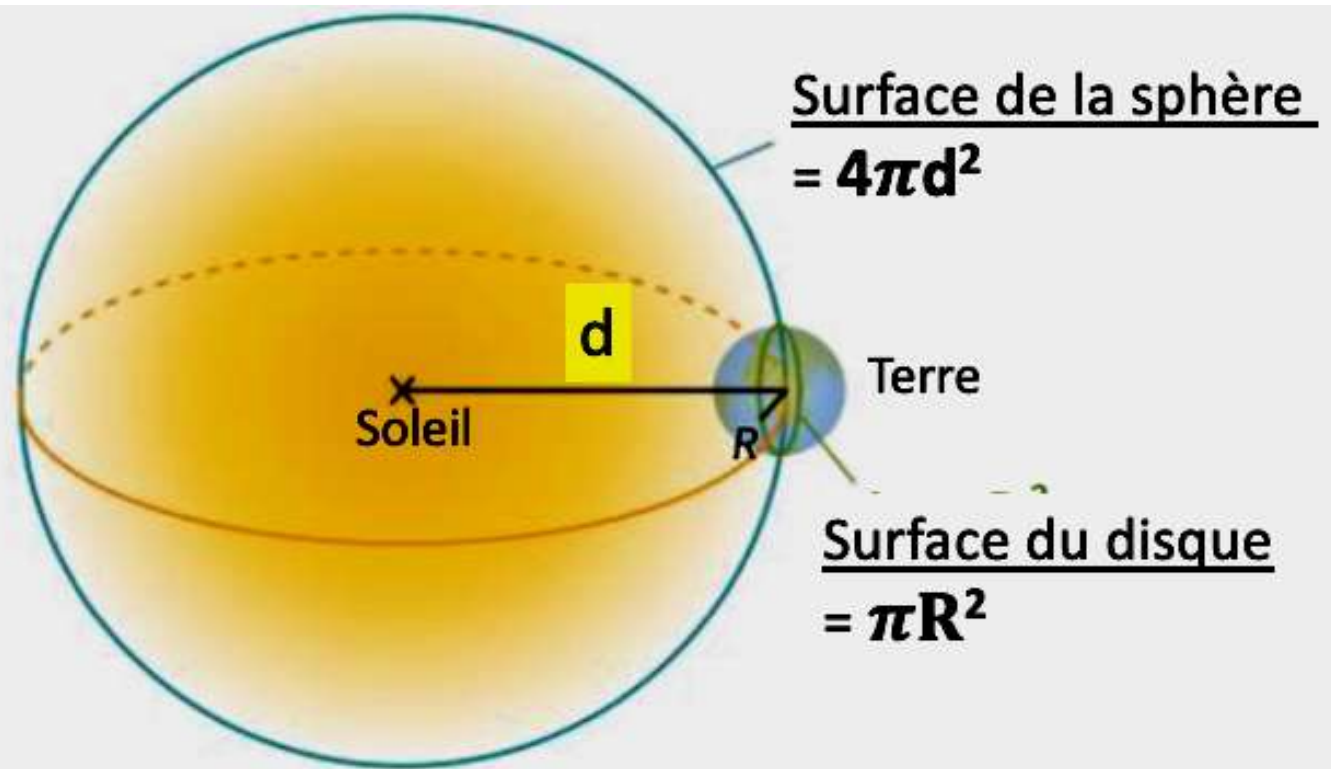
$$S_{\text{disque}} = \pi r^2$$

$$S_{\text{sphère}} = 4\pi r^2$$

puissance
solaire
reçue par
la Terre

$r = 6\,371 \text{ km}$





Puissance solaire interceptée par la Terre situé à une distance d du soleil

$$P_s \text{ (en } W/m^2) = \frac{P_t}{\text{Surface sphère Soleil-Planète}} = \frac{3,85 \times 10^{26}}{4\pi d^2}$$

2. Seule une partie de cette puissance P_+ atteint la Terre ; Cette puissance dépend de la distance Terre-Soleil (d) et du rayon de la Terre (R)

a. La puissance solaire reçue par un astre dépend de sa distance au soleil : Plus la distance entre le Soleil et l'astre est grande, plus la puissance solaire reçue par unité de surface est faible.

-Pour la Terre, située à une distance d du Soleil, la puissance solaire totale se répartit sur toute une sphère de rayon d , dont la surface vaut $4 \cdot \pi \cdot d^2$.

- Ainsi la puissance reçue sur 1 m^2 de cette sphère (Terre-Soleil) est appelée puissance surfacique (P_s) ou encore constante solaire. Elle est égale à 1361 W/m^2

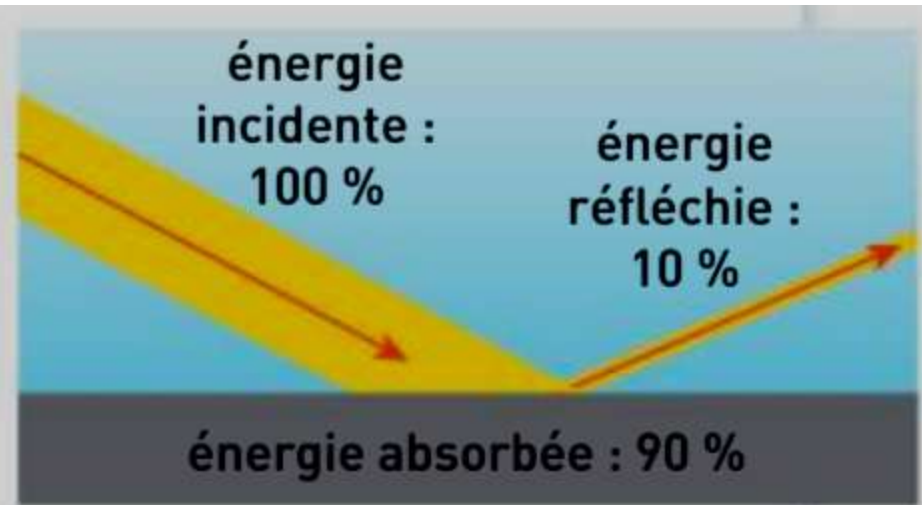
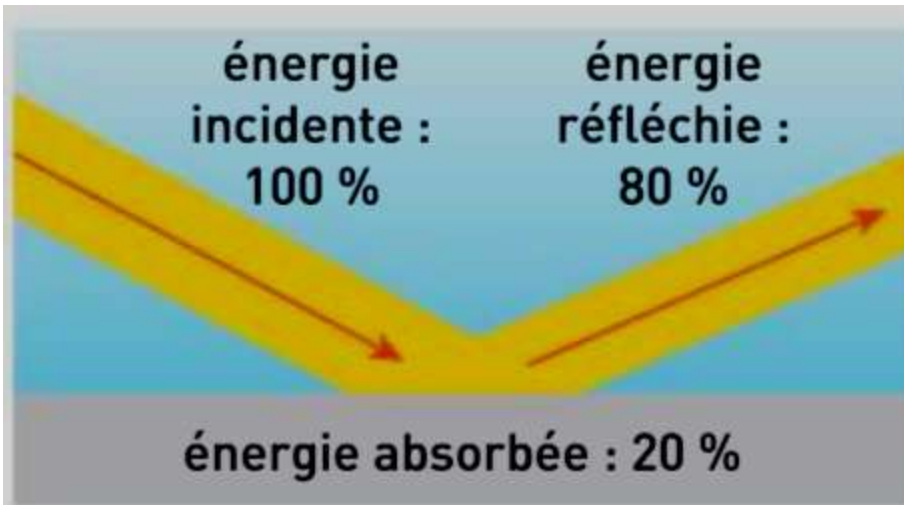
b. La puissance solaire reçue par un astre dépend également de son rayon : Plus le rayon est grand, plus la puissance solaire reçue par unité de surface est élevée.

- Ainsi, de toute la puissance répartie sur cette sphère de rayon d , la Terre en intercepte une proportion, sur une surface égale à πR^2 (surface d'un disque). Soit P_{sd} cette puissance reçue par le disque Terre.

$$P_{sd} \text{ (en } W.m^2) = P_s \times \pi R^2$$

- La Terre étant sphérique et en rotation sur elle-même, la puissance solaire reçue totale se répartit non pas sur un disque mais sur une sphère de surface $4\pi R^2$. Soit P_{st} cette puissance reçue sur toute la surface terrestre. Elle est égale à 341 W/m^2

$$P_{st} \text{ (en } W.m^2) = P_{sd} / 4\pi R^2$$



a Une surface d'albédo élevé apparaît claire à la lumière du jour. Plus l'albédo est faible, plus la surface apparaît sombre.



Albédo = 0,8



Albédo = 0,24



Albédo = 0,18



Albédo = 0,22



Albédo = 0,29

II. Après avoir atteint la Terre, une partie du rayonnement solaire est réfléchié vers l'espace, tandis que l'autre partie est absorbée par l'atmosphère, les continents et les océans...

1. On appelle albédo (A) le rapport de la puissance lumineuse réfléchié par la puissance lumineuse arrivant sur la surface (=incidente).

$$A = \frac{P \text{ réfléchié}}{P \text{ incidente}}$$

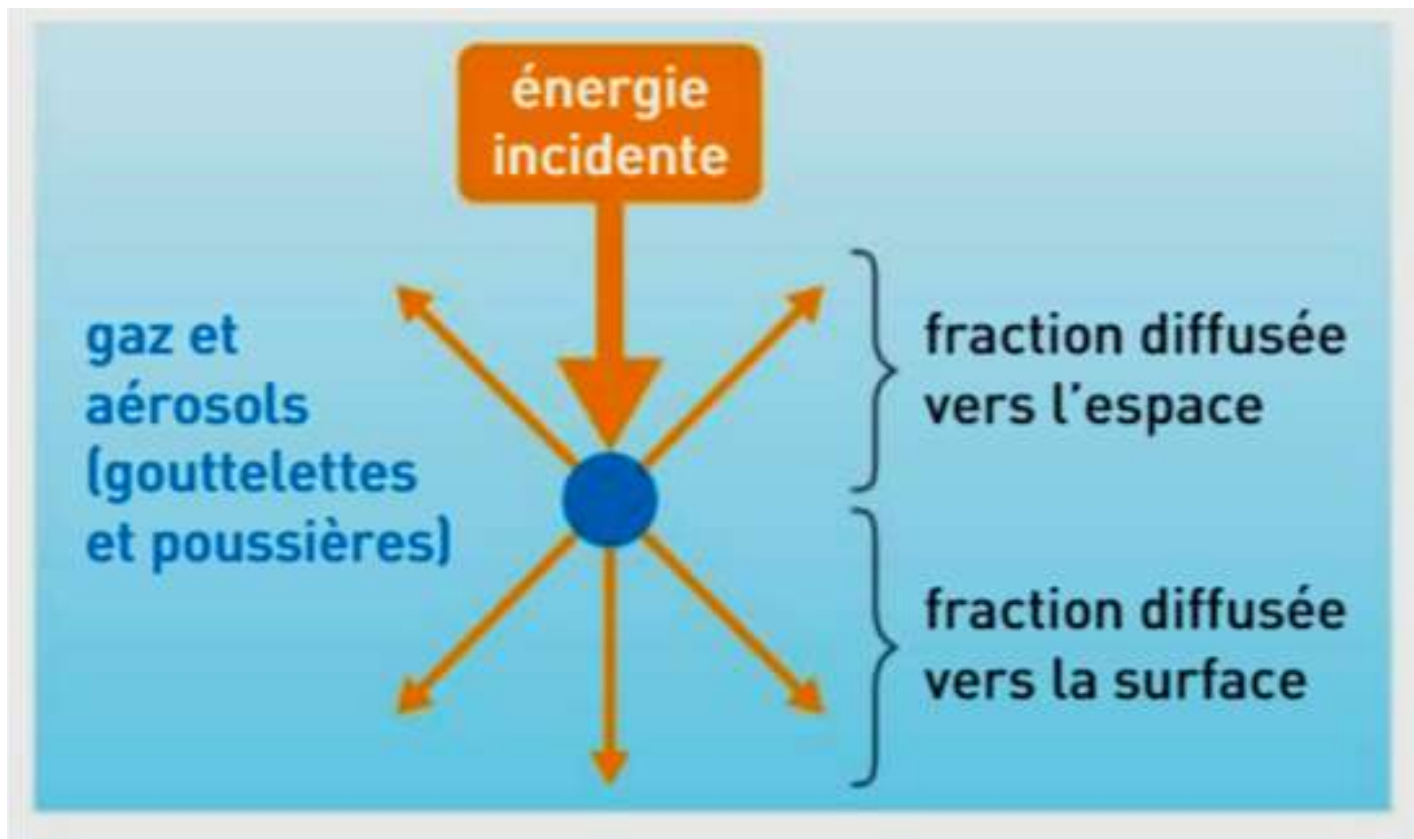
Pour la terre, $P \text{ incidente} = P_{st} = 341 \text{ W/m}^2$

2. L'albédo est une grandeur physique sans unité qui caractérise l'aptitude d'une surface à réfléchir le rayonnement qui lui parvient. Cette valeur varie de 0 (toute la lumière reçue est absorbée, surface noire) à 1 (toute la lumière reçue est réfléchie, surface blanche)

3. Plus une surface est sombre, plus elle absorbera d'énergie et moins elle en réfléchira. Les surfaces sombres comme les océans et les forêts réfléchissent peu la lumière et ont un albédo faible.

