

Atelier effet de serre



Formascience 2021

Olivier Dequincey & Patrick Thollot
ENS de Lyon

Introduction : objectifs

- Constat : la **modélisation analogique** de l'effet de serre est **très difficile**.

De nombreuses manip qui circulent, permettant de montrer une augmentation de température, **ne montrent pas l'effet de serre** comme il agit sur Terre.

- Revenir aux fondamentaux des **interactions rayonnement / matière** permet de faire des manip simples et scientifiquement robustes avec des paramètres fixes, un variable, des témoins, etc.

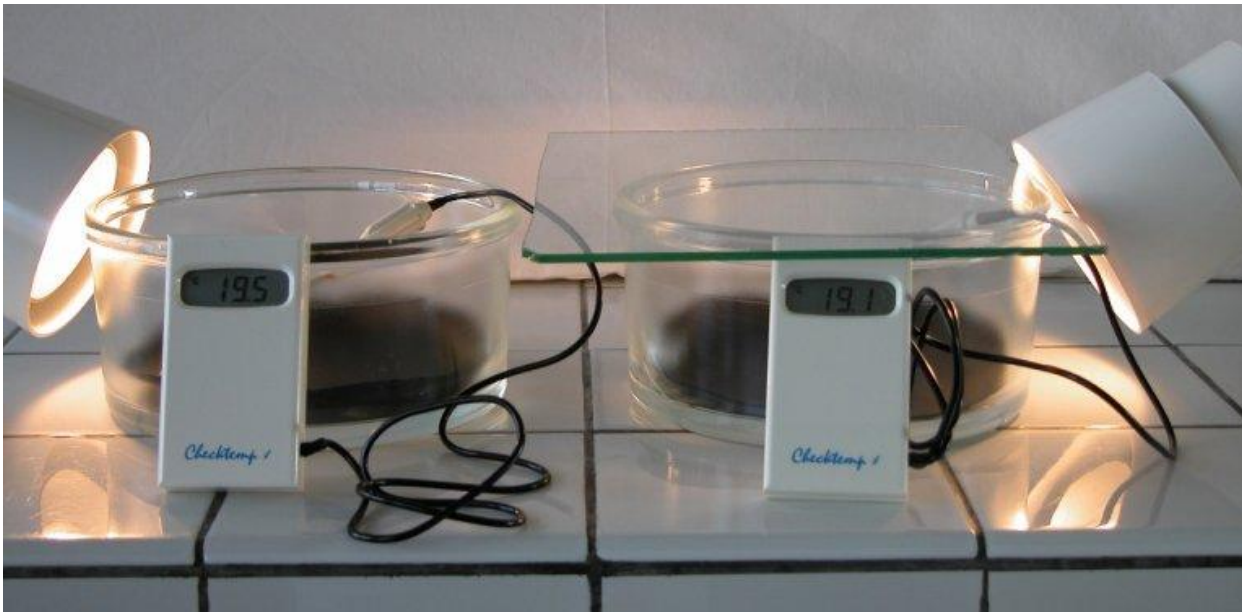
Ces manip touchent directement aux notions de **rayonnement** thermique, d'**équilibre thermique**, de **transparence** et d'**opacité** aux rayonnements (sur des matériaux condensés)

- Passer à l'effet de serre terrestre demande l'effort supplémentaire de transposer ces notions au **sol** et à l'**atmosphère** en considérant l'équilibre thermique vis à vis du rayonnement dans le cadre d'un **modèle uniquement radiatif** (donc simplifié !)

On peut ensuite utiliser ce modèle pour comprendre les observations du rayonnement terrestre vu de l'espace.

Enfin on peut introduire l'augmentation du CO₂ afin de prédire ses conséquences !

Des manip qui ne fonctionnent pas...

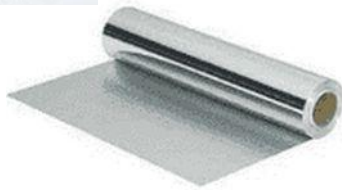


Retour aux fondamentaux

Impossible de comprendre l'effet de serre si on n'a pas compris les bases des **interactions rayonnement / matière**

- Face à un **rayonnement**, un matériau peut être **transparent** ou **opaque** et alors **absorber** ou **réfléchir**. Ces propriétés **dépendent de la longueur d'onde** du rayonnement.
- On va observer cela sur des **solides** courants. On transposera à l'atmosphère en « évitant » la physique plus complexe des interactions rayonnement / gaz
- Pour simplifier on va comparer **rayonnement visible** (lumière du Soleil, d'une lampe fluo ou led qui l'imité) et **rayonnement infrarouge « thermique »** (émis par un corps « chaud », entre température ambiante et 100°C)
- Des matériaux courants sont utilisés aux propriétés différentes :

Matériaux utilisés



Matériau	Visible	Infrarouge thermique
Sac à congélation (PE basse densité)	Transparent	Transparent
Plexiglass (PMMA)	Transparent	Opaque (absorbe : à montrer)
Sac poubelle noir (PE)	Opaque (noir = absorbe)	Transparent
Papier aluminium	Opaque (réfléchit)	Opaque (réfléchit : à montrer)

Matériel d'observation

- Une caméra hybride visible / thermique de marque Seek thermal SQ-AAA (env. 800€). Existe en versions à moindre résolution thermique (600€)
- La marque FLIR propose des caméras similaires ou des modules pour smartphone Android ou Apple à moins de 400 € (à brancher sur le connecteur du smartphone)
- D'autres appareils moins chers existent mais ne permettent pas forcément d'extraire des vidéos (pour professionnels : isolation thermique, etc.)
- Et des yeux !



Ce type de caméra thermique a 2 objectifs et 2 capteurs coalignés : un visible, classique, à assez bonne résolution (au moins 640x480 pixels) et un thermique à résolution moindre (au moins 80x60, 320x240 pour la SQ-AAA utilisée ici) qui permet de « coloriser » l'image visible, conservant ainsi les détails morphologiques sous l'information thermique donnée par la coloration.

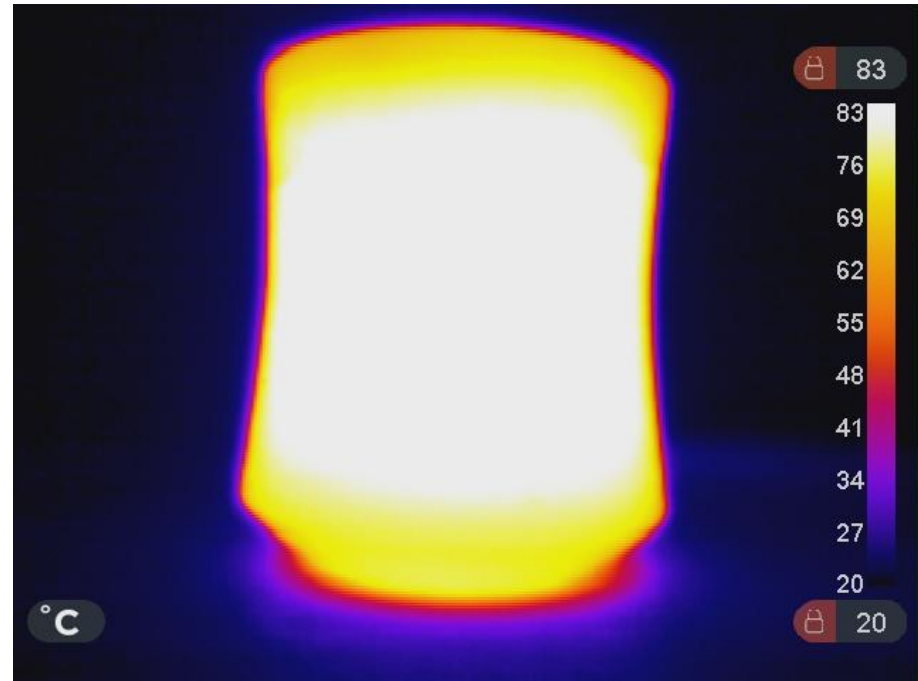
Attention : le capteur thermique ne fonctionne pas comme le capteur visible, qui « compte » les photons reçus par effet photoélectrique. C'est une matrice de petites thermistances qui s'équilibrent très vite en température avec le rayonnement infrarouge reçu (on parle aussi de microbolomètres). C'est la résistance électrique des capteurs qui est mesurée et traduite en température. On ne « voit » donc pas vraiment les photos infrarouges reçus...

Les manipulations (1)

- Manip 1 : **comportement individuel des matériaux : opacité et transmission.**
Principe : une tasse remplie d'eau chaude à $\approx 90^{\circ}\text{C}$ (bouilloire portée à ébullition) est observée avec le capteur visible ou thermique et on fait passer les matériaux devant.
Si la tasse est cachée le matériau est opaque, sinon il est transparent.

Lien **local**

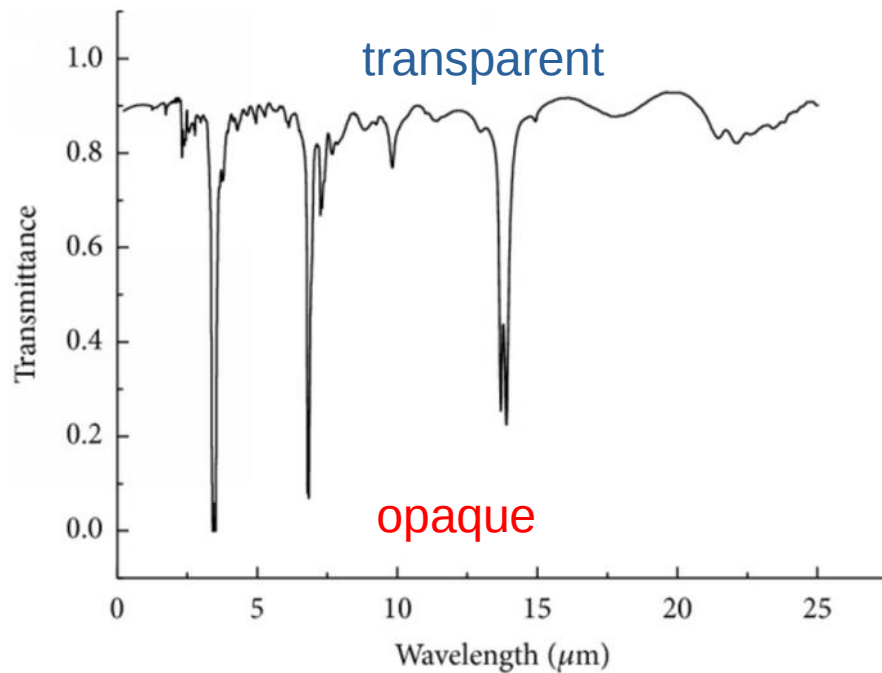
Lien web : https://youtu.be/ZhJC_4zOFao



Les manipulations (1)

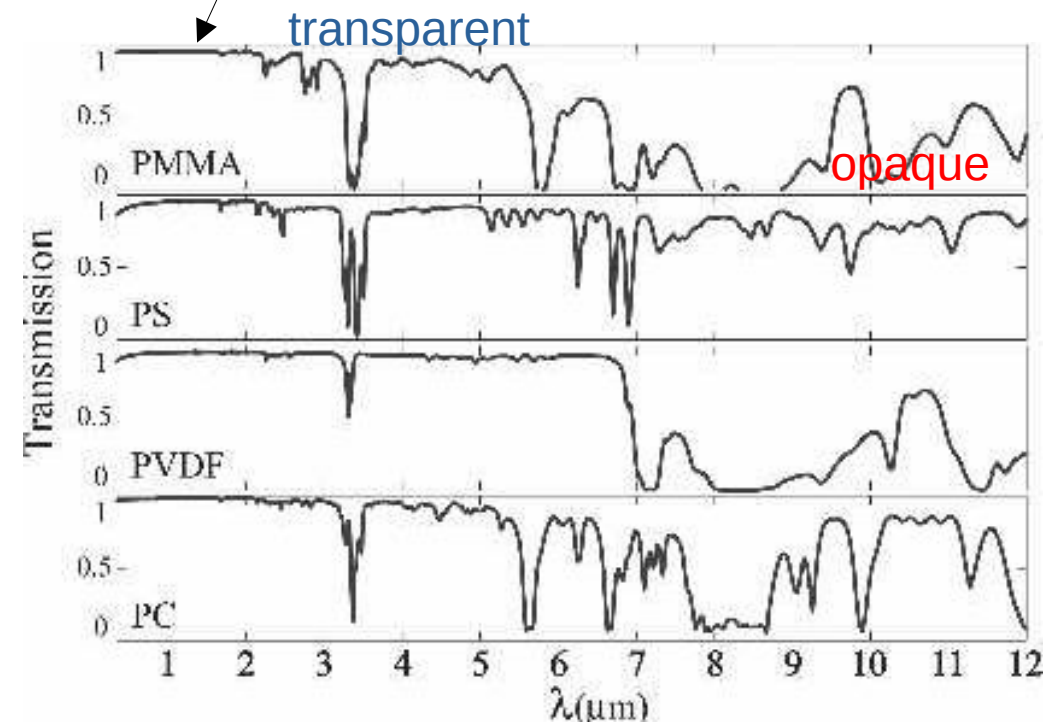
Les spectres de transmittance quelques matériaux utilisés

Polyéthylène
(sac plastique)



Plexiglass (PMMA)

et autres plastiques
(PolyStyrène – proche du PE,
PolyVinylèneDiFluor,
PolyCarbonate)



IR thermique

IR thermique

Les manipulations (2)

- Manip 2 : interactions entre objet chaud et matériaux : réflexion et absorption

Lien **local**

Lien web : <https://youtu.be/JKOkIxAUgc4>

Principe : la même tasse chauffée par de l'eau à $\approx 80^\circ\text{C}$ placée près de 2 parois : en *plexiglass* et en *papier aluminium*.