Au contraire, des surfaces claires comme les nuages, les étendues de glace et de déserts, ont un albédo élevé.

4. En tenant compte de la proportion de chaque type de surface et de leur albédo, on calcule que l'albédo moyen de la Terre est d'environ 0,30. La Terre réfléchit vers l'espace 30 % de la puissance solaire qu'elle reçoit. Le reste (70%) est absorbé par l'atmosphère, les continents, les océans et contribue donc au réchauffement de la Terre.



Les radiations non absorbées par les molécules de l'atmosphère sont diffusées : elles sont renvoyées dans toutes les directions par les gaz ou les aérosols*. Une partie de ce rayonnement diffusé repart donc vers l'espace.

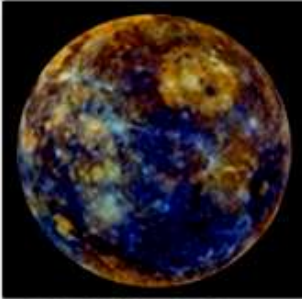
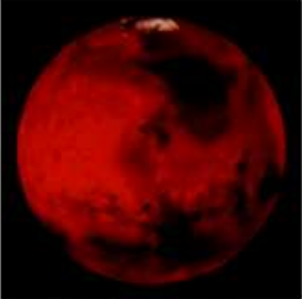
Les nuages jouent un rôle majeur dans la réflexion de la lumière par l'atmosphère. En effet, la majorité des radiations du domaine du visible sont diffusées par les microgouttelettes d'eau ou par les cristaux de glace qu'ils contiennent.

III. La puissance reçue par le sol terrestre est la somme de la puissance du rayonnement solaire incident (après absorption par l'atmosphère) et de la puissance du rayonnement infrarouge lié à l'effet de serre.

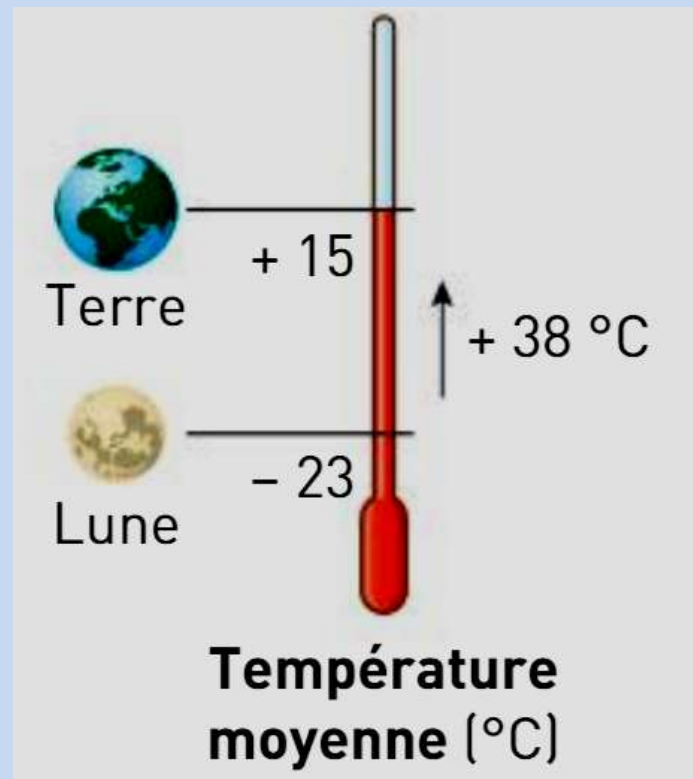
1. Certains gaz de l'atmosphère absorbent directement le rayonnement solaire sur certaines plages de longueur d'onde.

- Ces gaz absorbent environ 20% de l'énergie solaire reçue.

- D'après ces 20% absorbés par l'atmosphère, ajoutés au 30% réfléchi vers l'espace par l'albédo, on estime que 50% de la puissance solaire reçue au sommet de l'atmosphère est absorbée par la surface des océans et des continents.

	Mercure  © Belin Éducation/Humen... © Droits réservés	Vénus  © Belin Éducation/Humen... © Droits réservés	Terre  © Belin Éducation/Humen... © NASA	Lune  © Belin Éducation/Humen... © Droits réservés	Mars  © Belin Éducation/Humen... © NASA/JPL/USGS
Distance au soleil (UA)	0,38	0,72	1,00	1,00	1,52
Puissance solaire par unité de surface reçue (kW · m ⁻²)	9,2	2,6	1,4	1,4	0,6
Température moyenne calculée (°C)	180	30	-17	-17	-60
Température moyenne mesurée (°C)	180	460	15	-17	-50
Atmosphère	Non	Épaisse et partiellement opaque	Épaisse et transparente	Non	Fine

2. La température moyenne est de 15°C au lieu de -18°C en théorie. La surface terrestre reçoit donc plus d'énergie que celle du rayonnement incident. Cette énergie supplémentaire s'explique par l'effet de serre.

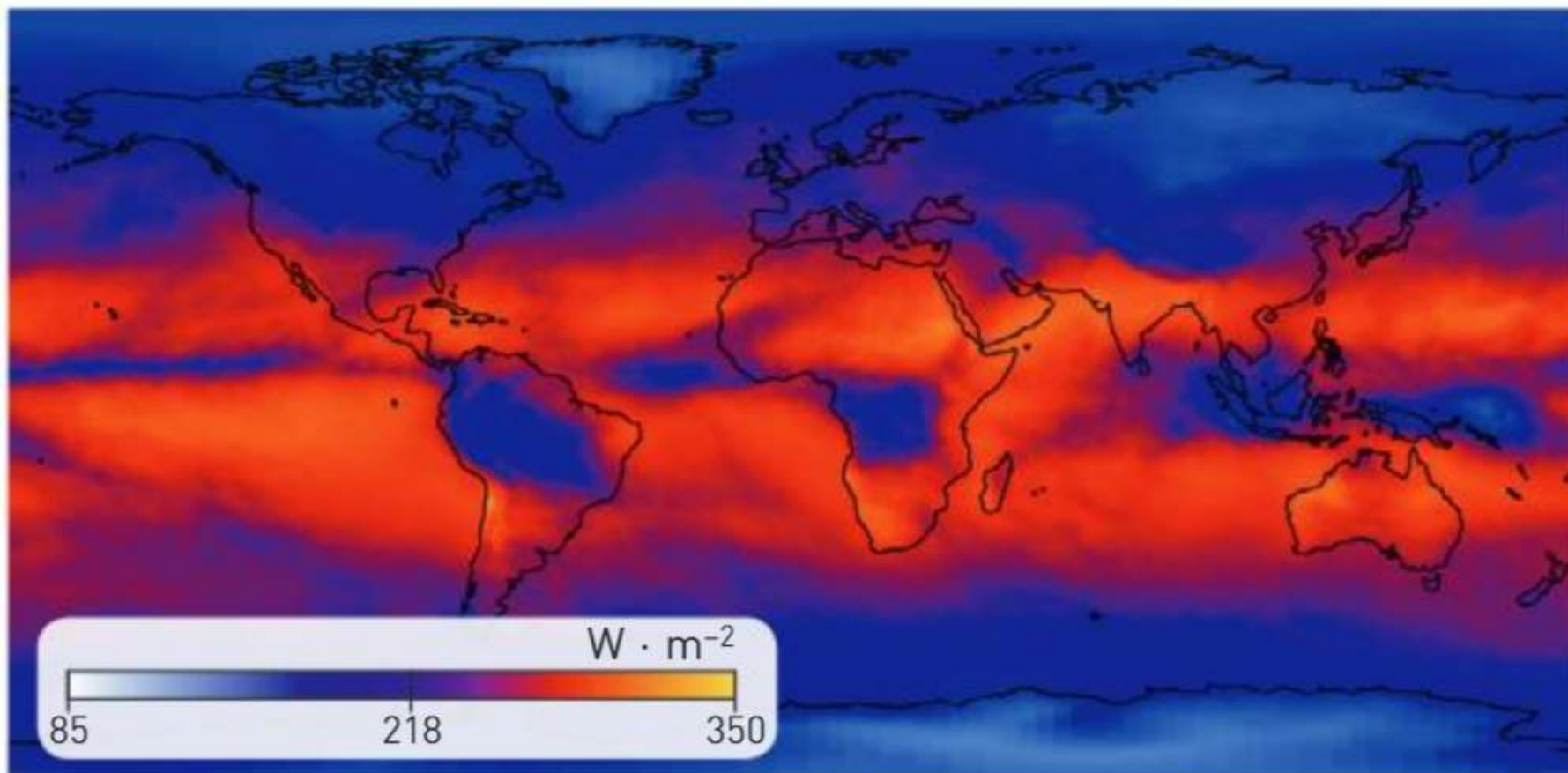




c Une mesure de température par thermographie. Les objets de la pièce (en bleu) sont à température ambiante, contrairement à l'écran d'ordinateur et à l'utilisateur.



b Une caméra infrarouge visualise le rayonnement IR-C d'un bâtiment afin d'en évaluer les pertes thermiques (les zones qui rayonnent le plus sont repérées en rouge).



■ Puissance moyenne du rayonnement
IR lointain émis par la Terre en novembre
2018.

La loi de Wien

Elle associe la longueur d'onde d'intensité maximale à la température du corps qui l'émet :

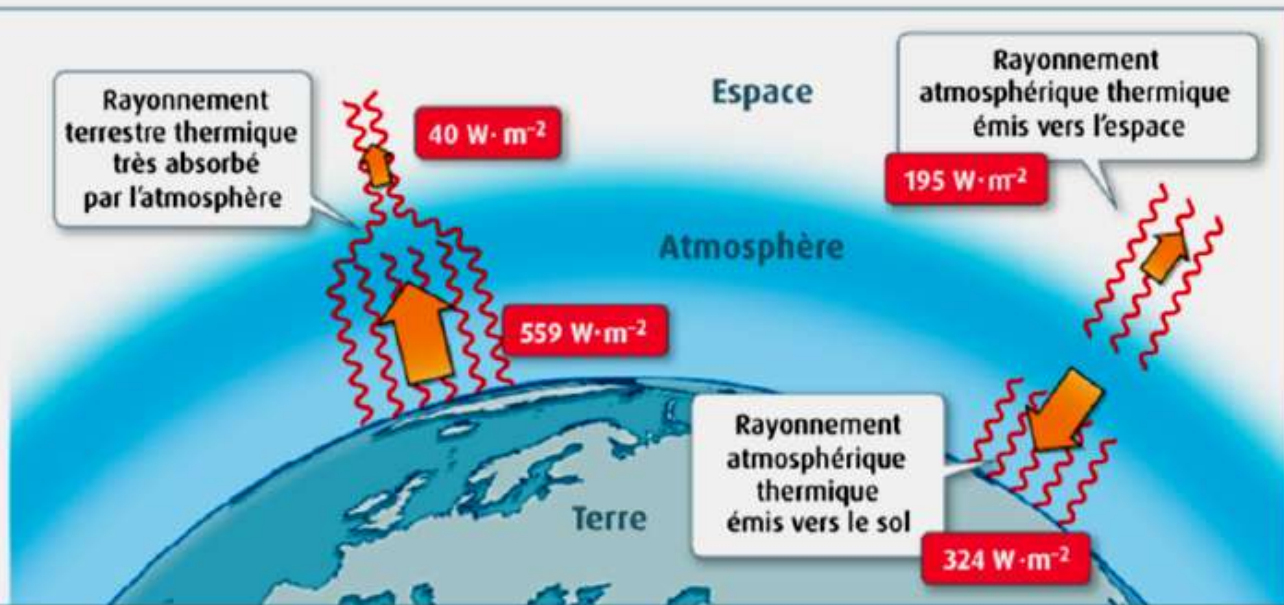
$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{T}$$