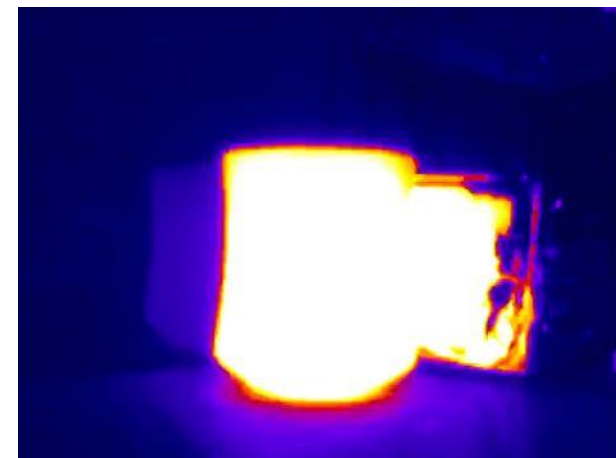
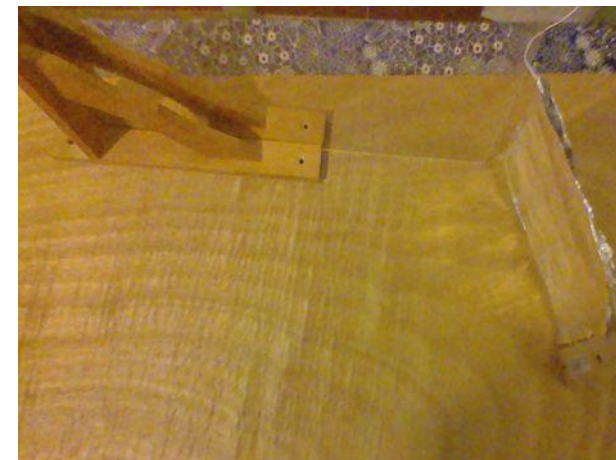
Observation avec le capteur visible ou thermique.

On place la tasse d'un côté de ces parois afin d'observer *devant* ce qui est réfléchi et *derrière* ce qui est transmis (ou non). De devant (0:40) : le plexiglass ne réfléchit pas (ou très peu), l'aluminium oui. De derrière (1:00) : plexiglass ne transmet pas, l'aluminium non plus.

Après 2 minutes (et plus) : un rayonnement thermique apparaît *derrière* le plexiglass (2:48), mais pas derrière l'aluminium (2:30). Si on retire la tasse (3:15), le rayonnement thermique *derrière* le plexiglass persiste. Il est aussi visible *devant* (3:50). Il n'est donc pas transmis mais propre : le plexiglass a **absorbé** le rayonnement de la tasse et chauffé, contrairement à l'aluminium qui l'a **réfléchi**. (la table a d'ailleurs fait de même sous la tasse)

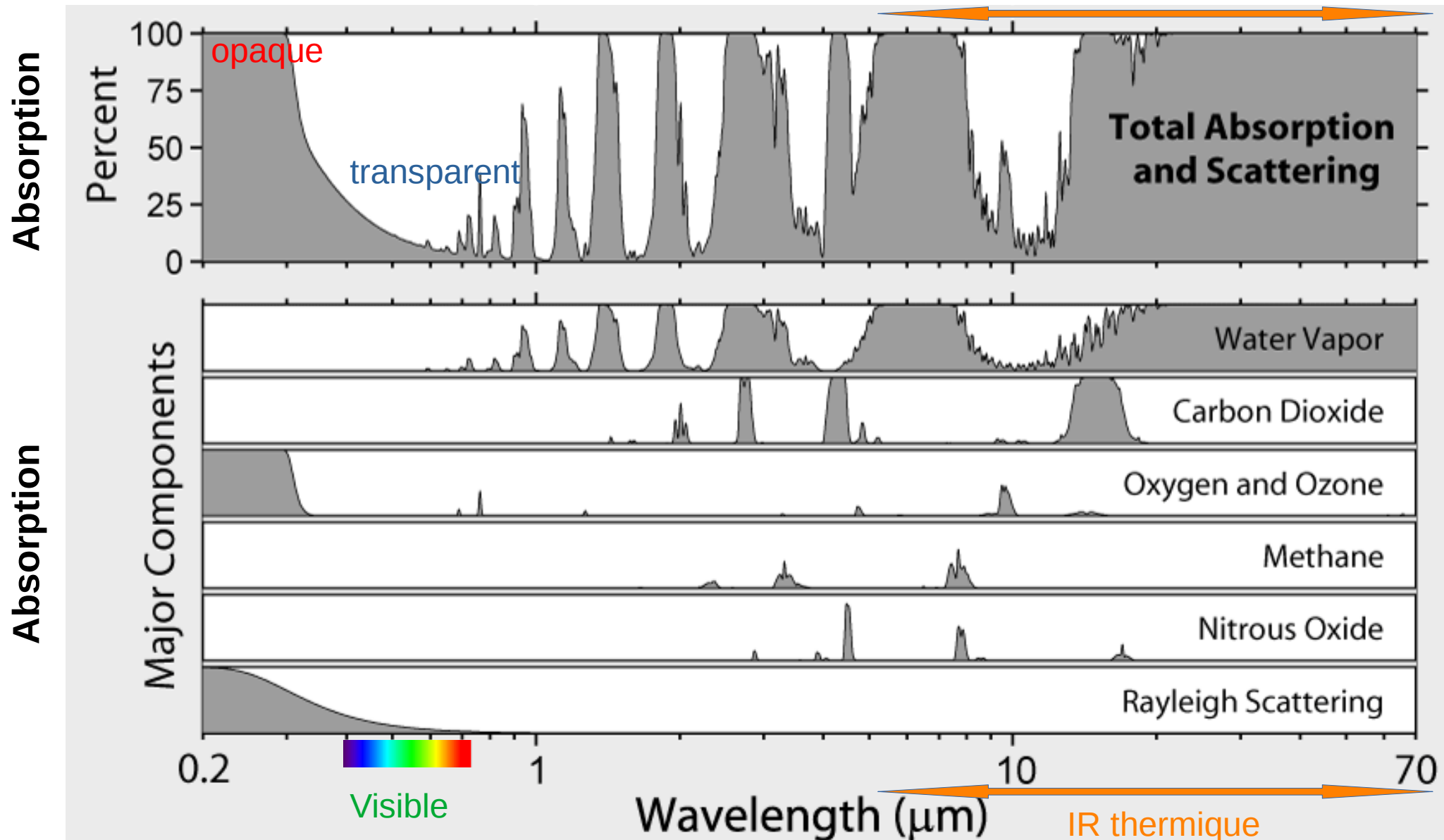
Conclusion : un corps opaque qui **absorbe** du rayonnement thermique chauffe et en **émet** à son tour (et un corps qui ne chauffe pas réfléchit ou transmet le rayonnement).

On approche ainsi la loi du rayonnement de Kirchhoff : à l'équilibre thermique les flux d'absorption et d'émission sont égaux.



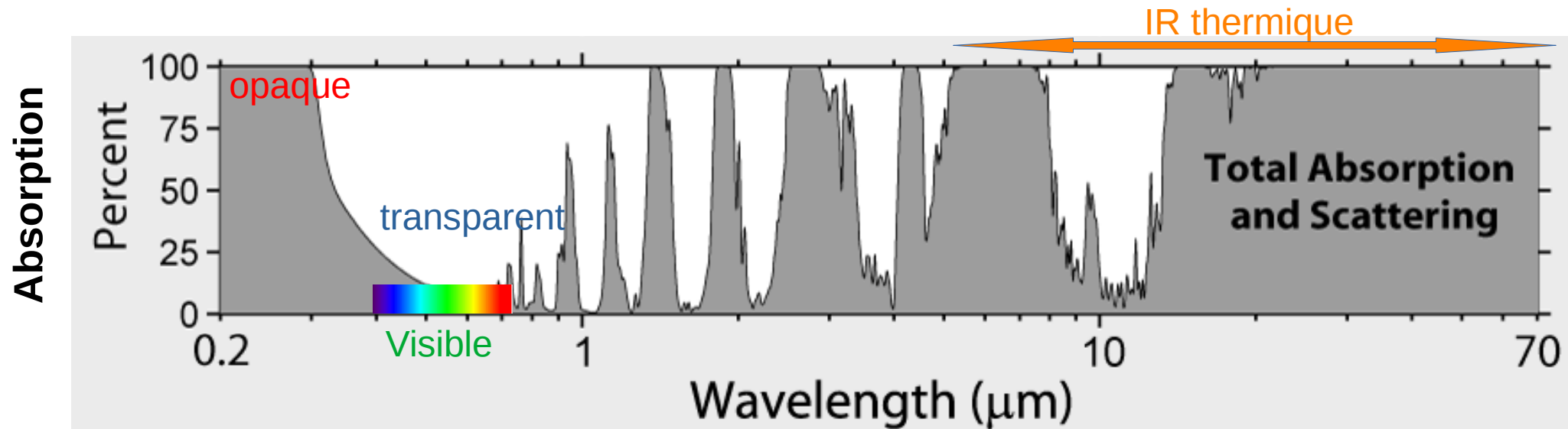
Dans l'atmosphère terrestre : opacité et transparence

Absorptions totales et décomposées par gaz



Dans l'atmosphère terrestre : opacité et transparence

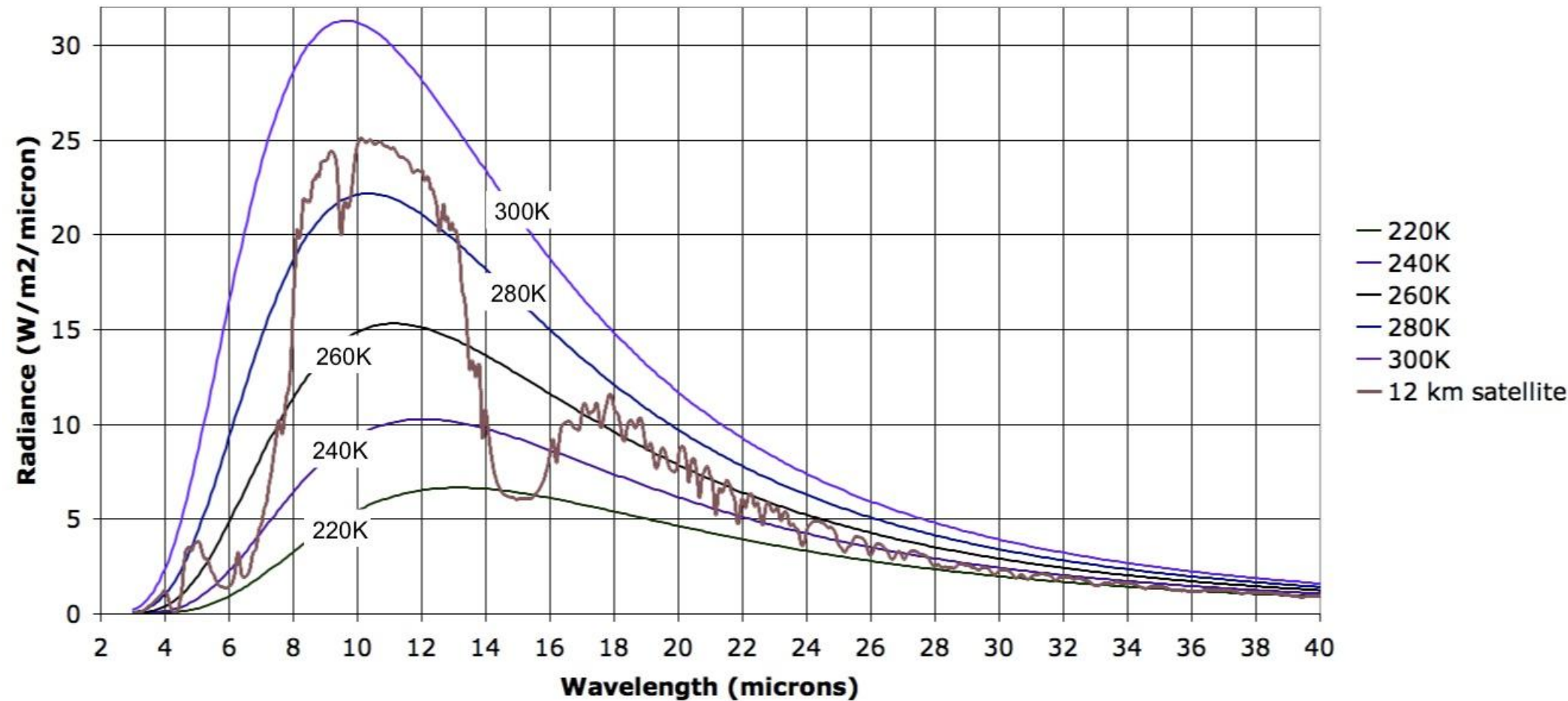
Absorptions totales et décomposées par gaz



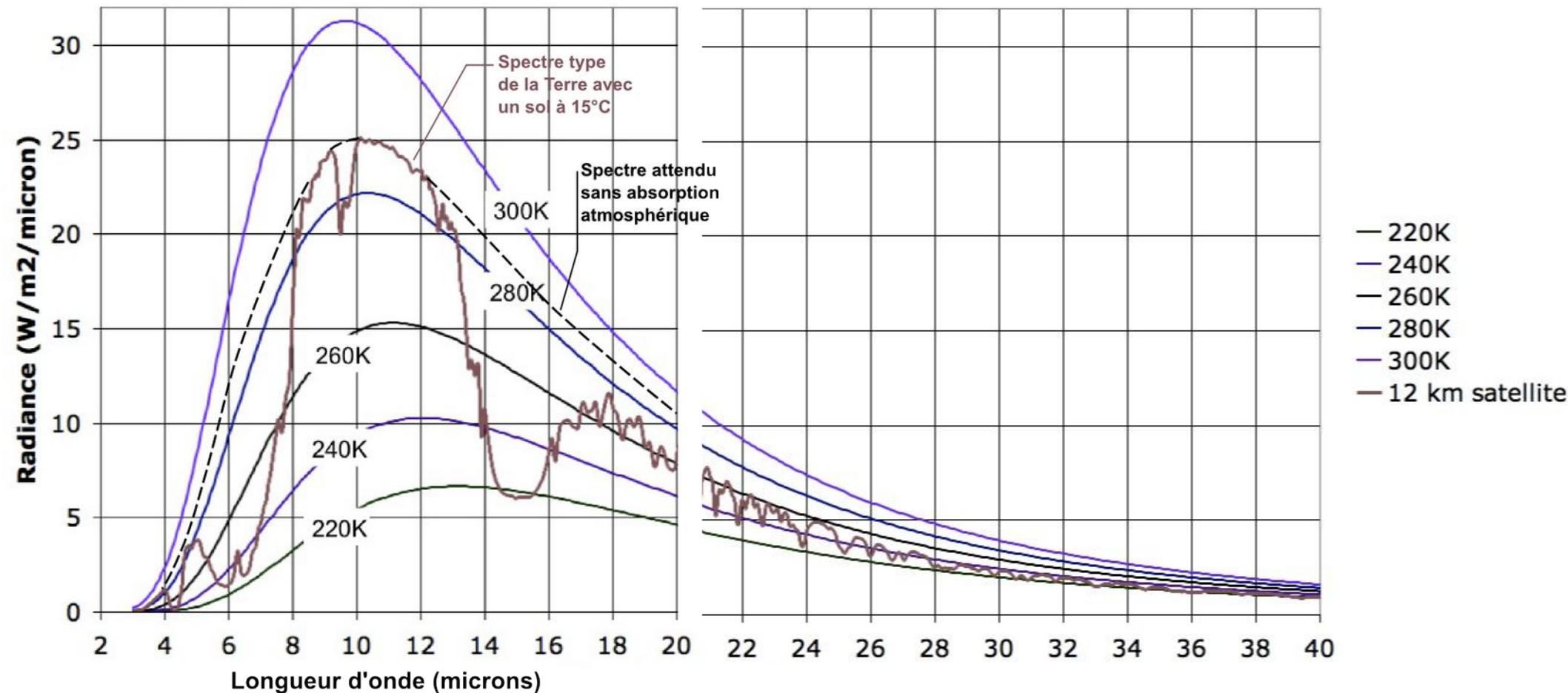
L'atmosphère terrestre se rapproche du comportement du plexiglass : **transparente au visible, opaque aux infrarouges** « thermiques » ($> 3-4 \mu\text{m}$) *sauf vers 8-13 μm où elle est transparente aux infrarouges.*

On parle de « fenêtre » infrarouge. Par analogie avec une fenêtre qui est une zone dans l'espace (dans un mur...) transparente au visible, cette fenêtre infrarouge est une gamme de longueur d'onde transparente aux infrarouges : c'est bien une fenêtre, mais dans une dimension *spectrale* et non *spatiale*.

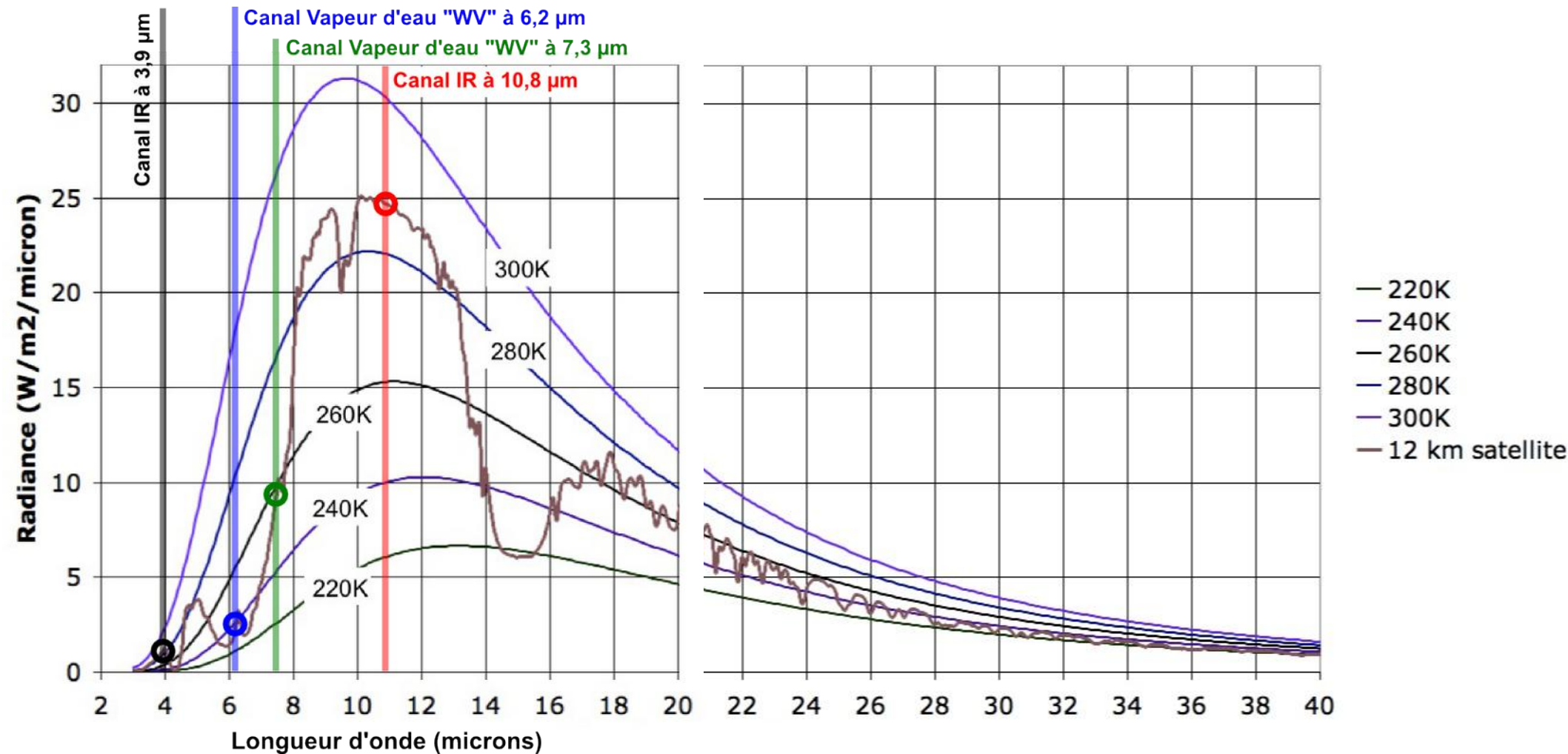
Spectre d'émission terrestre comparé au spectre du corps noir



Spectre d'émission terrestre comparé au spectre du corps noir



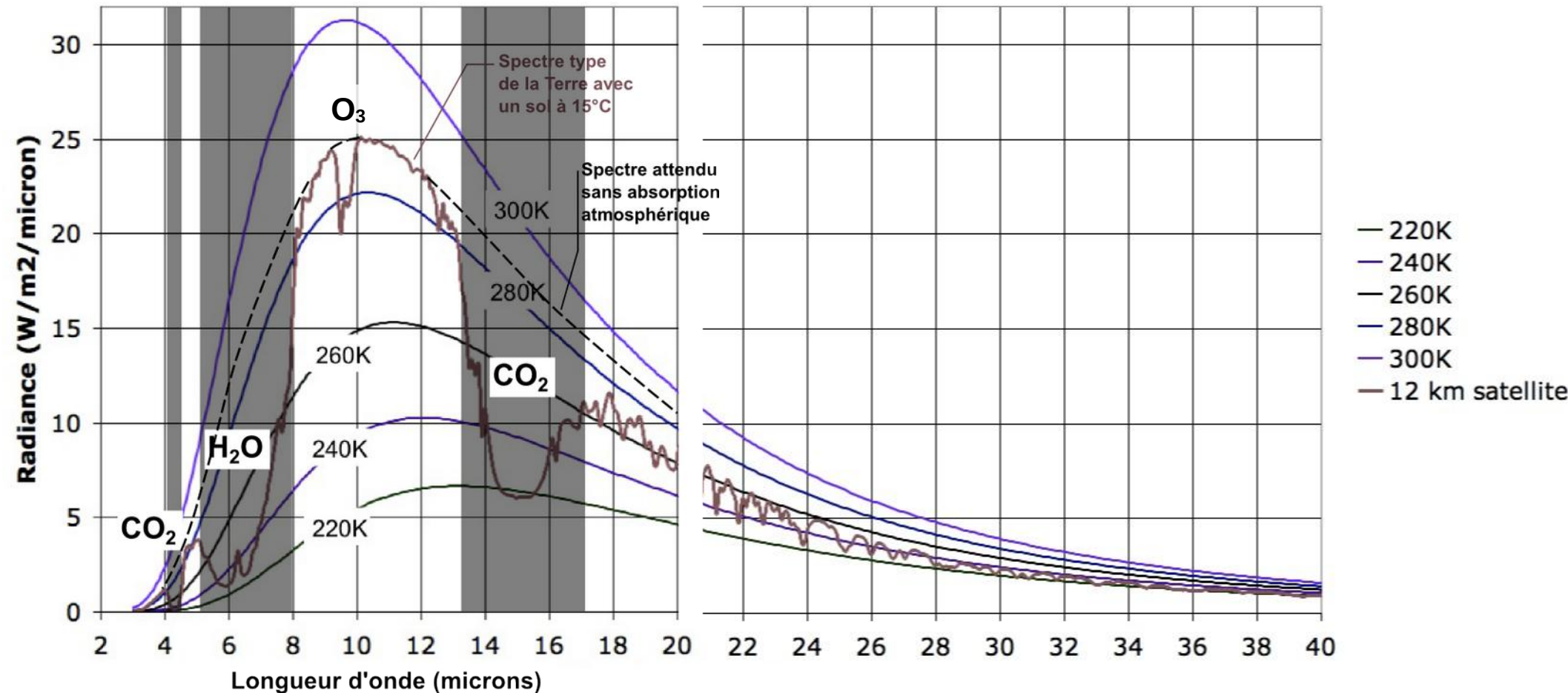
Spectre d'émission terrestre comparé au spectre du corps noir



Spectre d'émission terrestre comparé au spectre du corps noir



Les molécules qui opacifient l'atmosphère dans les infrarouges, H₂O et CO₂ en tête sont par définition les **gaz à effet de serre (GES)**.



Spectre d'émission terrestre

Un spectre moyen cache de grandes disparités !

Données *Nimbus 4* en nombre d'onde (à gauche) et « miroir » en longueur d'onde (à droite)