$\lambda_{\max}$ en mètre

T en degrés Kelvin

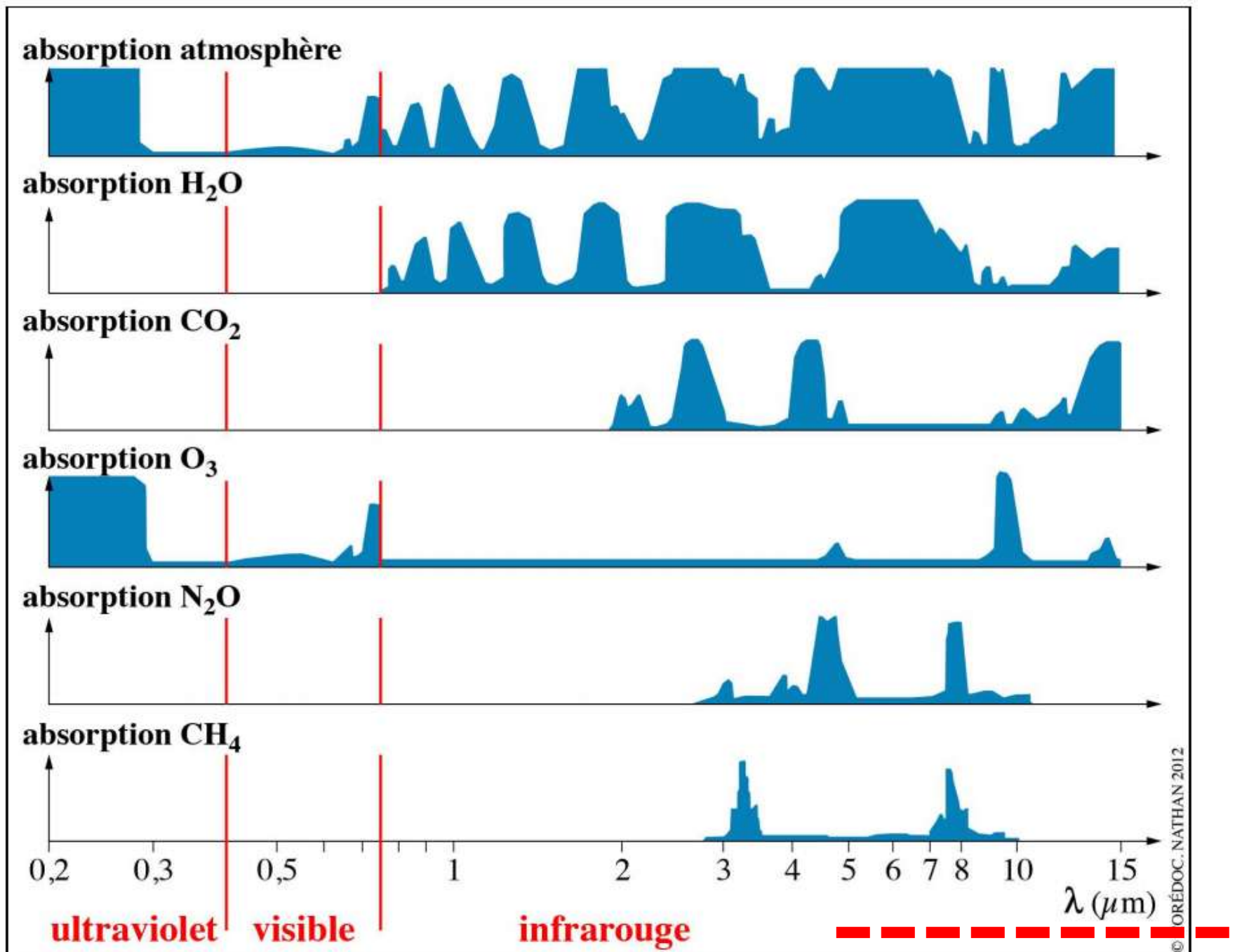
Rappel : $T(K) = T(^{\circ}C) + 273$

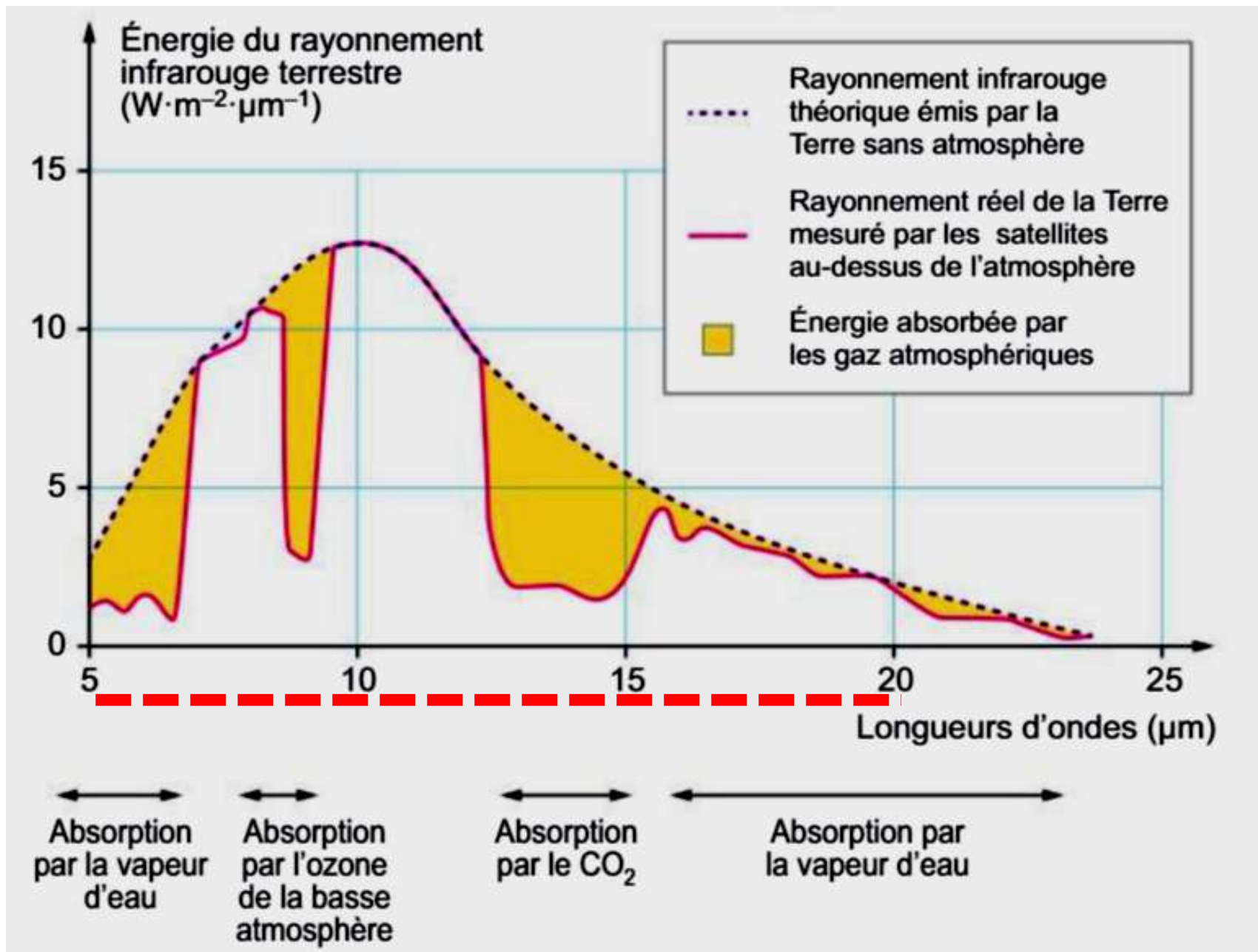
Les phénomènes d'absorption et d'émission sont simultanés : ils se produisent en permanence et tous en même temps. Les valeurs de puissance par unité de surface sont des moyennes annuelles calculées sur la totalité de l'atmosphère de notre planète.

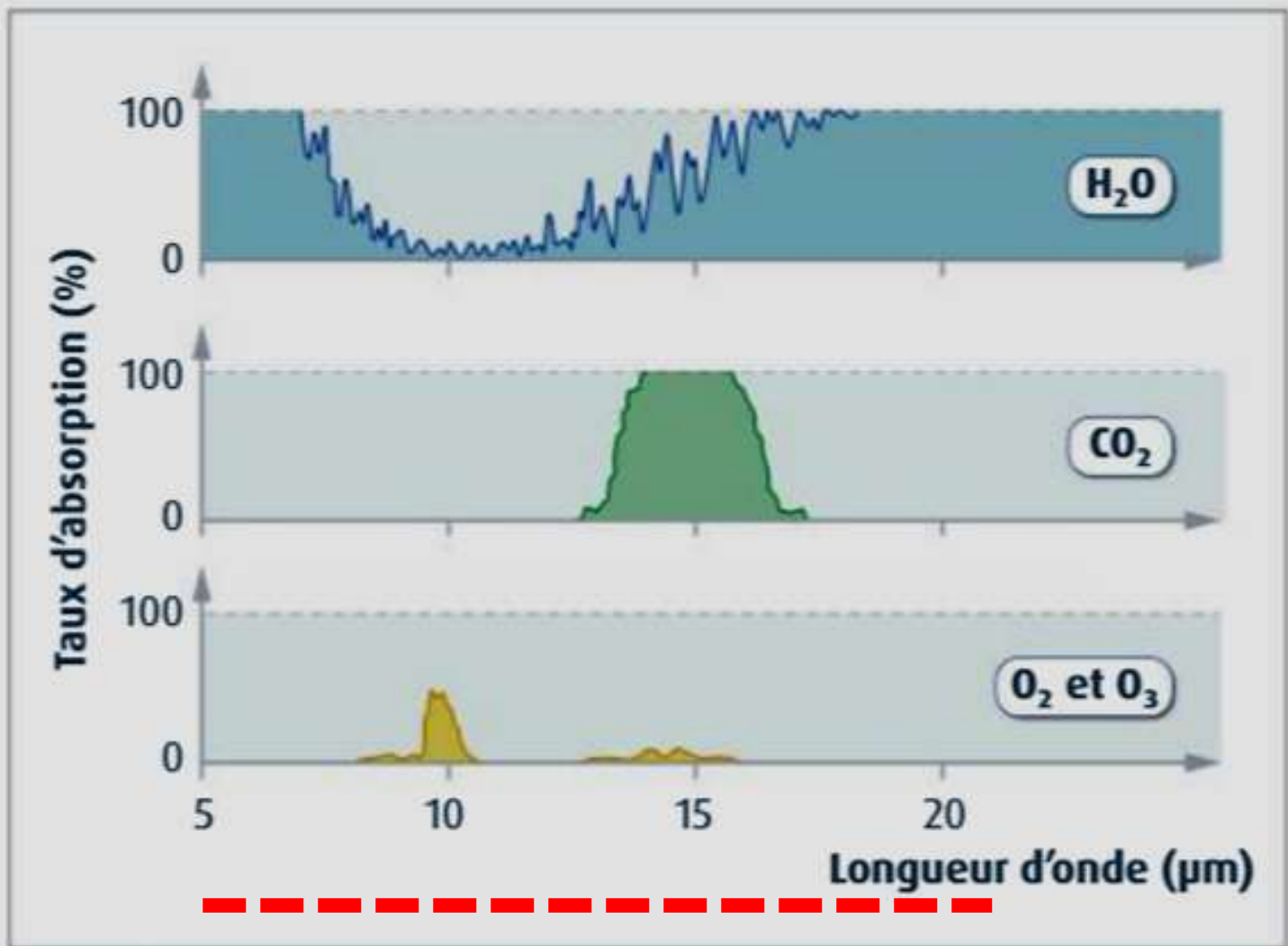


DOC 3 Schéma simplifié des absorptions et émissions radiatives au niveau de l'atmosphère terrestre.