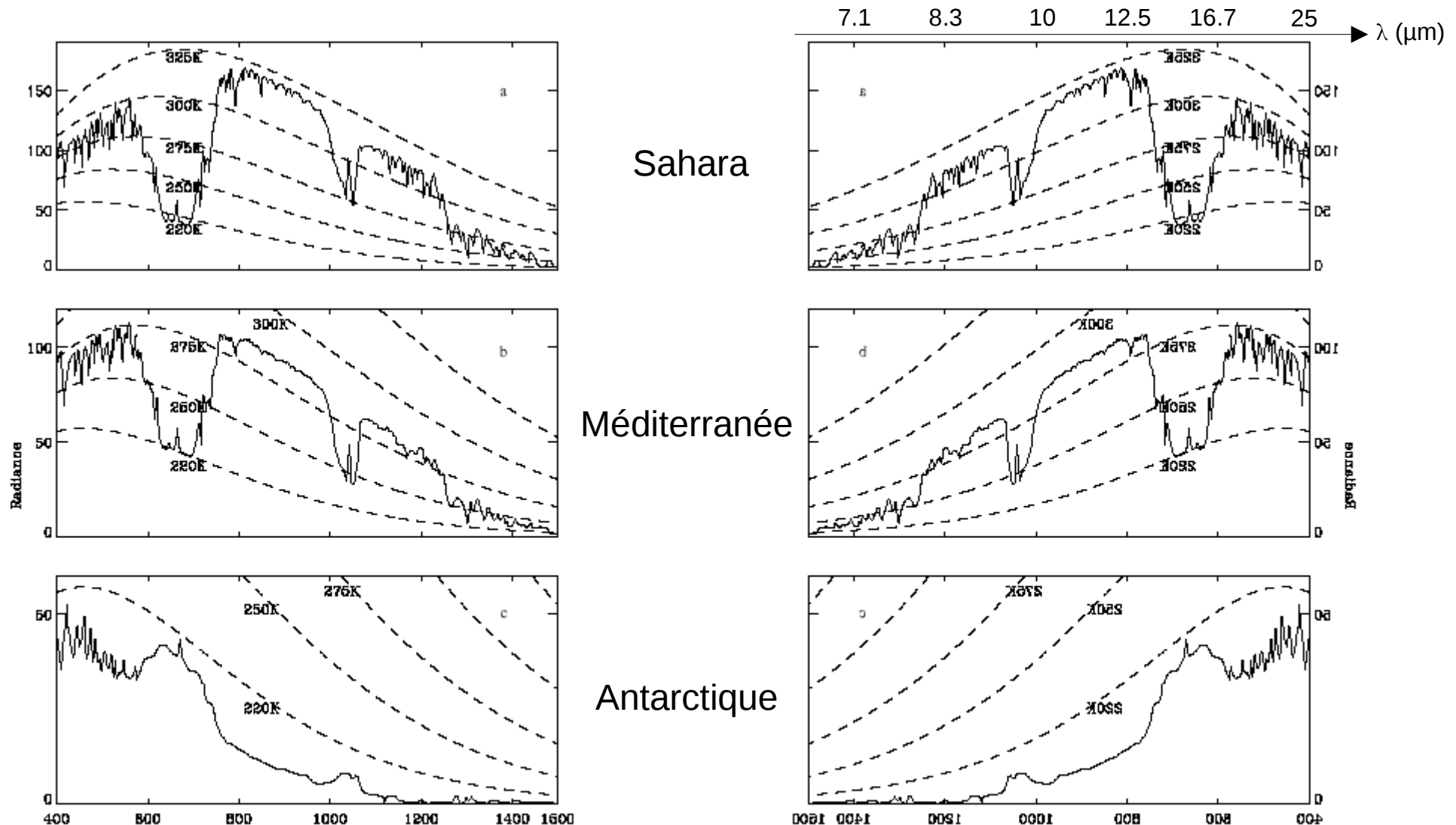


Figure 1.2 Thermal emission spectra of Earth measured by the IRIS Michelson interferometer instrument on the *Nimbus 4* spacecraft (see Endnote 4). Shown also are the radiances of blackbodies at several temperatures. (a) Sahara region; (b) Mediterranean; (c) Antarctic.

Figure 1.2 Thermal emission spectra of Earth measured by the IRIS Michelson interferometer instrument on the *Nimbus 4* spacecraft (see Endnote 4). Shown also are the radiances of blackbodies at several temperatures. (a) Sahara region; (b) Mediterranean; (c) Antarctic.

Spectre d'émission terrestre

Un spectre moyen cache de grandes disparités !

Données *Nimbus 4* en nombre d'onde (à gauche) et « miroir » en longueur d'onde (à droite)

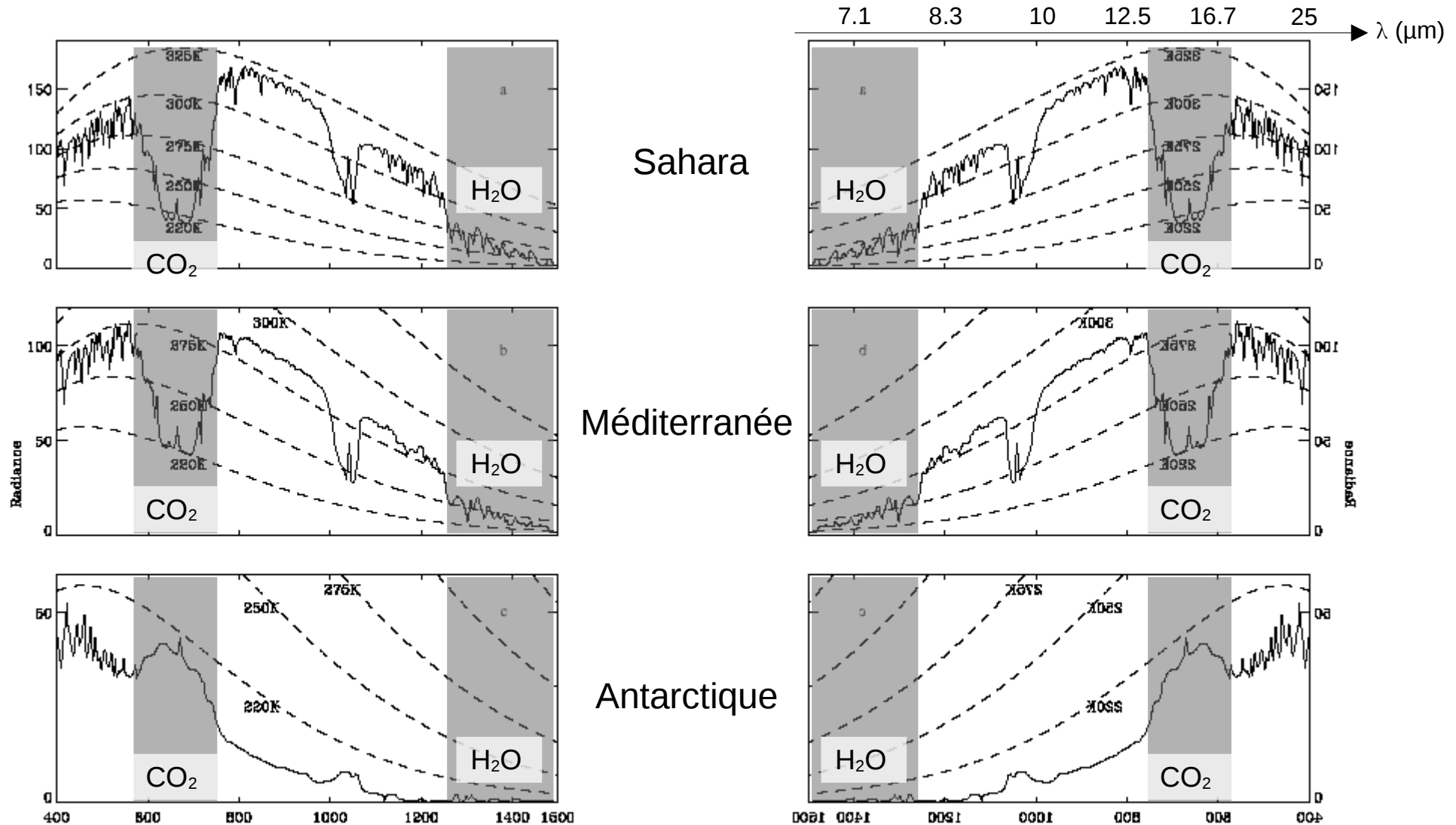


Figure 1.2 Thermal emission spectra of Earth measured by the IRIS Michelson interferometer instrument on the *Nimbus 4* spacecraft (see Endnote 4). Shown also are the radiances of blackbodies at several temperatures. (a) Sahara region; (b) Mediterranean; (c) Antarctic.

Figure 1.2 Thermal emission spectra of Earth measured by the IRIS Michelson interferometer instrument on the *Nimbus 4* spacecraft (see Endnote 4). Shown also are the radiances of blackbodies at several temperatures. (a) Sahara region; (b) Mediterranean; (c) Antarctic.

Spectre d'émission terrestre

Un spectre moyen cache de grandes disparités !

Données *Nimbus 4* en nombre d'onde (à gauche) et « miroir » en longueur d'onde (à droite)

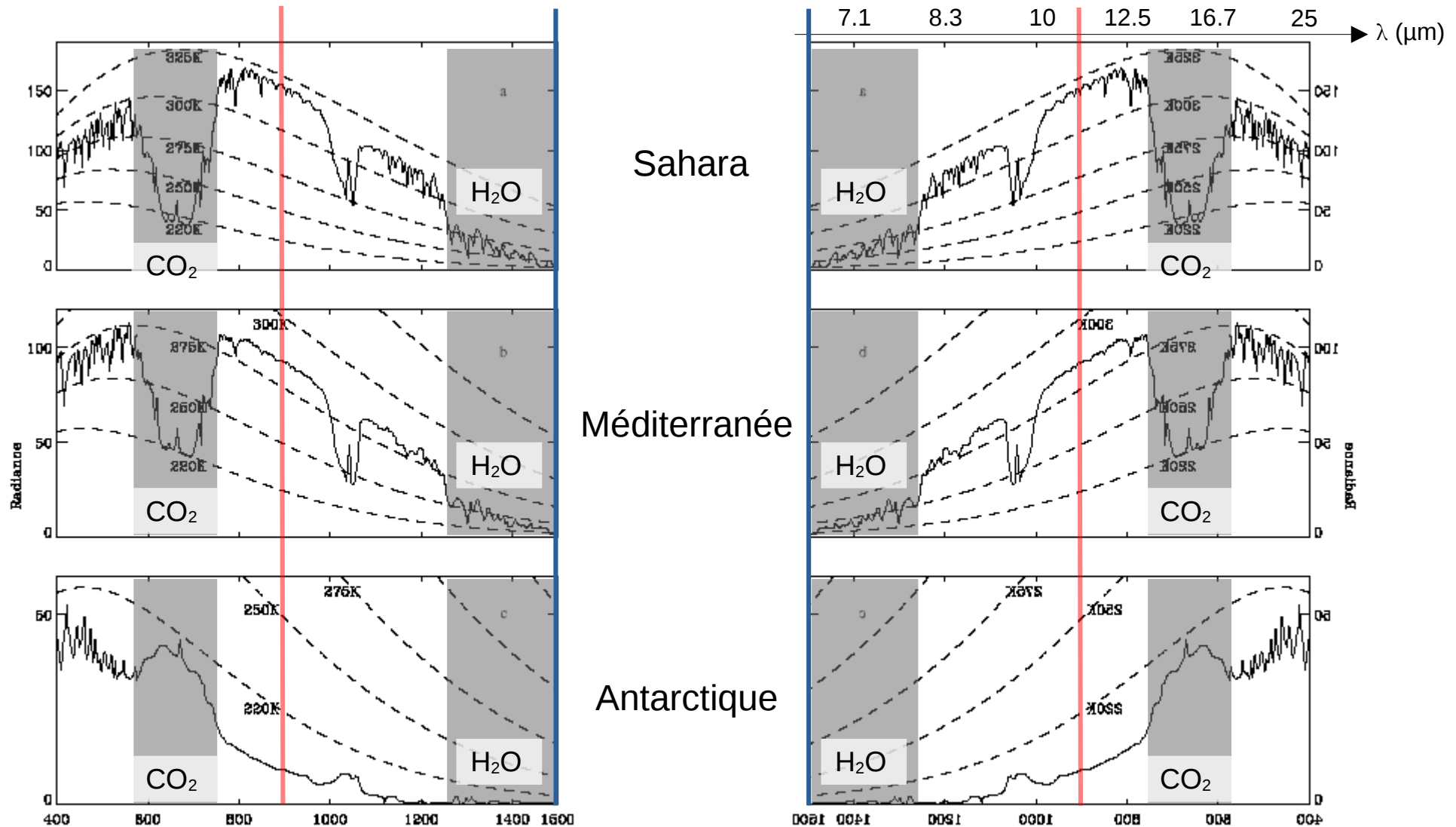


Figure 1.2 Thermal emission spectra of Earth measured by the IRIS Michelson interferometer instrument on the *Nimbus 4* spacecraft (see Endnote 4). Shown also are the radiances of blackbodies at several temperatures. (a) Sahara region; (b) Mediterranean; (c) Antarctic.

Figure 1.2 Thermal emission spectra of Earth measured by the IRIS Michelson interferometer instrument on the *Nimbus 4* spacecraft (see Endnote 4). Shown also are the radiances of blackbodies at several temperatures. (a) Sahara region; (b) Mediterranean; (c) Antarctic.

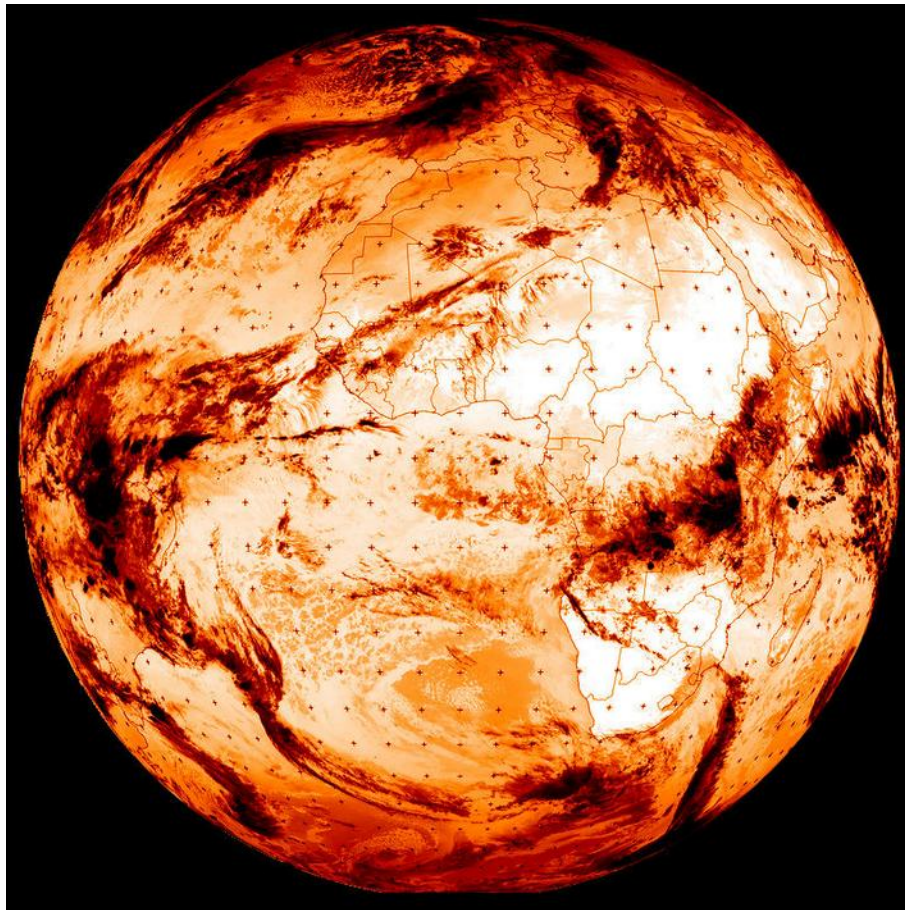
Images d'émission terrestre



Représentation du rayonnement thermique comme un fer chauffé à blanc : →

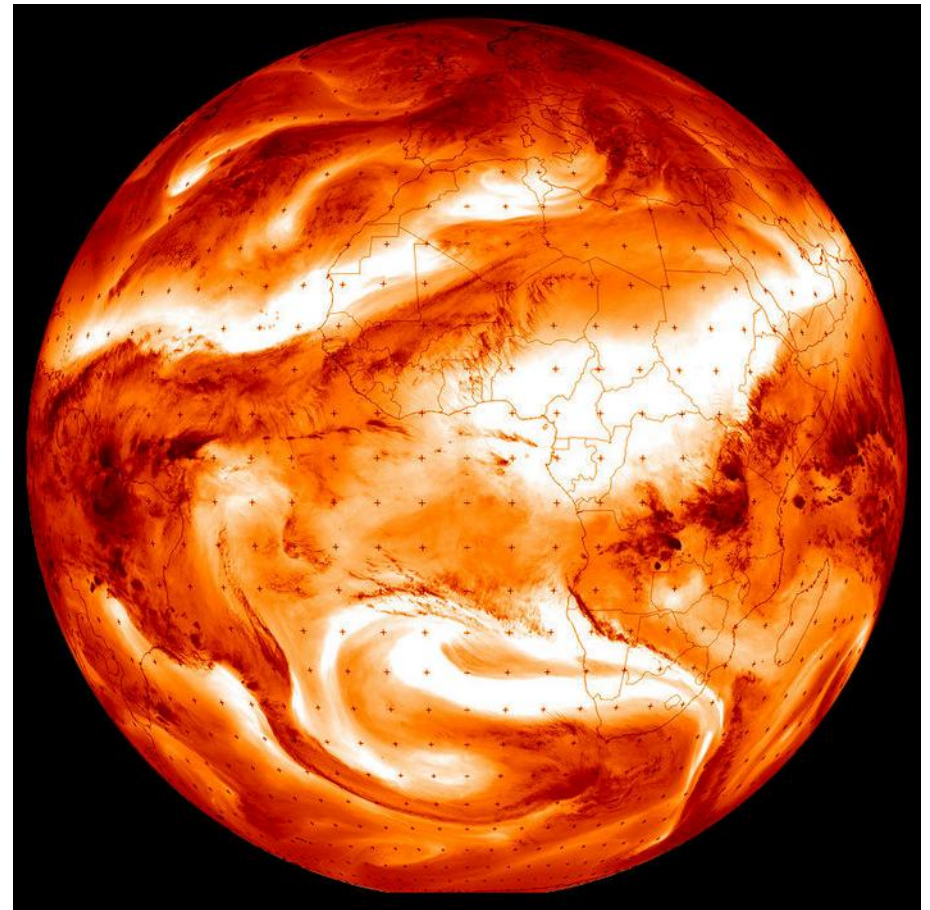


Infrarouge thermique, « **fenêtre** » à $10.8 \mu\text{m}$



On voit le **sol** (sauf nuages)

Bande d'absorption de la **vapeur d'eau** à $6.2 \mu\text{m}$



On voit les masses d'air humides. Plus il y a d'humidité et plus l'air est opaque « haut », où il est froid, et émet moins (→ sombre)

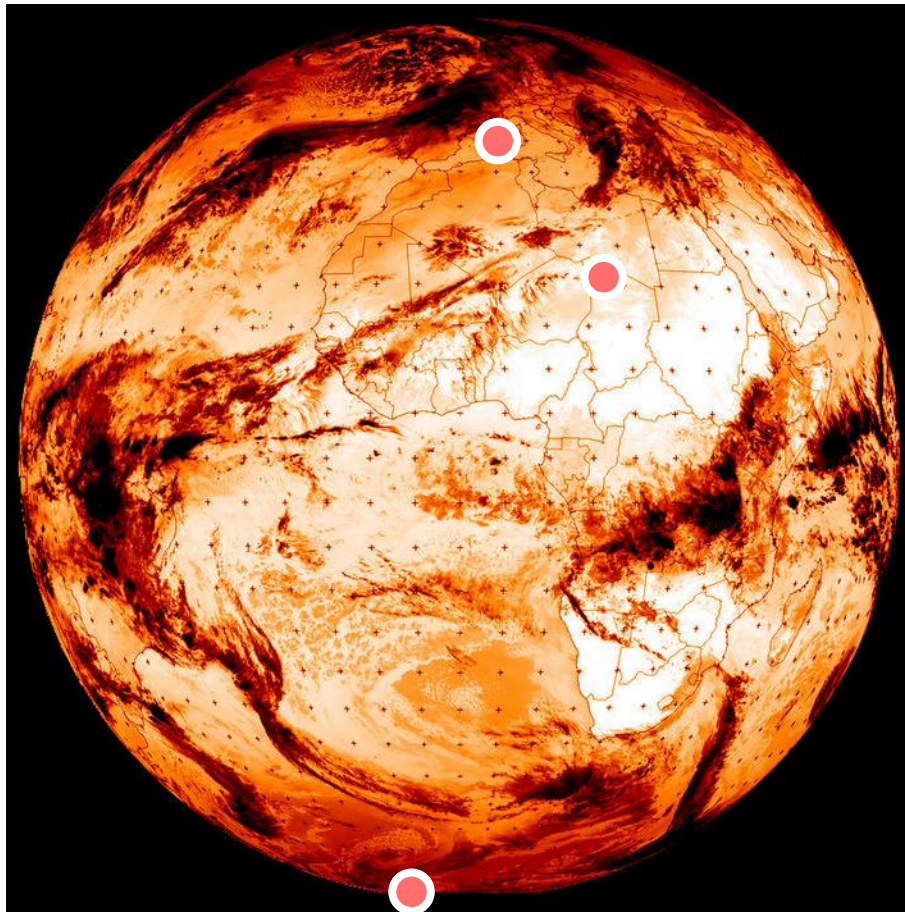
Images d'émission terrestre



Représentation du rayonnement thermique comme un fer chauffé à blanc : →

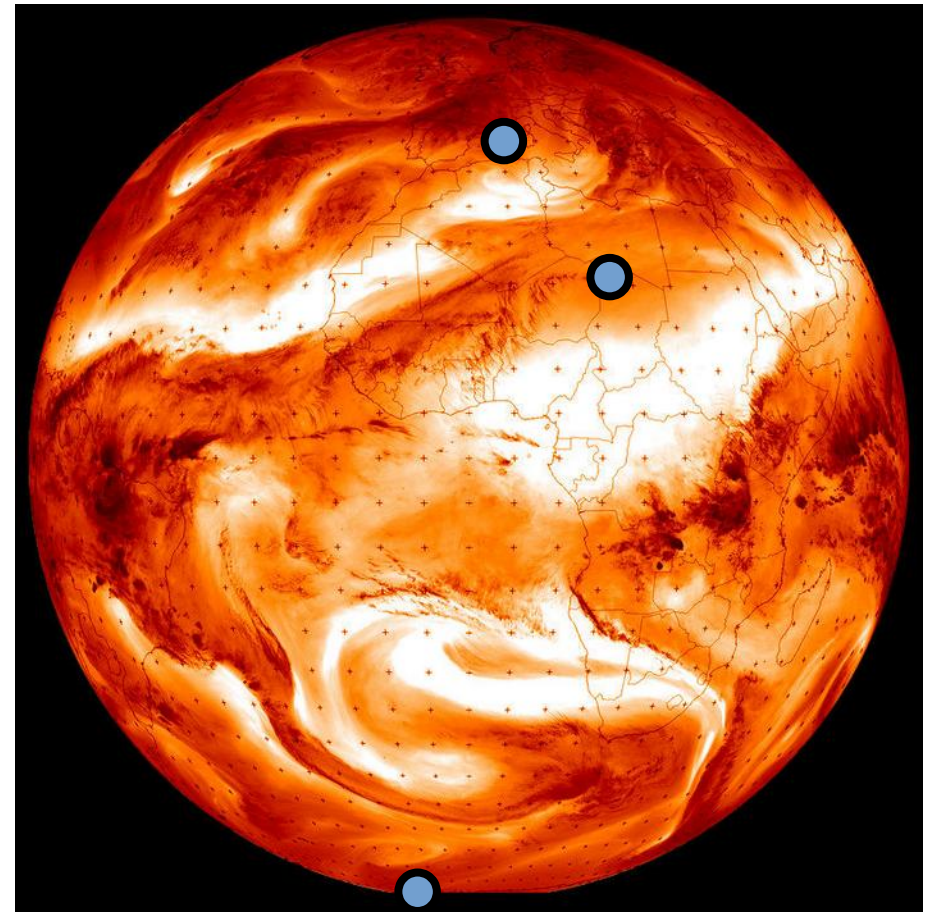


Infrarouge thermique, « **fenêtre** » à $10.8 \mu\text{m}$



On voit le **sol** (sauf nuages)

Bande d'absorption de la **vapeur d'eau** à $6.2 \mu\text{m}$



On voit les masses d'air humides. Plus il y a d'humidité et plus l'air est opaque « haut », où il est froid, et émet moins (→ sombre)

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre

On va construire un modèle de Terre qui fait les hypothèses suivantes :

1. L'atmosphère a un comportement composite face au rayonnement : **transparente au visible, partiellement opaque au thermique** (transparente hors bandes d'absorption des GES, opaque dans les bandes où les GES absorbent).
2. Les transferts d'énergie sont supposés **uniquement radiatifs**. C'est le cas avec l'espace ; pas avec le sol et intra-atmosphère.
3. Il y a **équilibre thermique** : tout ce qui est absorbé est émis.

On ajuste notre modèle avec 3 paramètres d'entrée fixés, mesurables sur Terre :

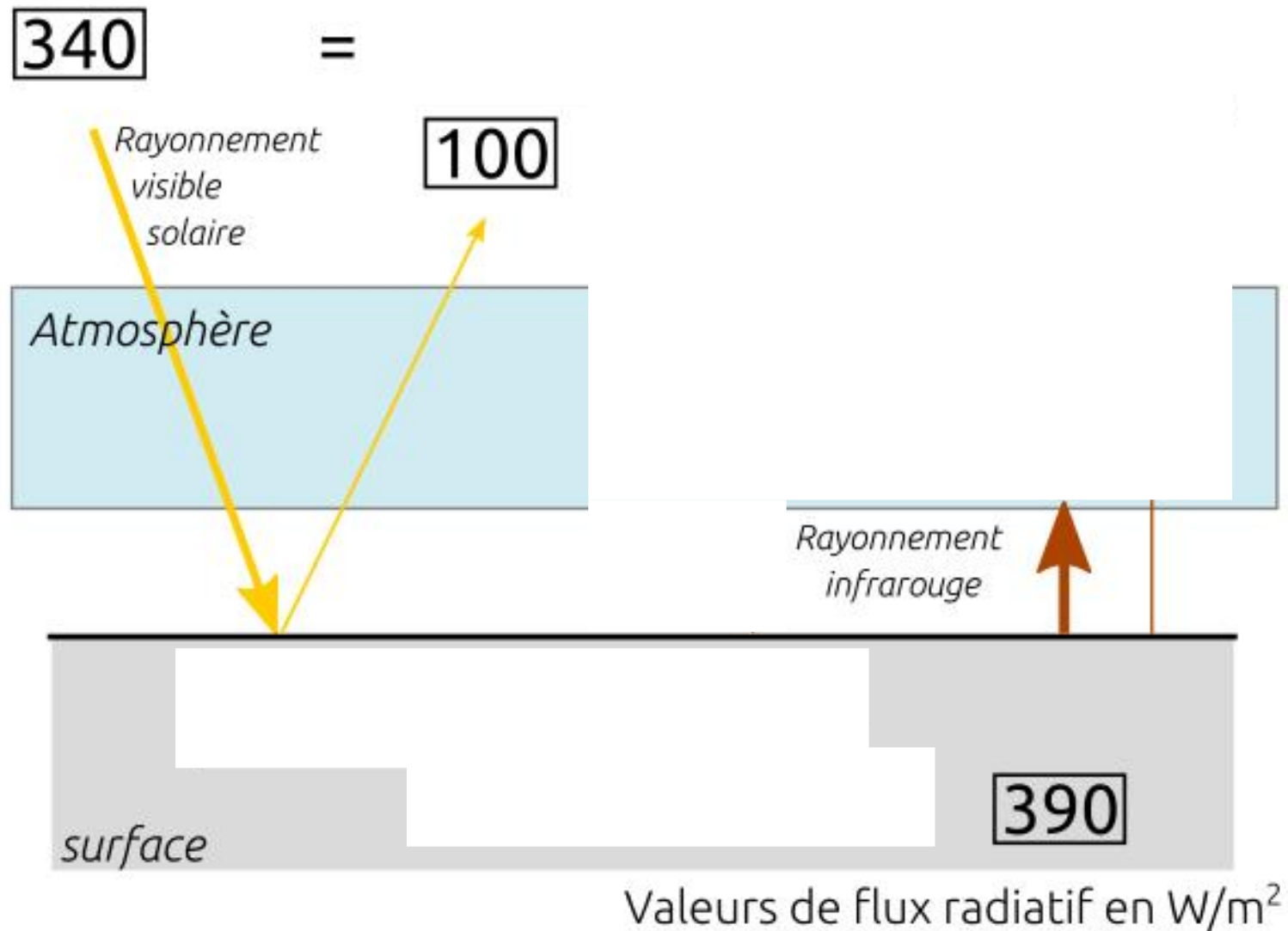
340 W/m² de visible arrive au sommet de l'atmosphère