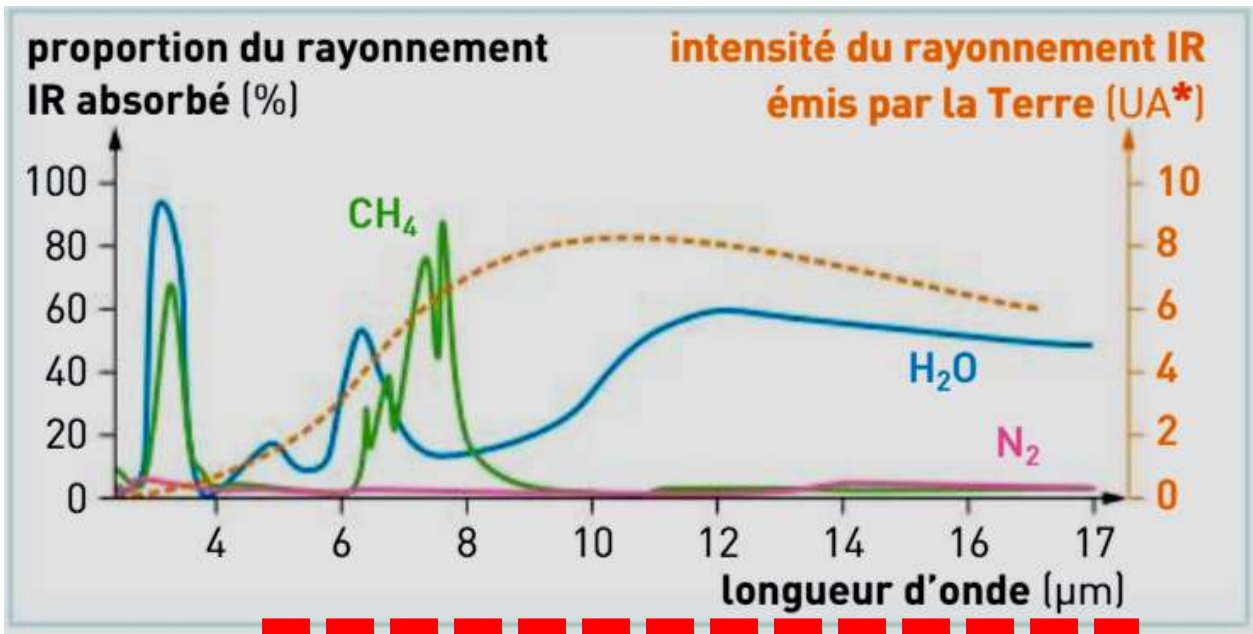
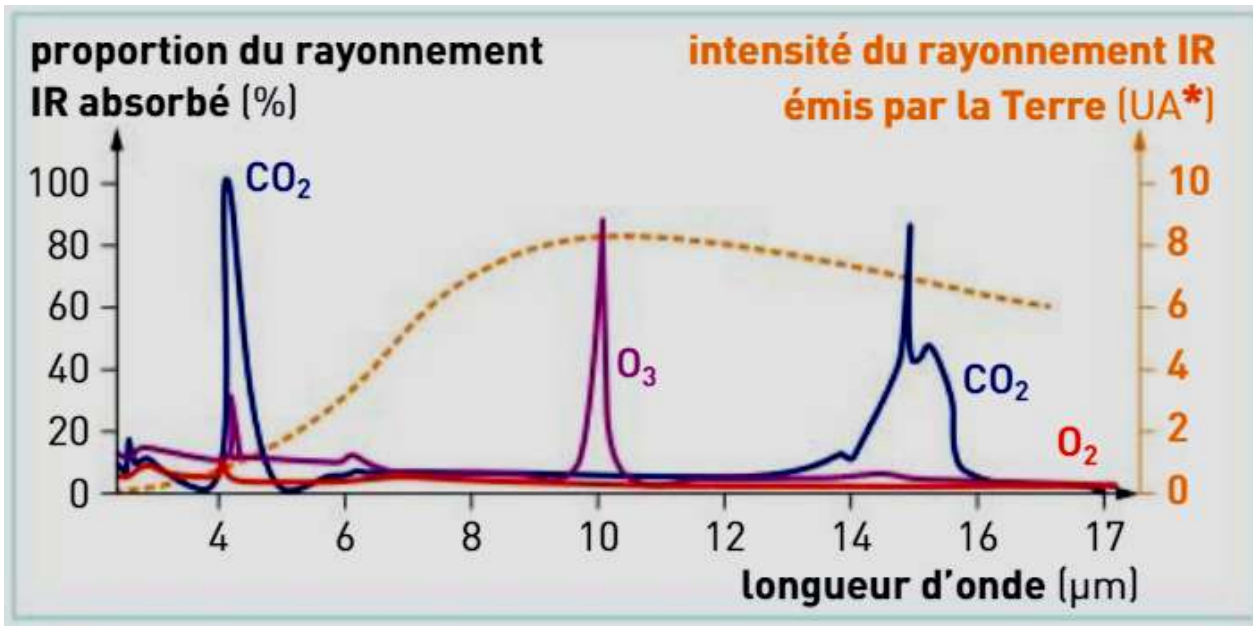
Le sol émet un rayonnement électromagnétique dans le domaine infra-rouge (longueur d'onde voisine de $10 \mu\text{m}$) dont la puissance par unité de surface augmente avec la température. Une partie de cette puissance est absorbée par l'atmosphère, qui elle-même émet un rayonnement infrarouge vers le sol et vers l'espace (effet de serre).







DOC 5 Absorption du rayonnement infrarouge par certains gaz de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde. Ces gaz sont dits à « effet de serre ».

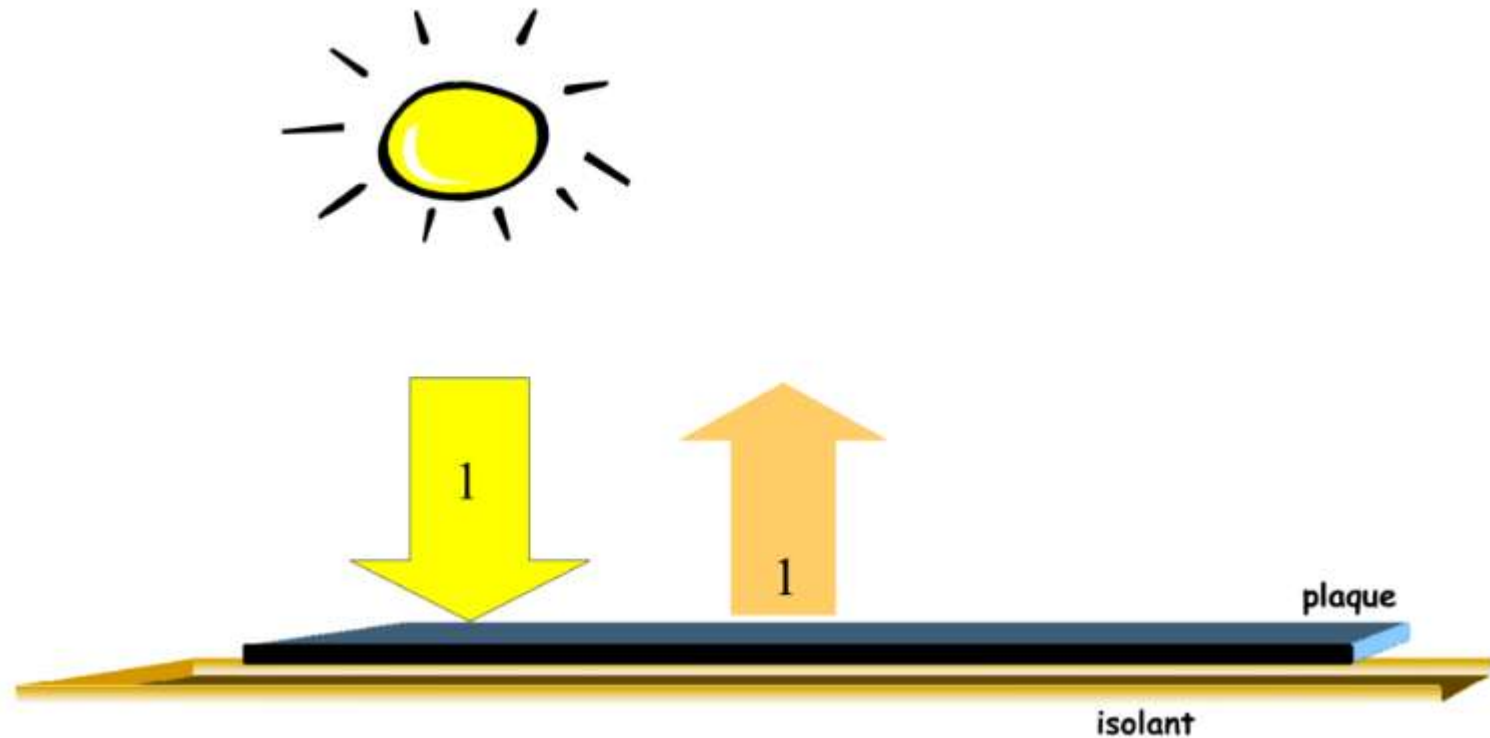


b Spectres d'absorption des principaux gaz de l'atmosphère (courbes en traits pleins), superposés à l'intensité du rayonnement IR émis par la Terre (courbe en pointillés).

GES	H ₂ O	CO ₂	O ₃	CH ₄
Concentration (%)	0,5 à 5	0,04	0,0007	Traces
Contribution à l'effet de serre (%)	48,4	21,1	6,4	4,8

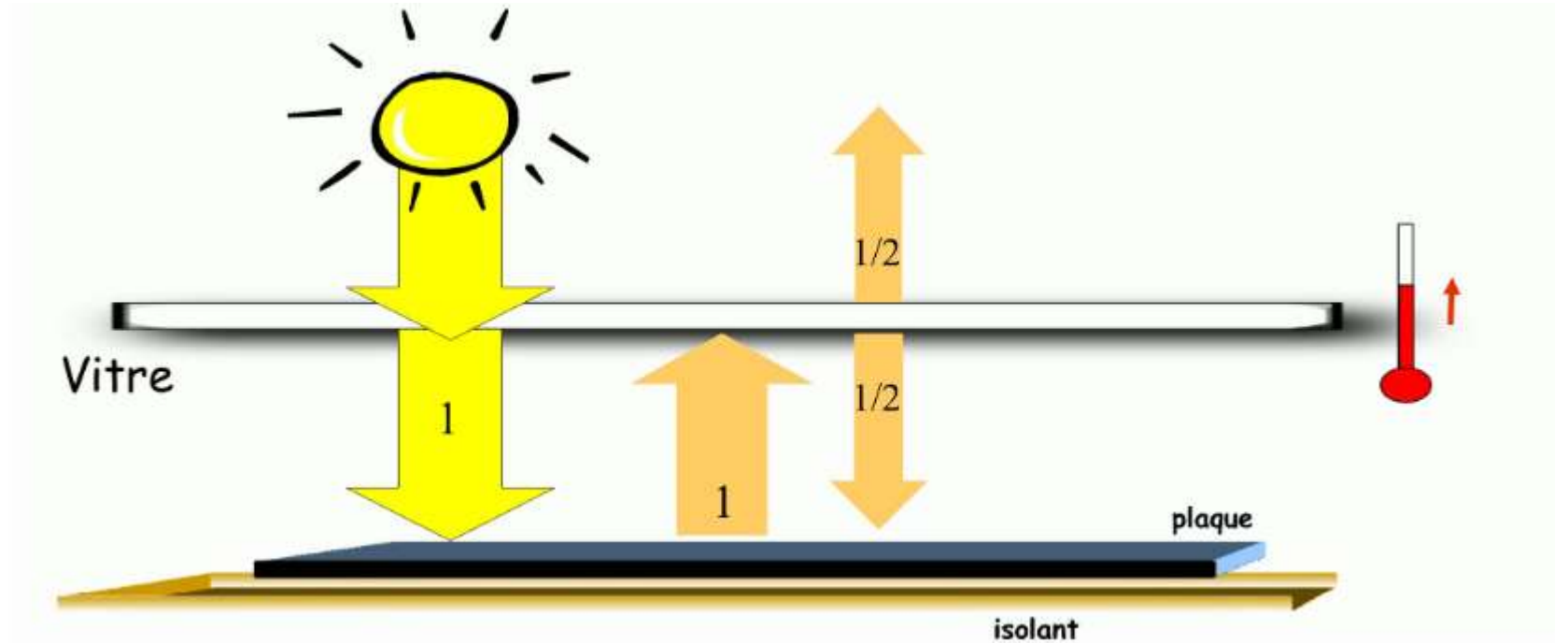
C Comparaison de la contribution à l'effet de serre des principaux GES. (L'eau liquide présente dans l'atmosphère, telles que les gouttelettes des nuages, contribue également à l'effet de serre, à hauteur de 19,3 %.)

Un modèle pour expliquer l'effet de serre



La plaque noire est placée au soleil et a atteint son équilibre thermique.