100 W/m² de visible est réfléchi par la Terre

Le sol est à 15°C de moyenne et comme se comporte comme un corps noir : il émet **390 W/m²** de rayonnement thermique

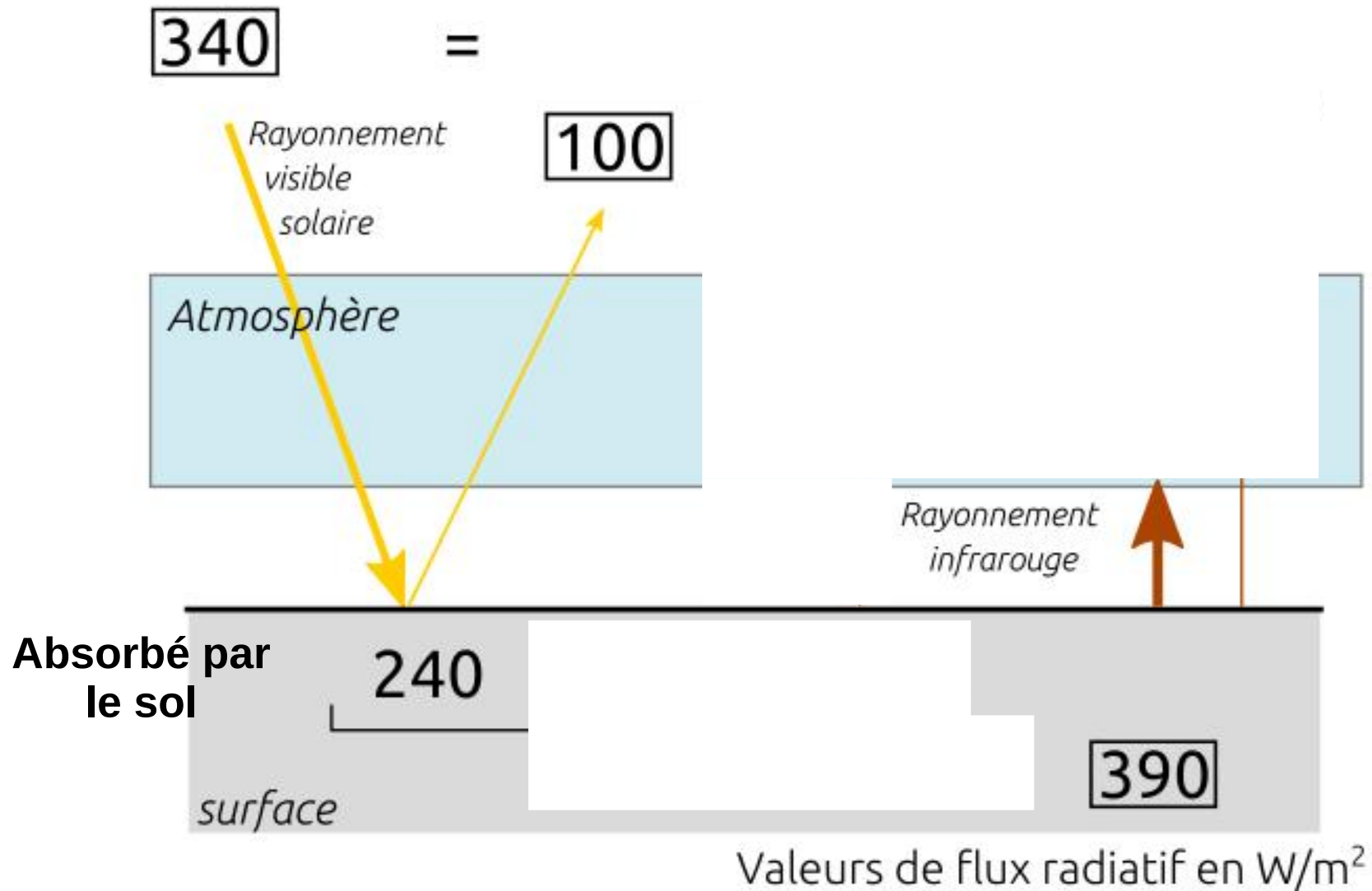
Le modèle permet de trouver les flux avec l'atmosphère...

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



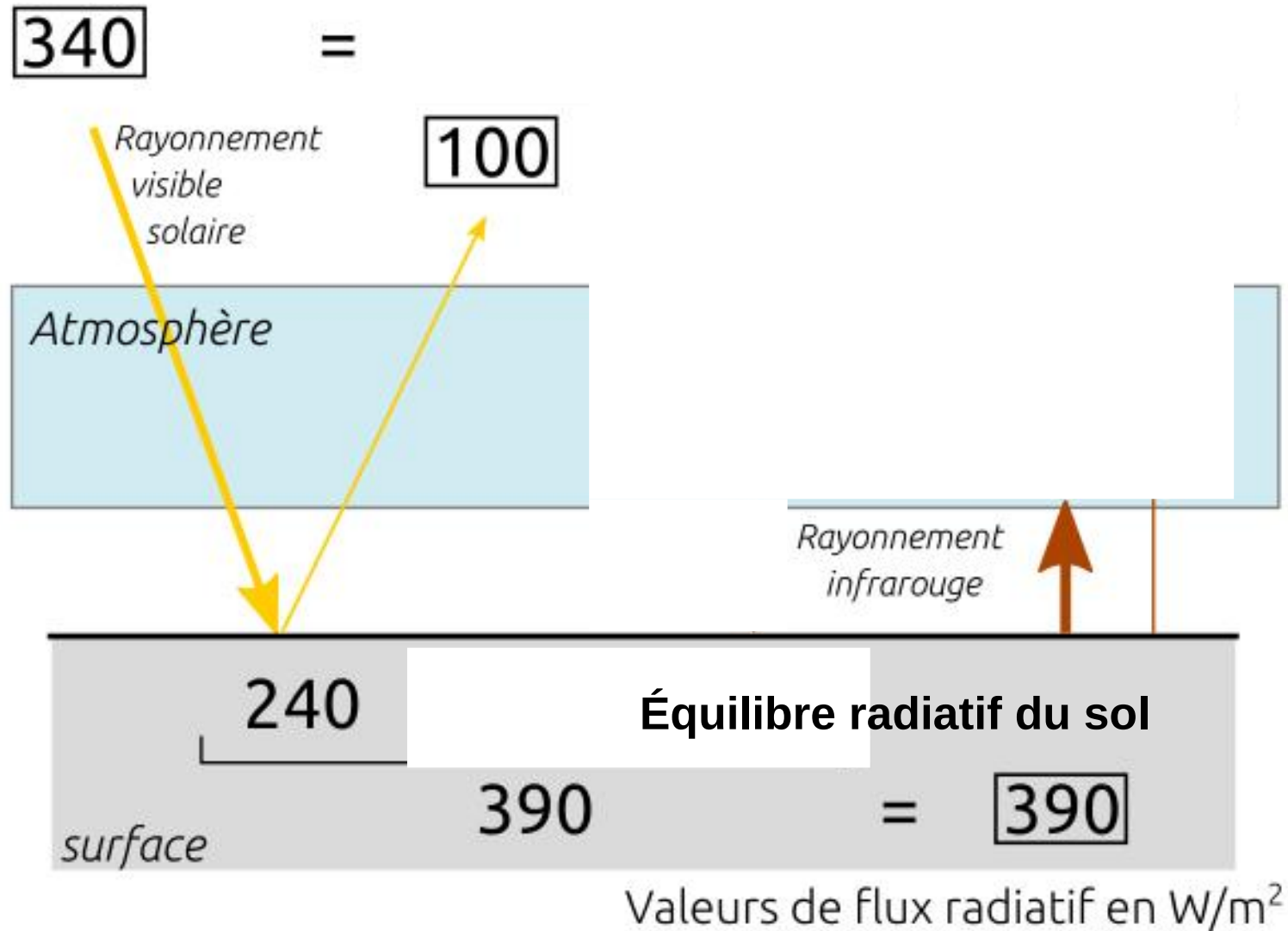
En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



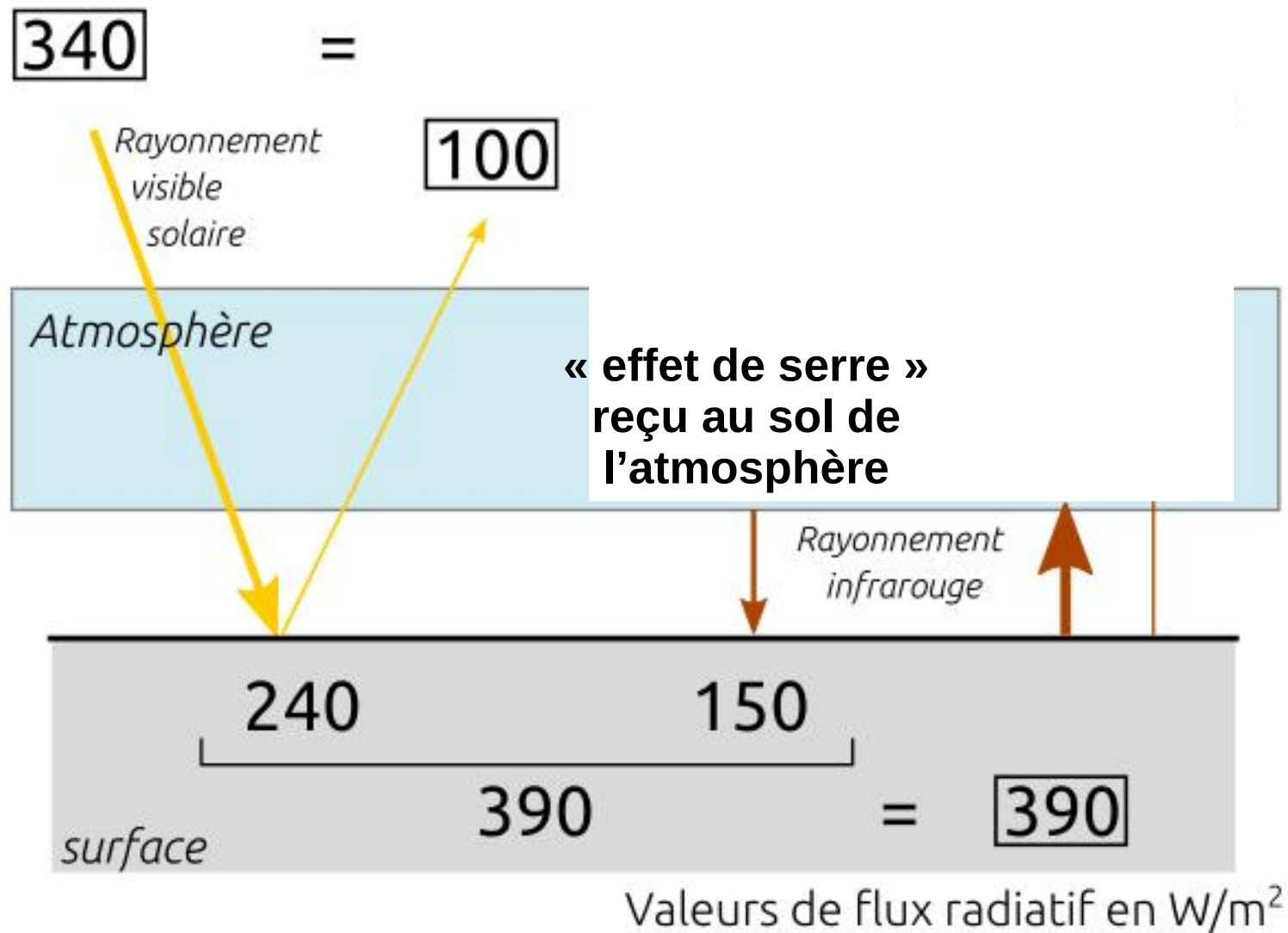
En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