Un modèle pour expliquer l'effet de serre

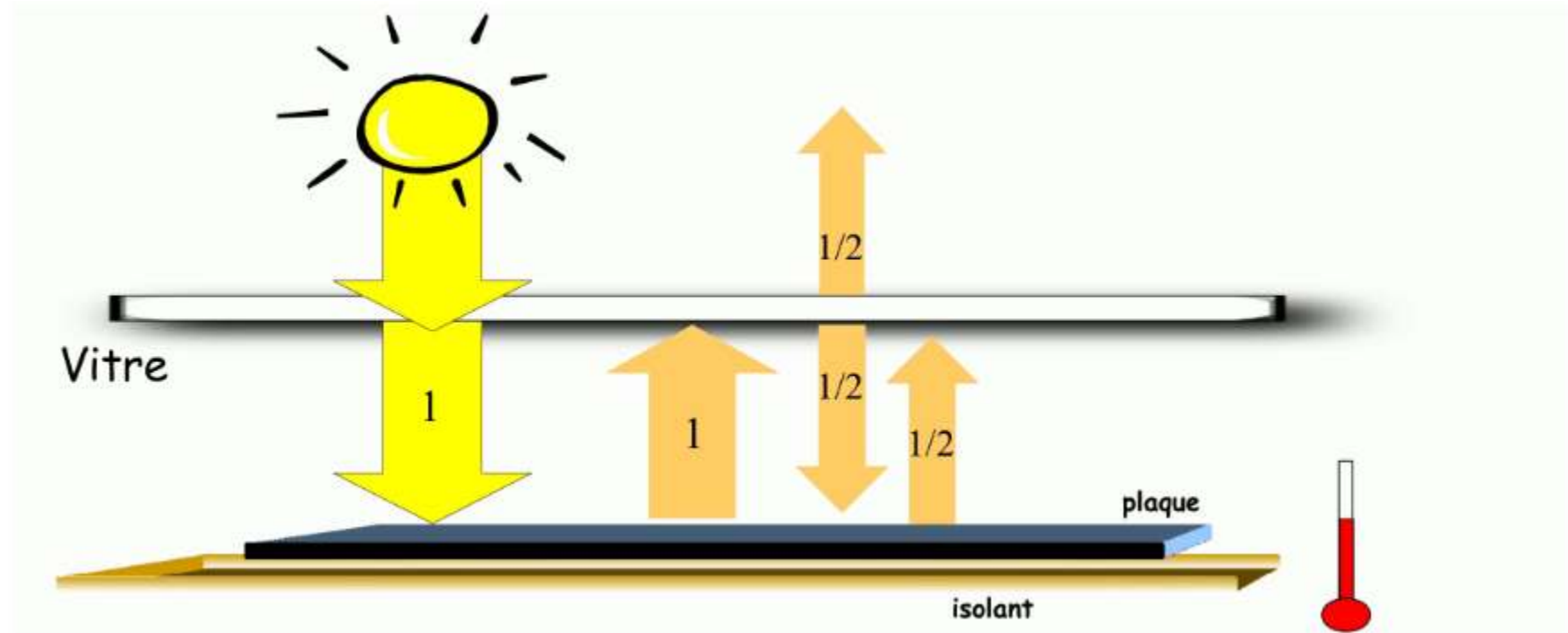


L'absorption par la vitre du rayonnement infrarouge émis par la plaque lui fait gagner de l'énergie donc sa température s'élève.

Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

Elle atteint sa température d'équilibre lorsqu'elle perd autant d'énergie qu'elle n'en reçoit.

Un modèle pour expliquer l'effet de serre

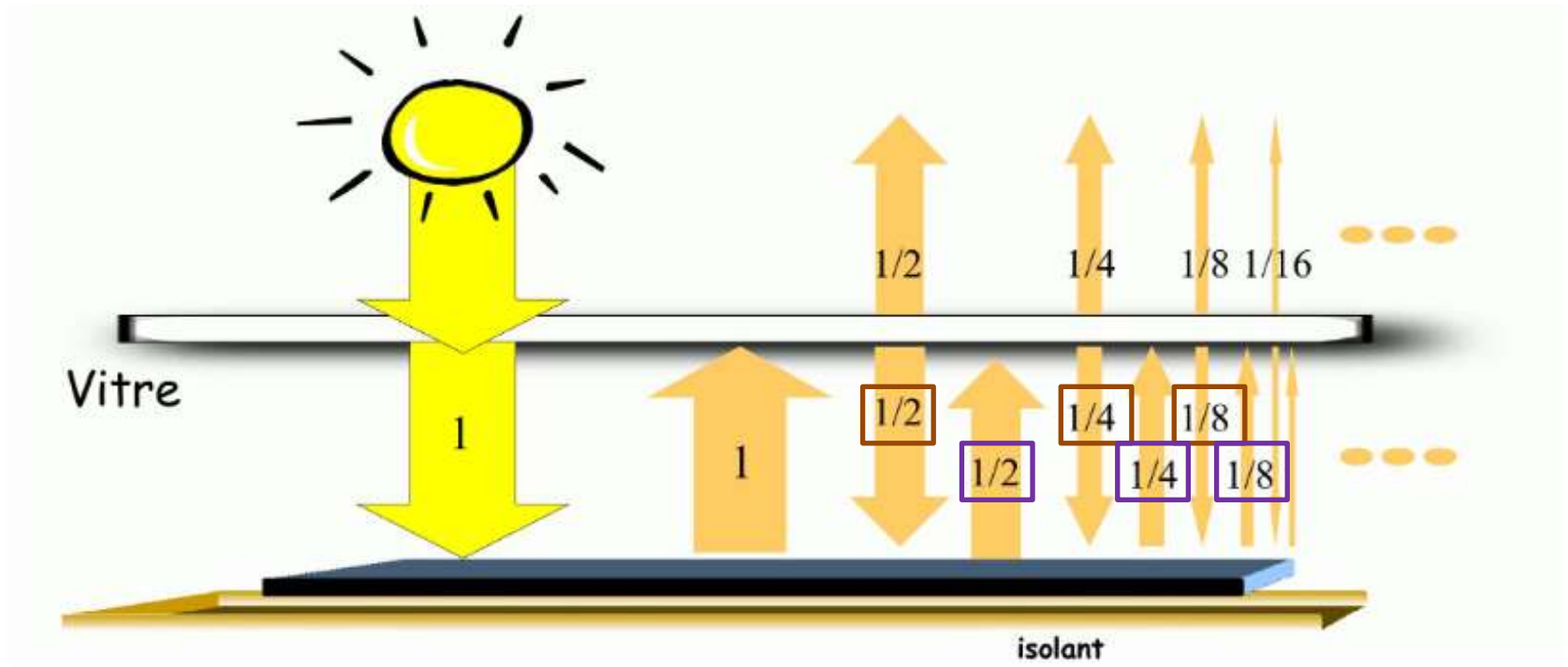


Le rayonnement infrarouge émis vers le bas par la vitre est absorbé par la plaque.

Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et elle émet davantage de rayonnement infrarouge.

Jusqu'à ce qu'elle atteigne une nouvelle température d'équilibre

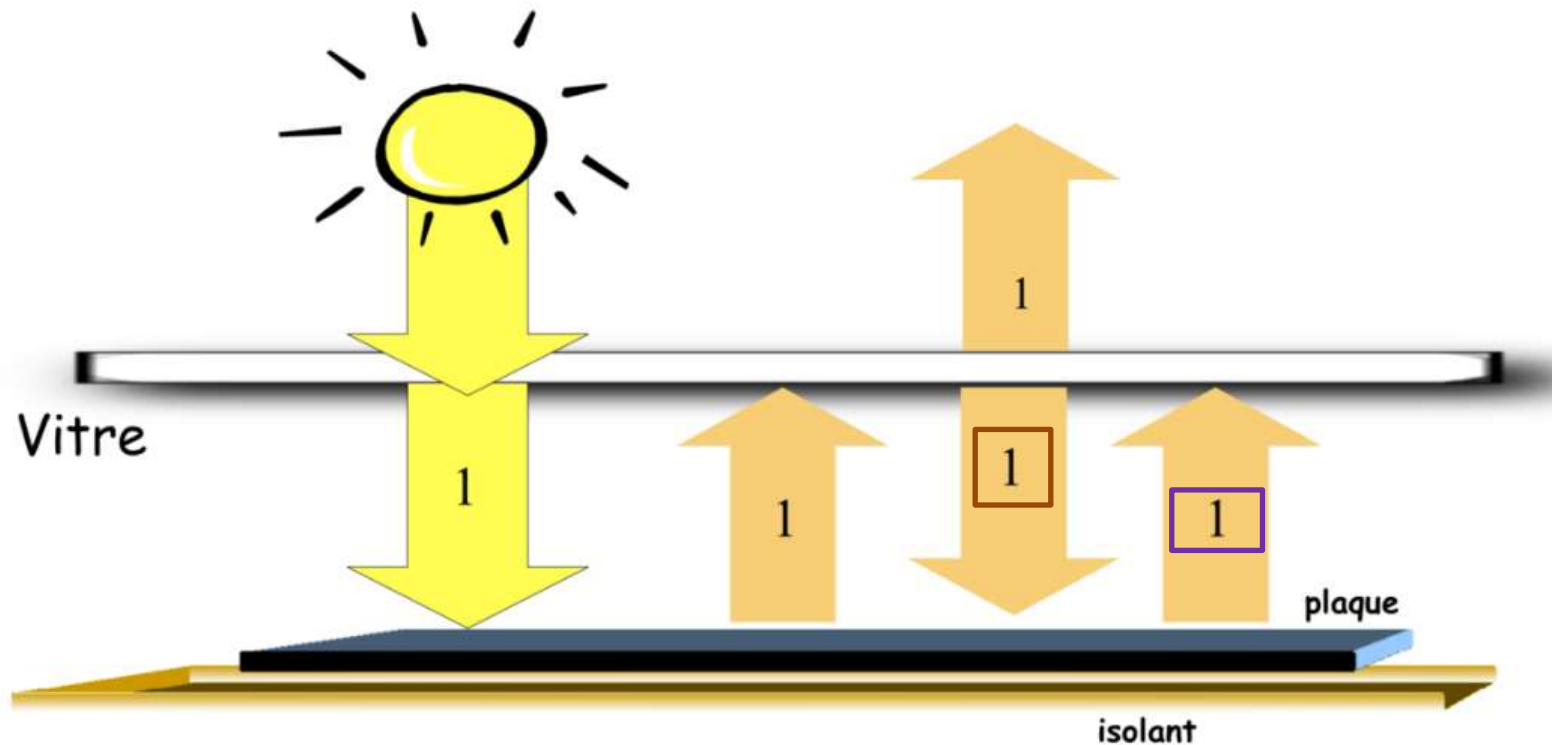
Un modèle pour expliquer l'effet de serre



Ce supplément de rayonnement infrarouge émis par la plaque est absorbé par la vitre, dont la température va augmenter à nouveau jusqu'à ce qu'elle perde autant d'énergie qu'elle n'en reçoit, le rayonnement étant émis moitié vers le haut, moitié vers le bas, etc

La suite des termes $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots$ est une suite géométrique de raison $\frac{1}{2}$, et si on en fait la somme on trouve la valeur 1

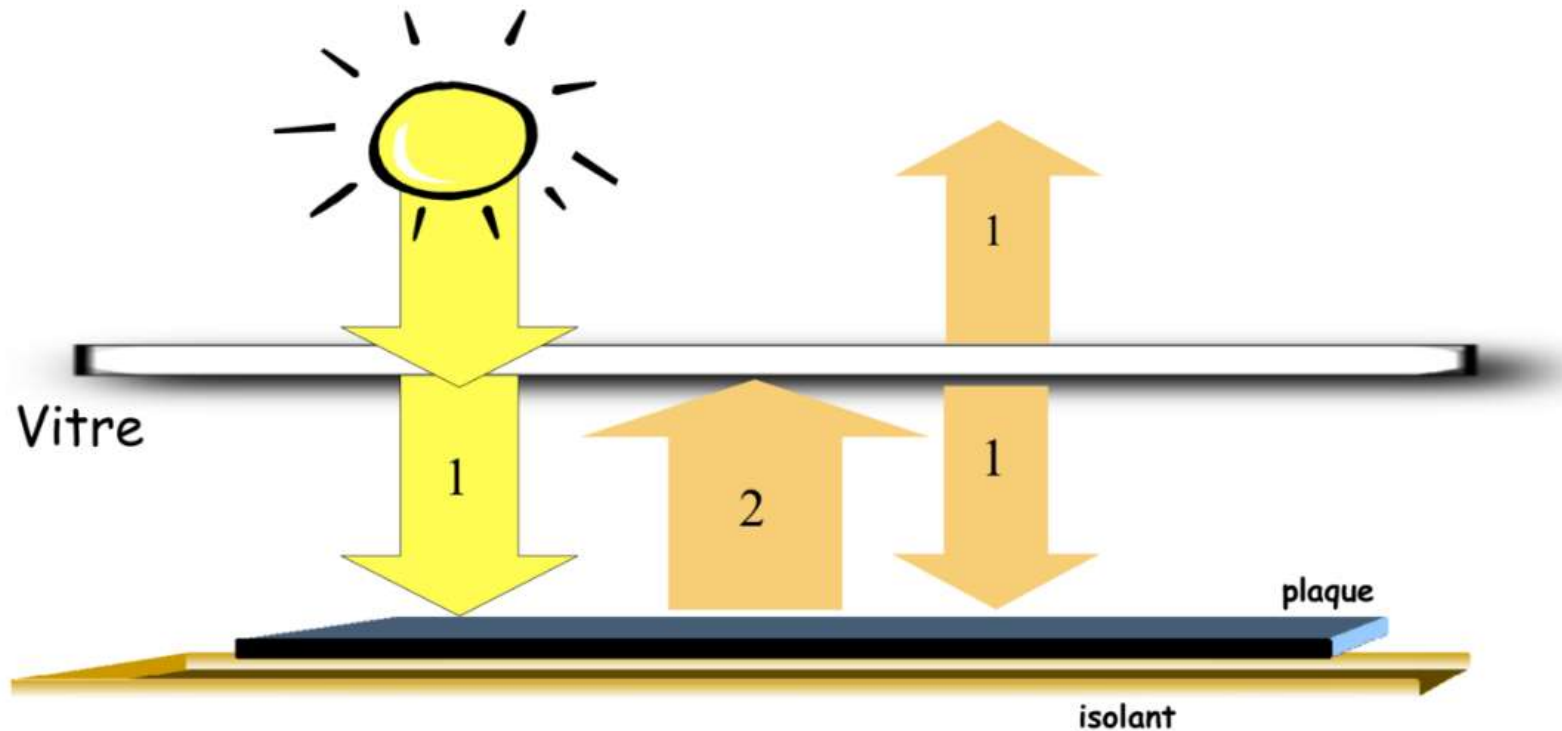
Un modèle pour expliquer l'effet de serre