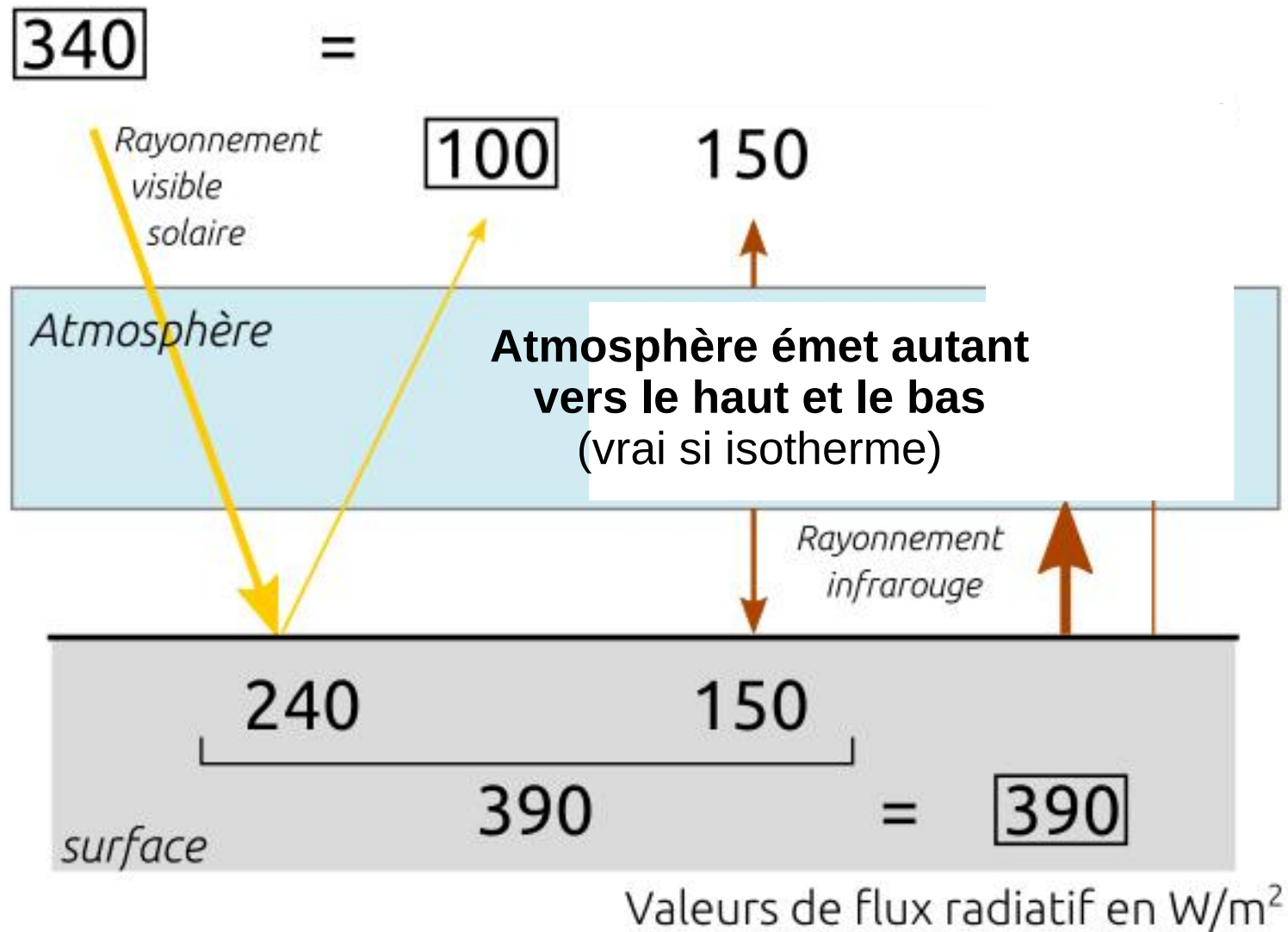
En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



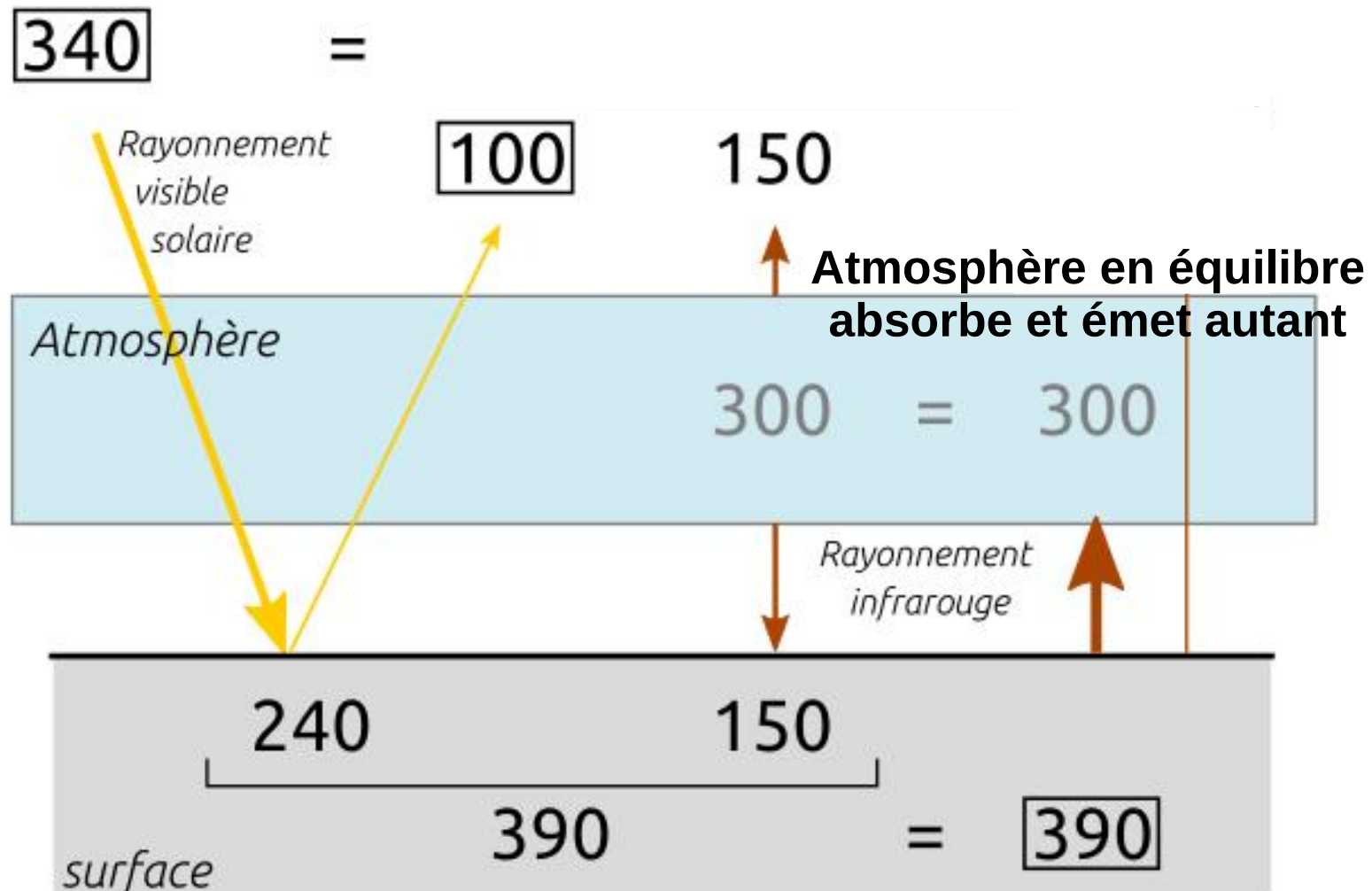
En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

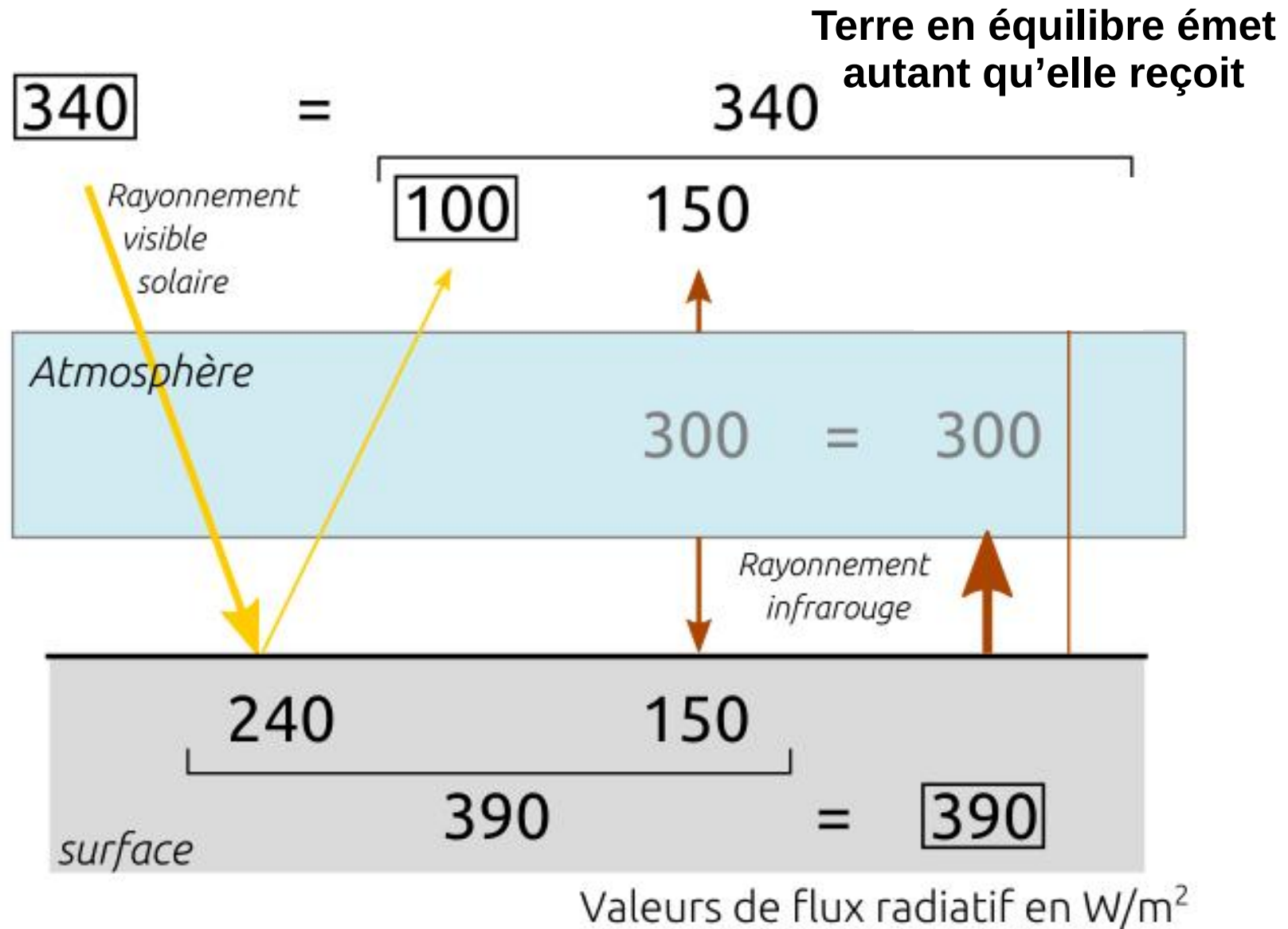
Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



Valeurs de flux radiatif en W/m^2

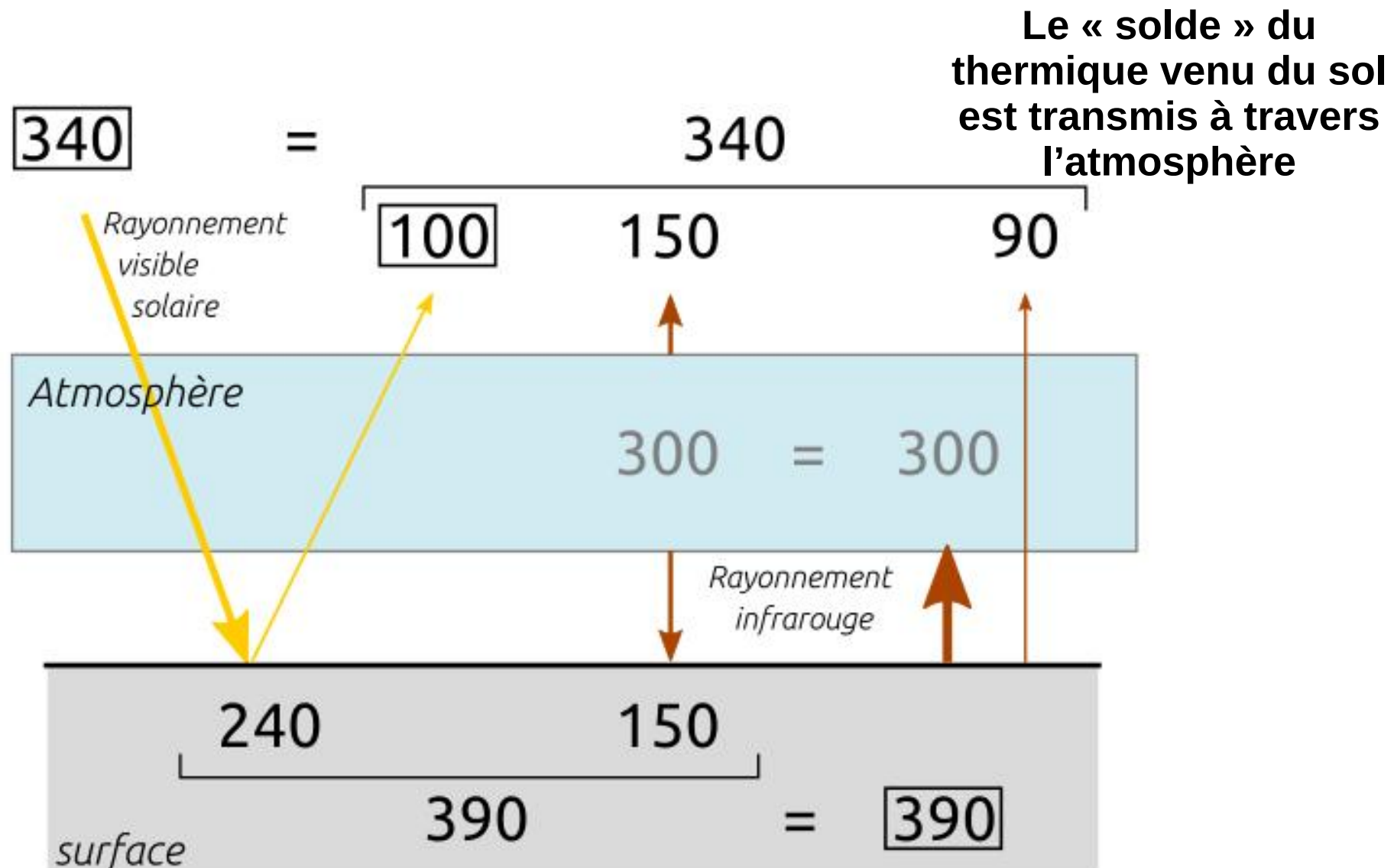
En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