Ce supplément de rayonnement infrarouge émis par la plaque est absorbé par la vitre, dont la température va augmenter à nouveau jusqu'à ce qu'elle perde autant d'énergie qu'elle n'en reçoit, le rayonnement étant émis moitié vers le haut, moitié vers le bas, etc

La suite des termes $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots$ est une suite géométrique de raison $\frac{1}{2}$, et si on en fait la somme on trouve la valeur 1

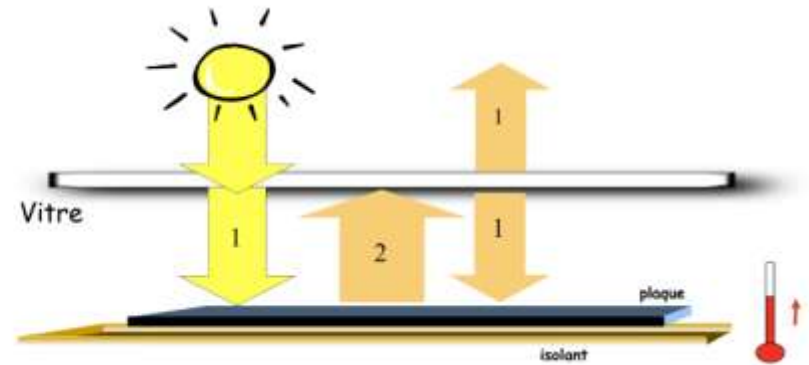
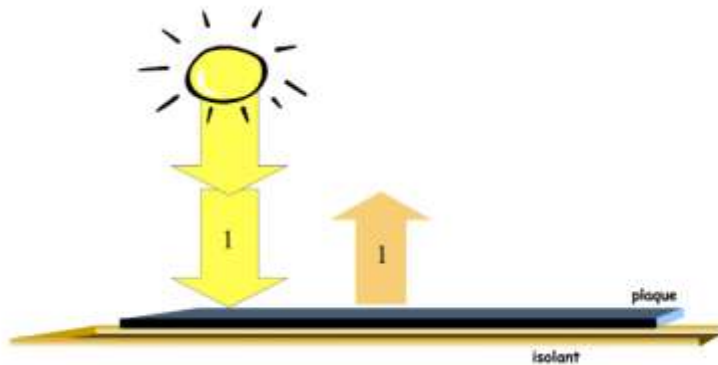
Un modèle pour expliquer l'effet de serre



Ce supplément de rayonnement infrarouge émis par la plaque est absorbé par la vitre, dont la température va augmenter à nouveau jusqu'à ce qu'elle perde autant d'énergie qu'elle n'en reçoit, le rayonnement étant émis moitié vers le haut, moitié vers le bas, etc

La suite des termes $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots$ est une suite géométrique de raison $\frac{1}{2}$, et si on en fait la somme on trouve la valeur 1

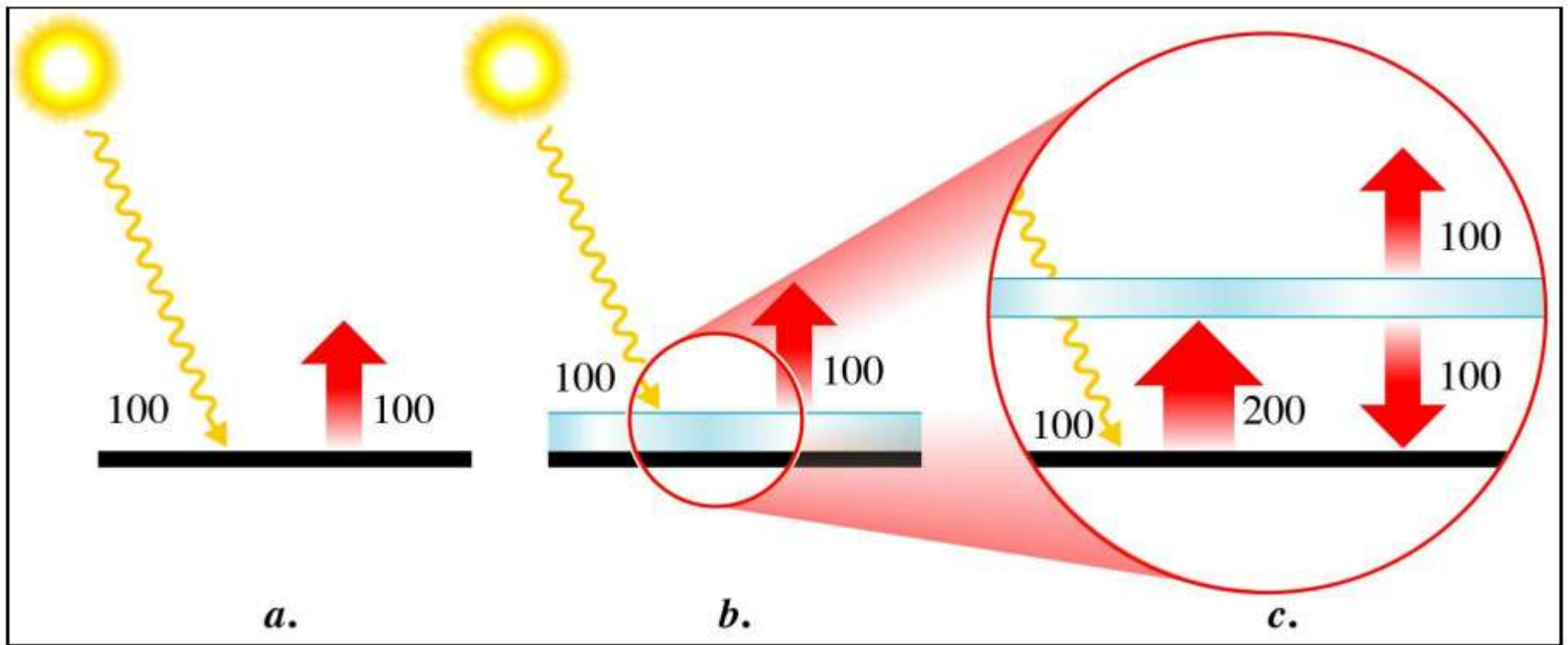
Un modèle pour expliquer l'effet de serre



On retient que placer une vitre au dessus d'une plaque au soleil a pour effet de créer une « résistance au refroidissement » de la plaque par émission de rayonnement infrarouge, et ainsi d'augmenter sa température.

RESUME :

- L'ensemble (vitre + plaque) absorbe une quantité d'énergie donnée, choisie ici arbitrairement comme valant 1. Donc à l'équilibre elle doit perdre 1 (cette même quantité d'énergie).
- Comme la vitre est parfaitement opaque au rayonnement infrarouge, ce n'est pas le rayonnement émis par la surface qui peut s'échapper vers l'espace, seul le rayonnement émis par la vitre peut s'échapper.
- Pour que l'ensemble (vitre + plaque) soit à l'équilibre il faut donc que la vitre émette 1 vers l'espace. Si elle émet 1 vers l'espace, elle émet aussi 1 vers la surface.
- La surface reçoit donc une quantité d'énergie valant 2 (1 provenant du soleil, 1 de la vitre), et pour perdre 2 par émission de rayonnement il faut que sa température soit plus élevée que pour émettre 1 (comme c'était le cas lorsqu'il n'y avait pas de vitre).

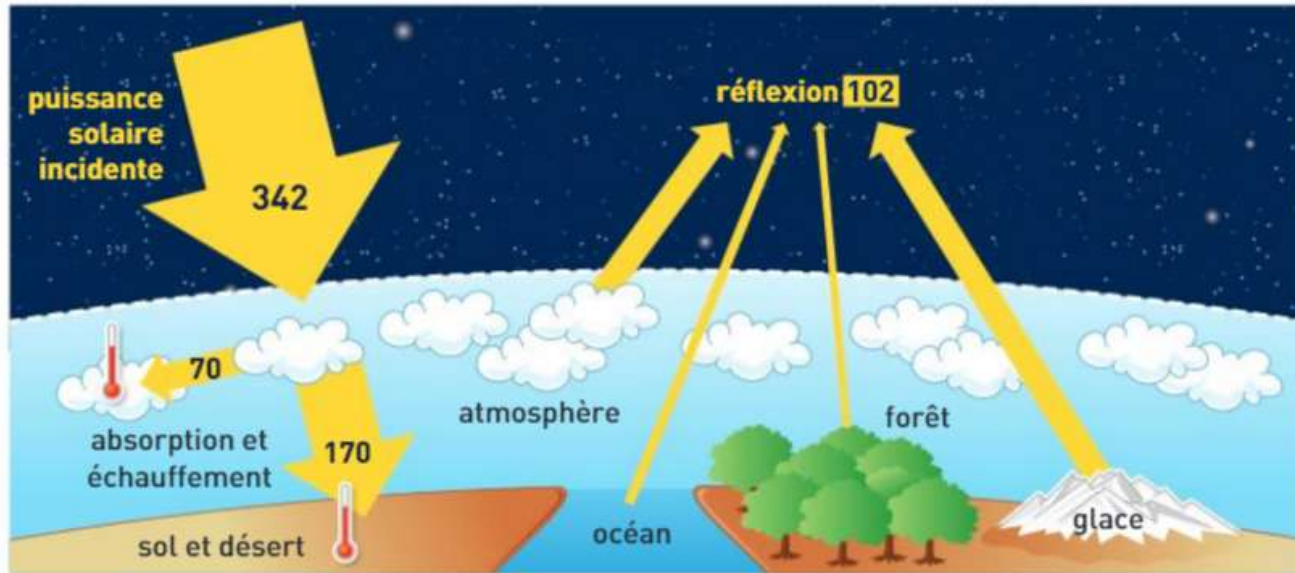


- Si la plaque est seule, elle reçoit et absorbe le rayonnement solaire. Cette puissance absorbée vaut 100 dans une unité arbitraire. À l'équilibre thermique, les puissances reçues et perdues par la plaque sont égales, et la puissance du rayonnement infrarouge émis par la plaque vaut également 100 dans nos unités.
- On recouvre la plaque par une vitre parfaitement transparente au rayonnement solaire et parfaitement opaque au rayonnement infrarouge lointain. À l'équilibre thermique, le système "vitre-plaque" perd comme précédemment autant d'énergie qu'il en gagne. La seule différence est que maintenant c'est la vitre qui a émis le rayonnement infrarouge car, comme elle est parfaitement opaque à ce rayonnement, aucun rayonnement émis par la plaque ne peut être reçu à l'extérieur.
- Regardons maintenant les échanges à l'intérieur du système "vitre-plaque". Si la vitre émet 100 vers l'extérieur, par raison de symétrie elle émet également 100 vers la plaque. Celle-ci reçoit donc en plus du rayonnement solaire le rayonnement infrarouge émis par la vitre. À l'équilibre thermique, la plaque doit perdre par rayonnement infrarouge autant d'énergie qu'elle en gagne, c'est-à-dire 200 dans nos unités. On peut vérifier que la vitre est alors aussi en équilibre : elle reçoit 200 et émet 200 (100 vers l'extérieur, 100 vers la plaque). Ainsi un observateur qui regarde de loin n'est pas capable de savoir si notre plaque est recouverte ou non par une vitre car dans les deux cas il reçoit un même rayonnement infrarouge. La situation de la plaque est très différente puisque dans le cas a., elle émet 100 alors que dans le cas b., elle émet 200. Et cette émission plus importante se fait via une augmentation de la température de la plaque.

- L'absorption de l'énergie solaire par le sol réchauffe la surface de la Terre.
- Or, tout corps chaud réémet un rayonnement électromagnétique dans le domaine des infrarouges vers l'espace (longueur d'onde voisine de $10\text{ }\mu\text{m}$) dont la puissance par unité de surface augmente avec la température.
- En absorbant les infrarouges, les molécules de l'atmosphère s'échauffent et émettent des infrarouges vers l'espace et vers la surface (qui reçoit donc plus d'énergie) : c'est l'effet de serre.

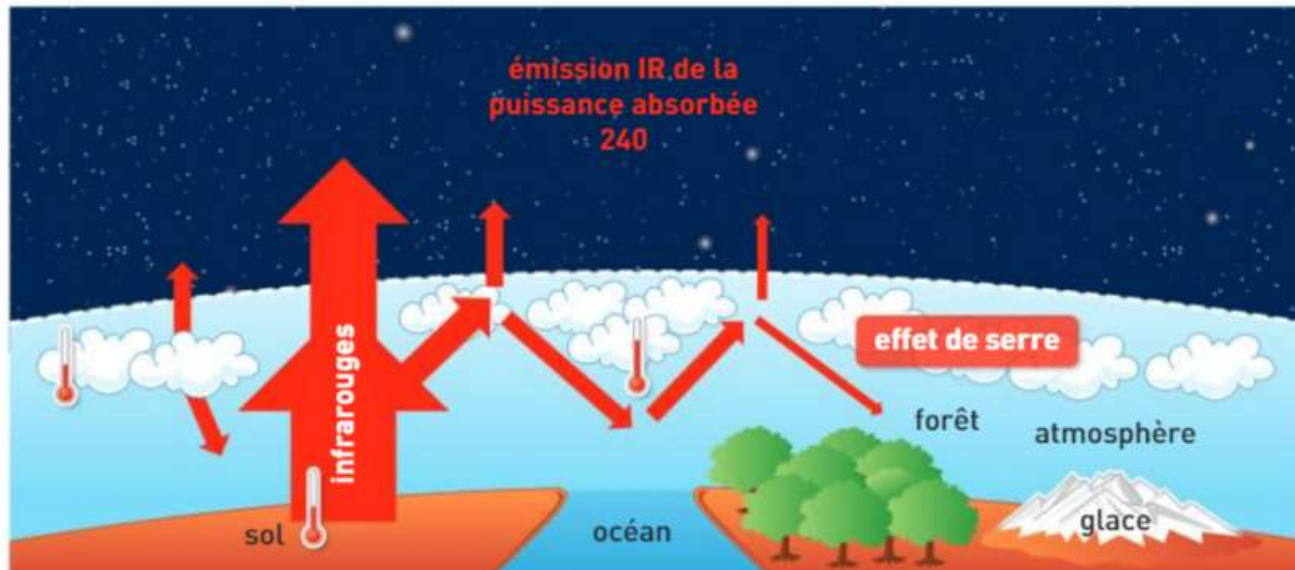
- Le même processus se répète avec des intensités moindres jusqu'à ce que l'ensemble de l'énergie reçue par le sol de la part du Soleil et de l'atmosphère soit renvoyée vers l'espace.
- Les principaux gaz à effet de serre (GES) sont la vapeur d'eau et de CO_2 , respectivement responsables de 50% et 20% de l'effet de serre.

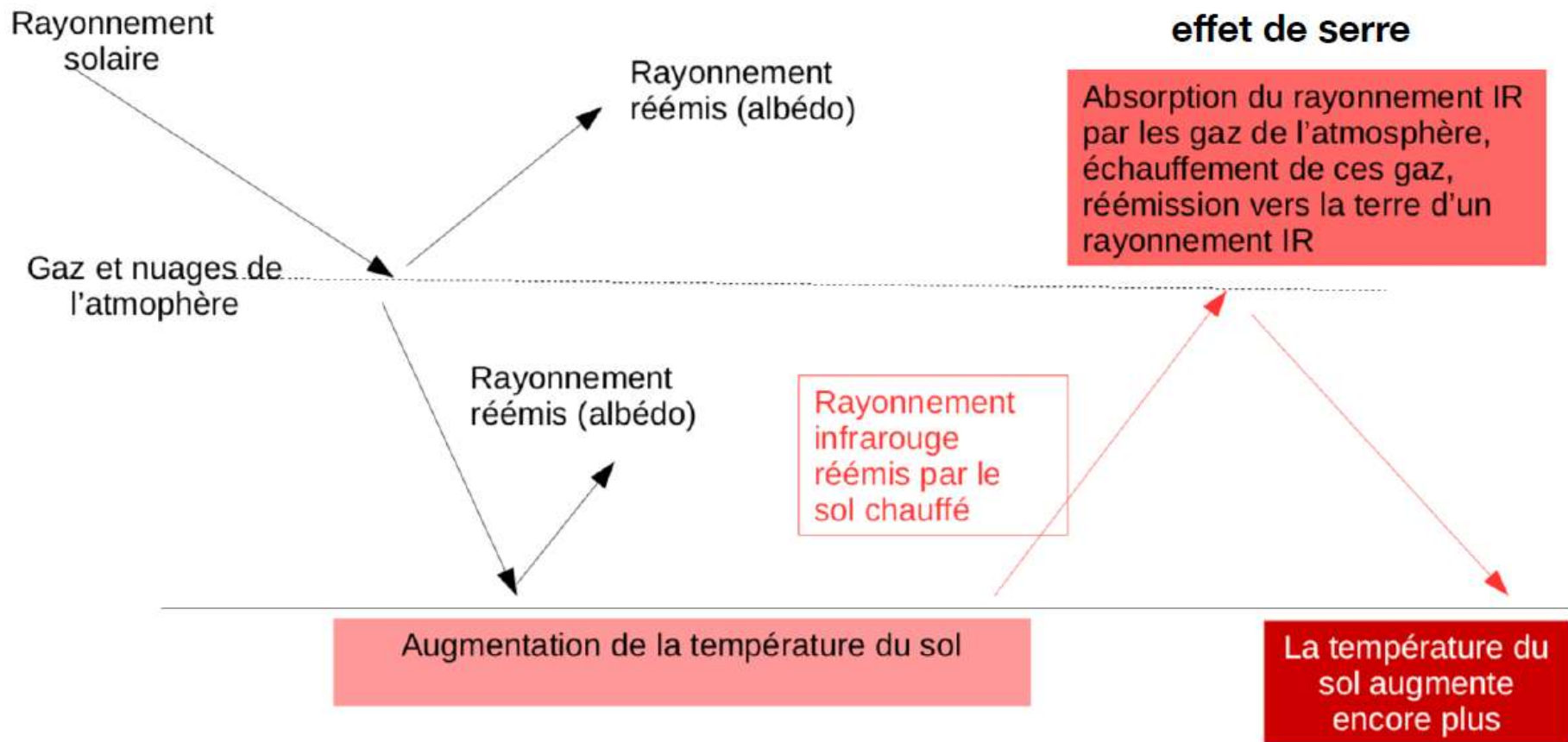
Environ 70 % de la puissance reçue est absorbée.



valeurs moyennes en $W \cdot m^{-2}$

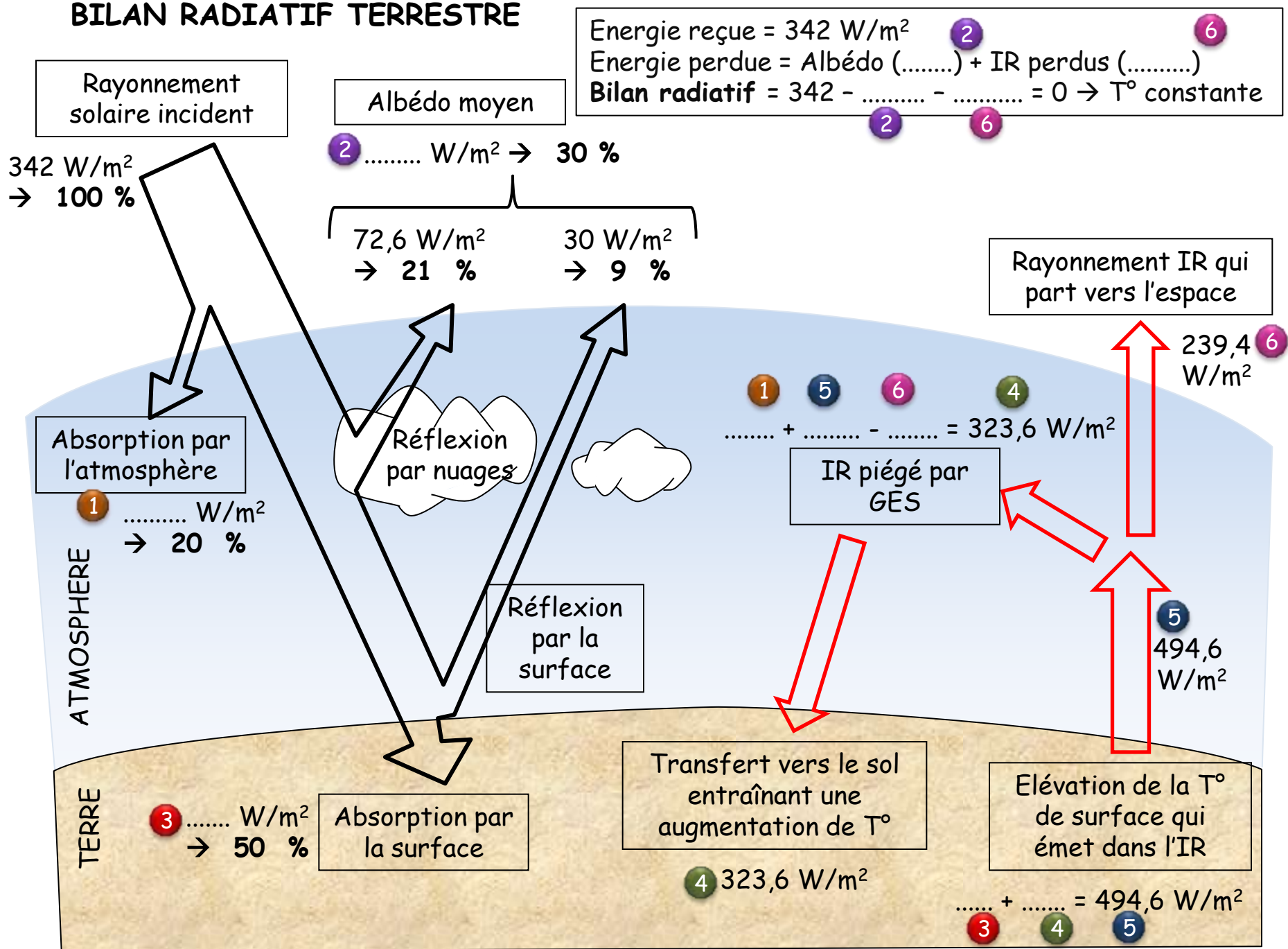
La puissance absorbée alimente l'effet de serre.



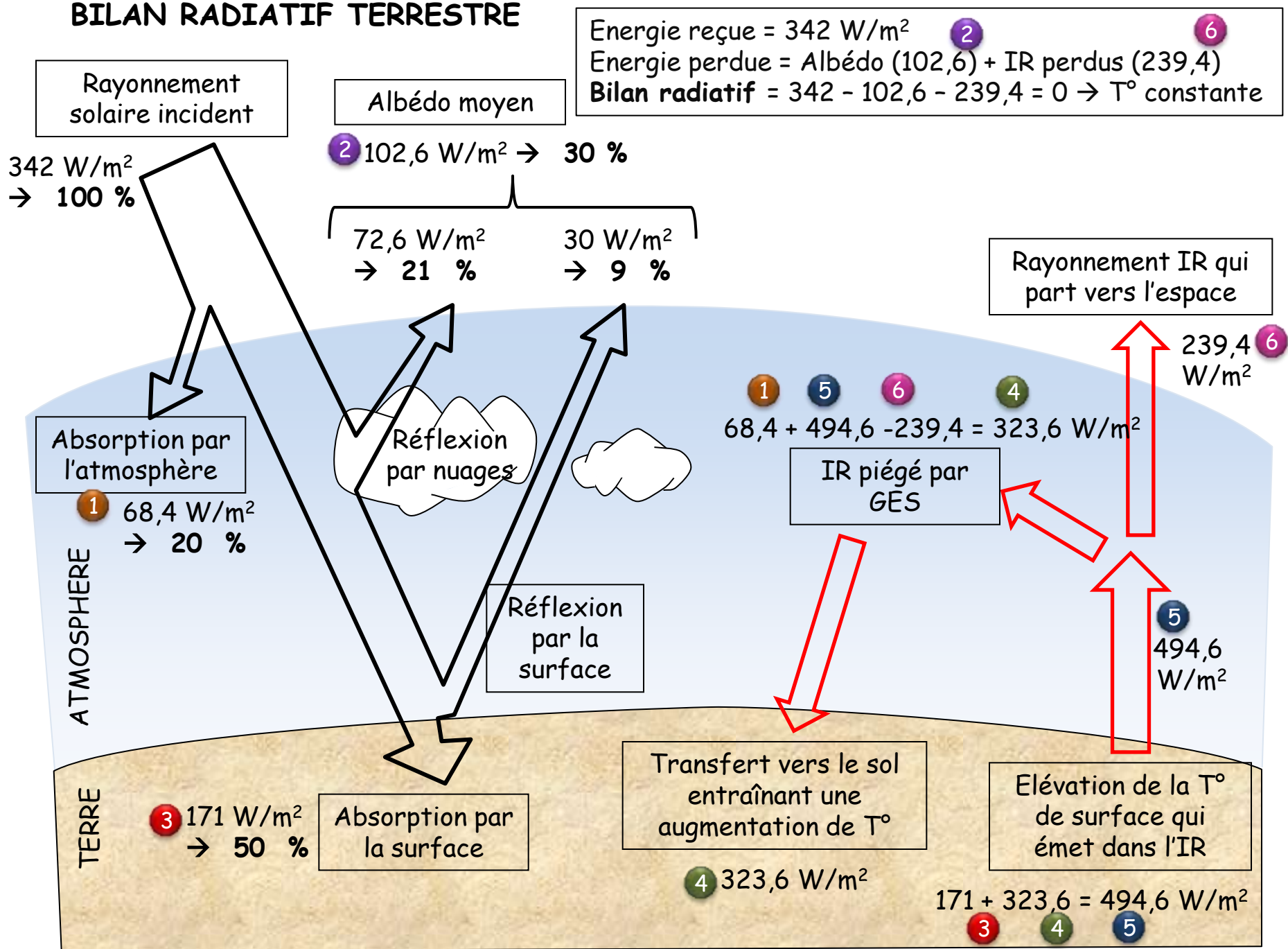


La puissance reçue par le sol en un lieu donné est égale à la somme de la puissance reçue du Soleil et de celle reçue de l'atmosphère. Ces deux dernières sont du même ordre de grandeur.

BILAN RADIATIF TERRESTRE



BILAN RADIATIF TERRESTRE



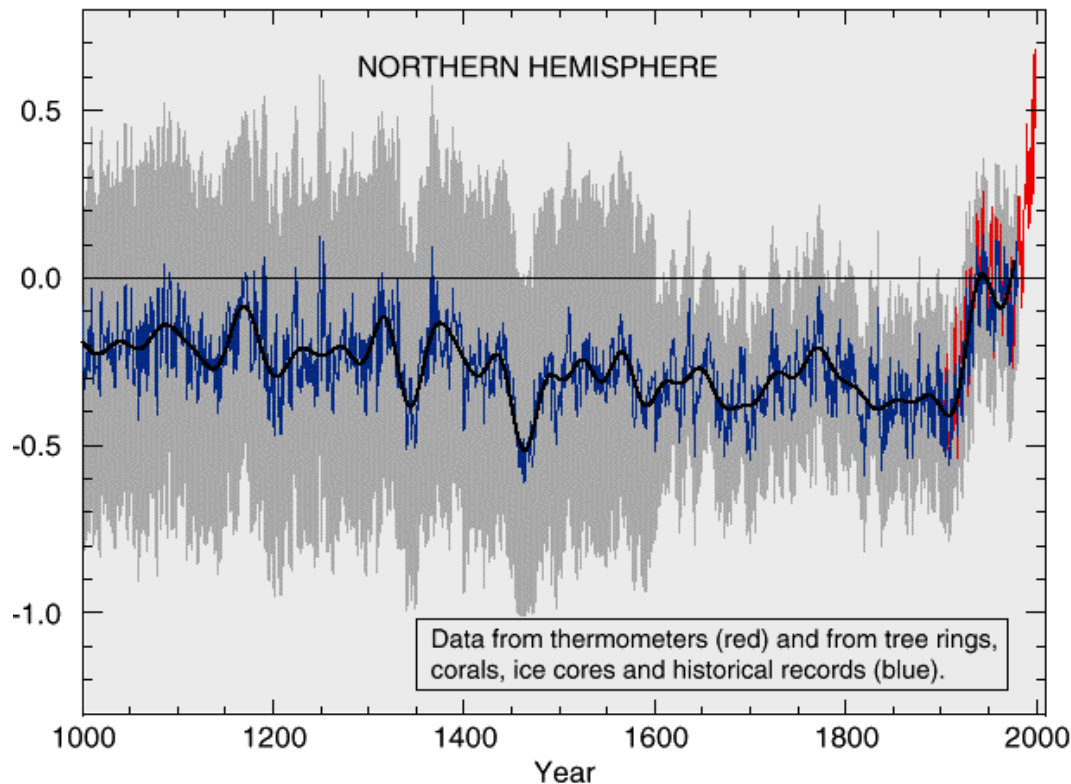
Calcul simplifié du bilan radiatif terrestre

Bilan radiatif = 342 - 102 - 240 → Température constante

puissance
solaire reçue

puissance
renvoyée par
réflexion (albédo)

puissance
réémise par
rayonnement IR



...et demain ?

RW ◀ COP

giec

Groupe d'expertise et de conseil
intergouvernemental sur l'évolution du climat

UNEP
WMO



Forçage



Augmentation des gaz à effet de serre depuis 1800



Augmentation de la température mondiale de 1°C



Fonte des glaces en Arctique



Diminution de l'albédo

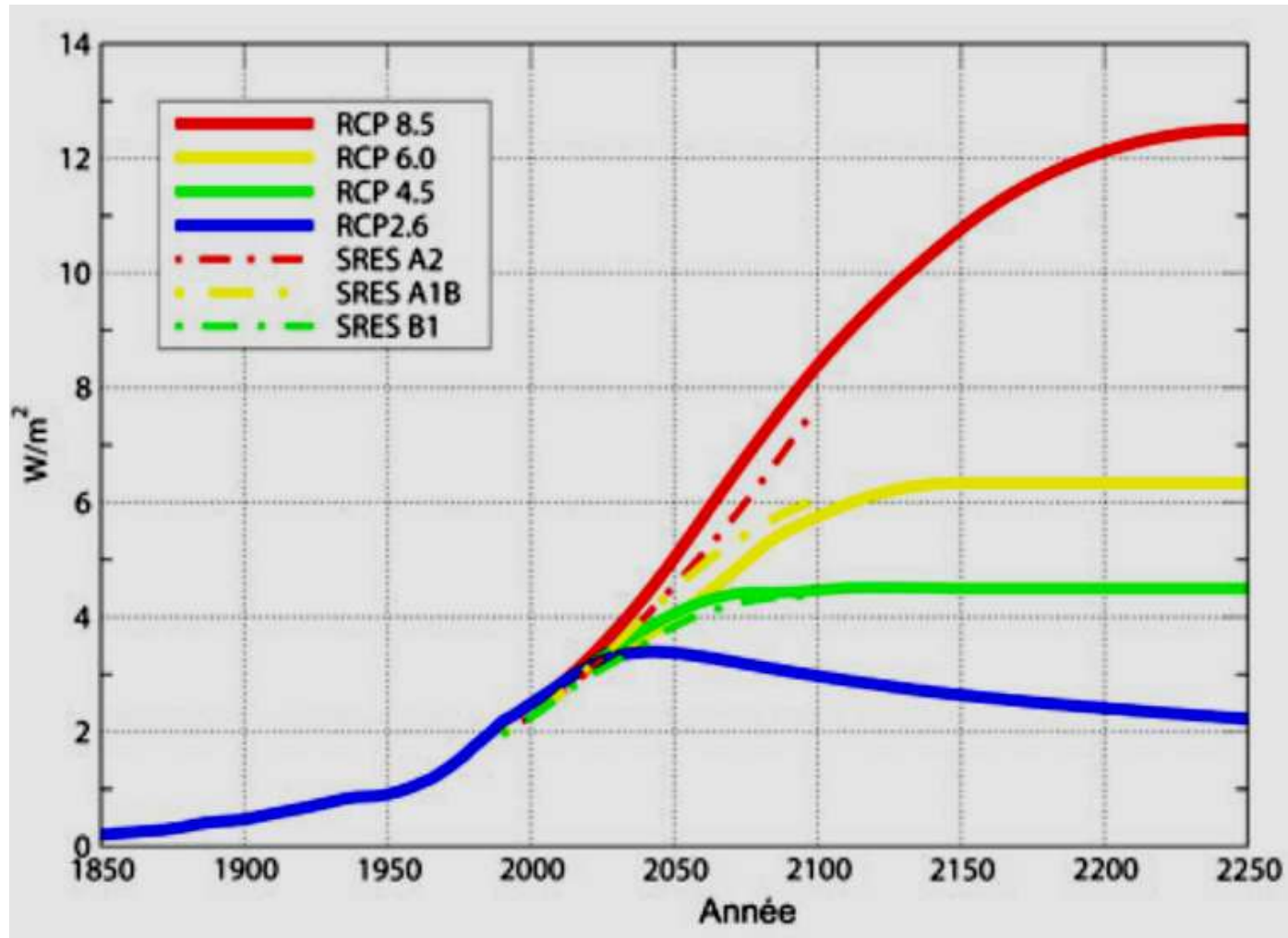


Diminution de la puissance du rayonnement diffusé vers l'espace



Rétroaction

Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m^2 sur la période 1850-2250 selon les différents scénarios du GIEC



Après 2006, les traits continus correspondent aux nouveaux scénarios dits RCP (Representative Concentration Pathways) et les traits pointillés aux scénarios des rapports 2001 et 2007 du GIEC.

— NATIONS UNIES —
ACCORD DE PARIS
SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
CÉRÉMONIE DE SIGNATURE
— 22 AVRIL 2016 —



Accord sur le climat : les points clés

Températures

2100



- Contenir le réchauffement « **bien en deçà de 2°C** ».
- **Poursuivre l'action menée** pour limiter l'élévation des températures à **1,5°C** »

Financement

2020-2025



- Les pays riches doivent fournir **100 milliards de \$/an** à partir de 2020, un « **plancher** »
- **Nouvel objectif chiffré** « d'ici 2025 »

Différenciation



- Les pays développés **doivent continuer de « montrer la voie »** en matière de réduction de GES*
- Les pays en développement doivent « **accroître leurs efforts d'atténuation** » en fonction de leur situation

Objectif d'émissions

2050



- **Plafonnement des émissions de GES « dans les meilleurs délais »**
- À partir de 2050 : **réductions rapides pour un équilibre entre émissions dues à l'Homme et celles absorbées par les puits de carbone**

Partage des efforts



- **Les pays développés doivent apporter des ressources financières pour aider les pays en développement**

Les autres pays sont invités à fournir
• un soutien «à titre volontaire»

Mécanisme de révision 2025



- **Révision tous les 5 ans**
Premier bilan obligatoire en 2025
- *Chaque révision représentera une progression par rapport à la précédente*

Pertes



- *Pour aider les pays vulnérables, il est nécessaire d'éviter, minimiser et prendre en compte les pertes dues au réchauffement*

*Gaz à effet de serre © **AFP**

IV. Le bilan radiatif terrestre global, à l'équilibre, permet le maintien d'une température constante de $+15^{\circ}\text{C}$, compatible avec la vie. Tout paramètre susceptible de faire varier cet équilibre (forçage) peut conduire à une modification de cette température moyenne

1. On dresse le bilan radiatif terrestre en faisant la différence entre l'énergie reçue par la Terre (depuis le Soleil et l'atmosphère) et l'énergie réémise vers l'espace (albédo + rayonnement IR).

2. Cette différence, sur une courte période de temps, est nulle : le bilan est à l'équilibre. La température moyenne au sol est ainsi constante (+ 15°C)

3. En cas de modification d'un des paramètres (variation de l'énergie incidente, de l'albédo ou de l'effet de serre), l'équilibre est alors modifié et tend vers une nouvelle température d'équilibre. Il s'agit donc d'un équilibre dynamique.

Vocabulaire :

- Puissance solaire** : quantité d'énergie libérée par le Soleil par unité de temps. Elle s'exprime en watts (W).
- Albédo** : Rapport entre l'énergie lumineuse réfléchie par une surface et l'énergie lumineuse reçue par cette même surface (nombre de 0 à 1, ou de 0 à 100%).
- Effet de serre** : Phénomène naturel de réchauffement de la surface de la planète, provoqué par des gaz de son atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol.
- Gaz à effet de serre** : Gaz de l'atmosphère capables d'absorber le rayonnement IR émis par la surface de la Terre ou par l'atmosphère elle-même.
- Rayonnement infrarouge** : Rayonnement électromagnétique situées dans une gamme de longueurs d'onde allant de 700nm à 1mm
- Bilan radiatif** : Différence entre la puissance reçue par la planète et celle réémise par l'espace.
- Réflexion** : un rayonnement électromagnétique est réfléchi lorsqu'il est renvoyé dans une direction privilégiée après une interaction avec la surface qui le reçoit.
- Diffusion** : Un rayonnement électromagnétique est diffusé lorsqu'après une interaction avec la surface qui le reçoit, il est émis dans diverses directions.
- Absorption** : lorsqu'un rayonnement électromagnétique est absorbé, il y a un transfert d'énergie entre le rayonnement et la matière qui reçoit ce rayonnement.