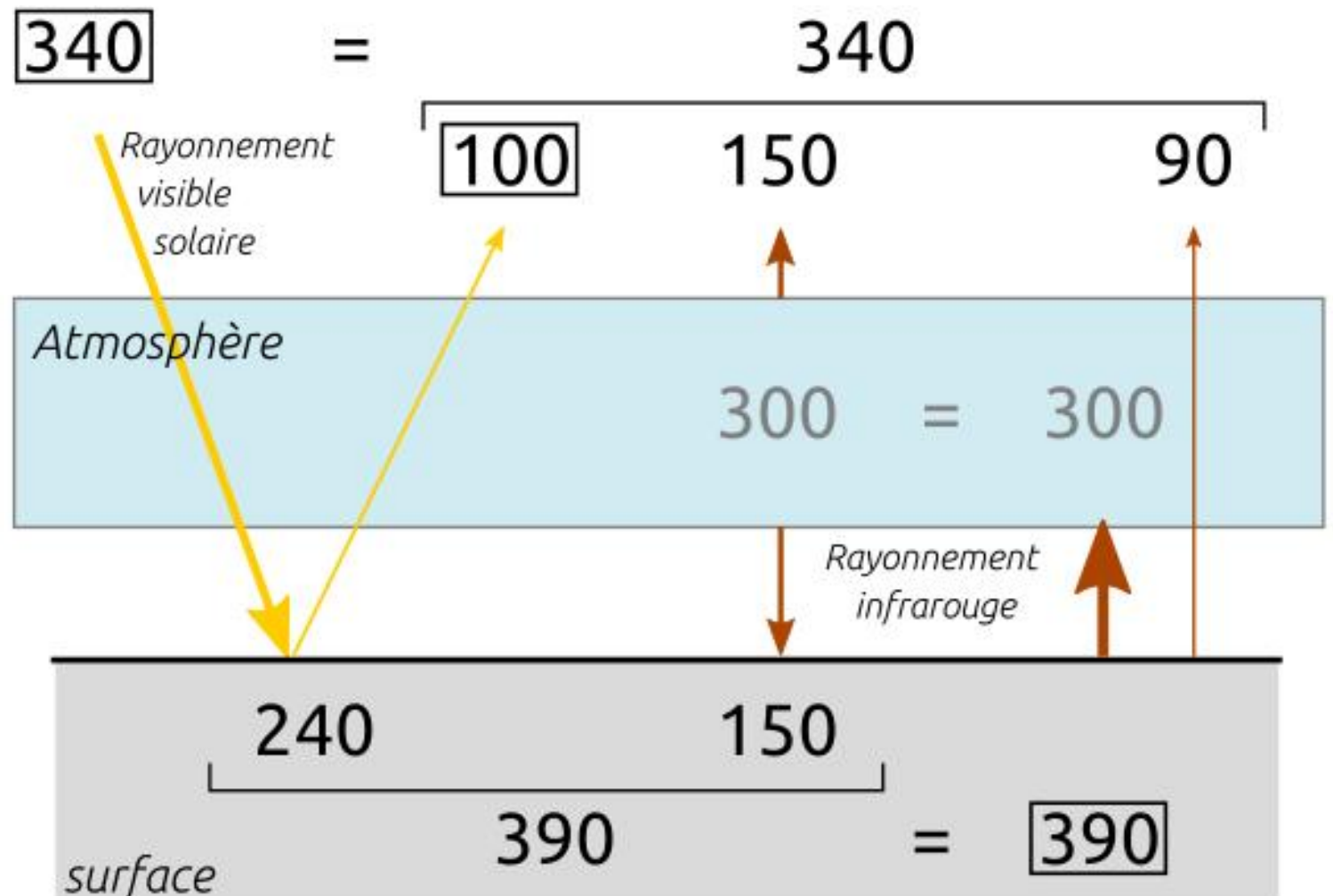
Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



Valeurs de flux radiatif en W/m^2

En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

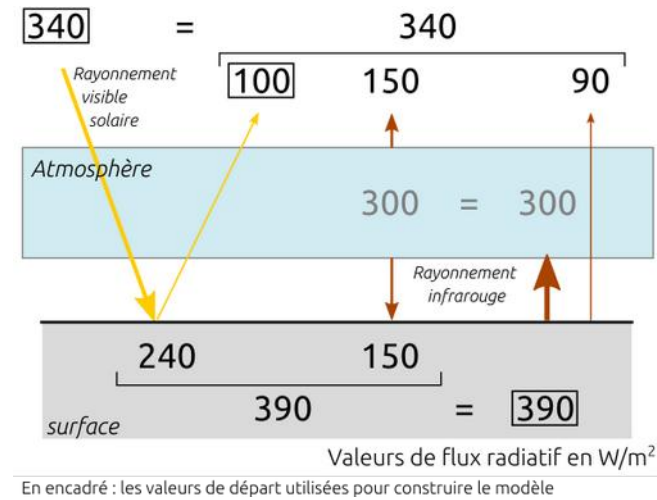
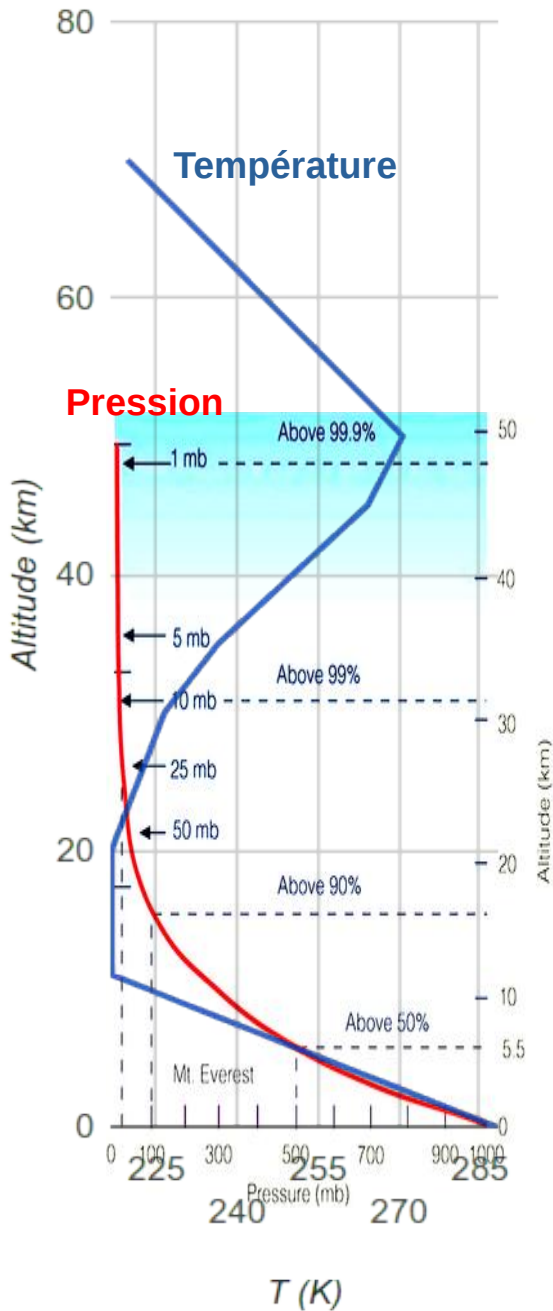
Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



Valeurs de flux radiatif en W/m^2

En encadré : les valeurs de départ utilisées pour construire le modèle

Bilan radiatif (simplifié) de la Terre



Une simplification majeure du modèle : **l'atmosphère n'est pas isotherme.**

La température décroît avec l'altitude (jusqu'à 20 km et >95 % de la masse d'air).

Donc ce qui est **plus haut** est **plus froid**.

Le sommet de l'atmosphère rayonne moins d'IR que sa base !

Bilan radiatif de l'atmosphère

Spectres modèles « par en haut » et « par en bas »

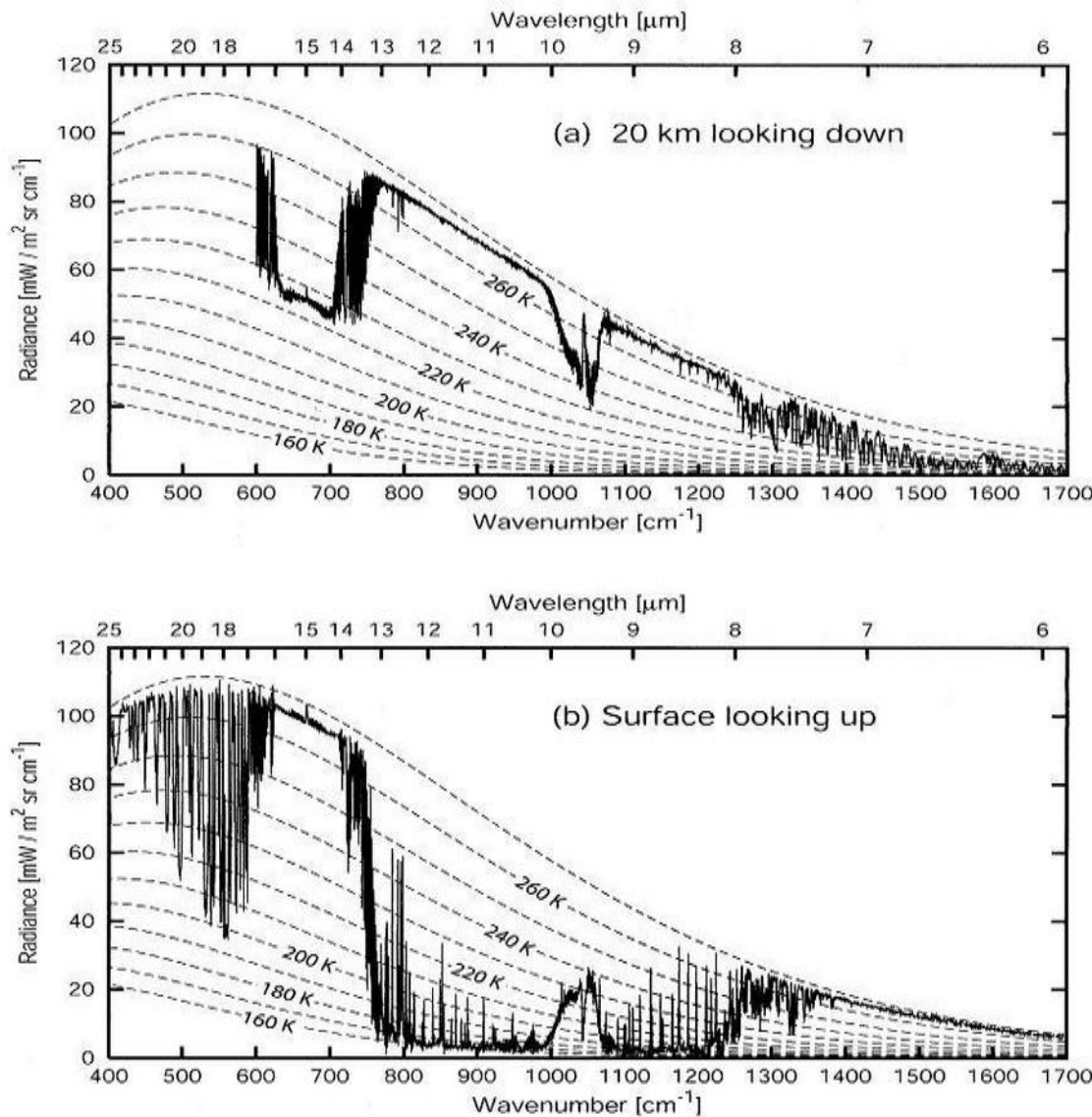


Fig. 8.2: Coincident measurements of the infrared emission spectrum of the cloud-free atmosphere at (a) 20 km looking downward over the polar ice sheet and (b) at the surface looking upward. (Data courtesy of David Tobin, Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison.)

L'atmosphère vue d'en haut (20 km), vers le bas montre un spectre identique à celui vu de l'espace :

Attention : ici l'abscisse est en *nombre d'onde* croissant vers la droite. (cf. [annexe](#))

Les hautes énergies, vers le visible, sont à droite ; les basses énergies, vers l'infrarouge lointain, à gauche.

La correspondance en longueur d'onde est ajoutée en haut.

Bilan radiatif de l'atmosphère

Spectres modèles « par en haut » et « par en bas »

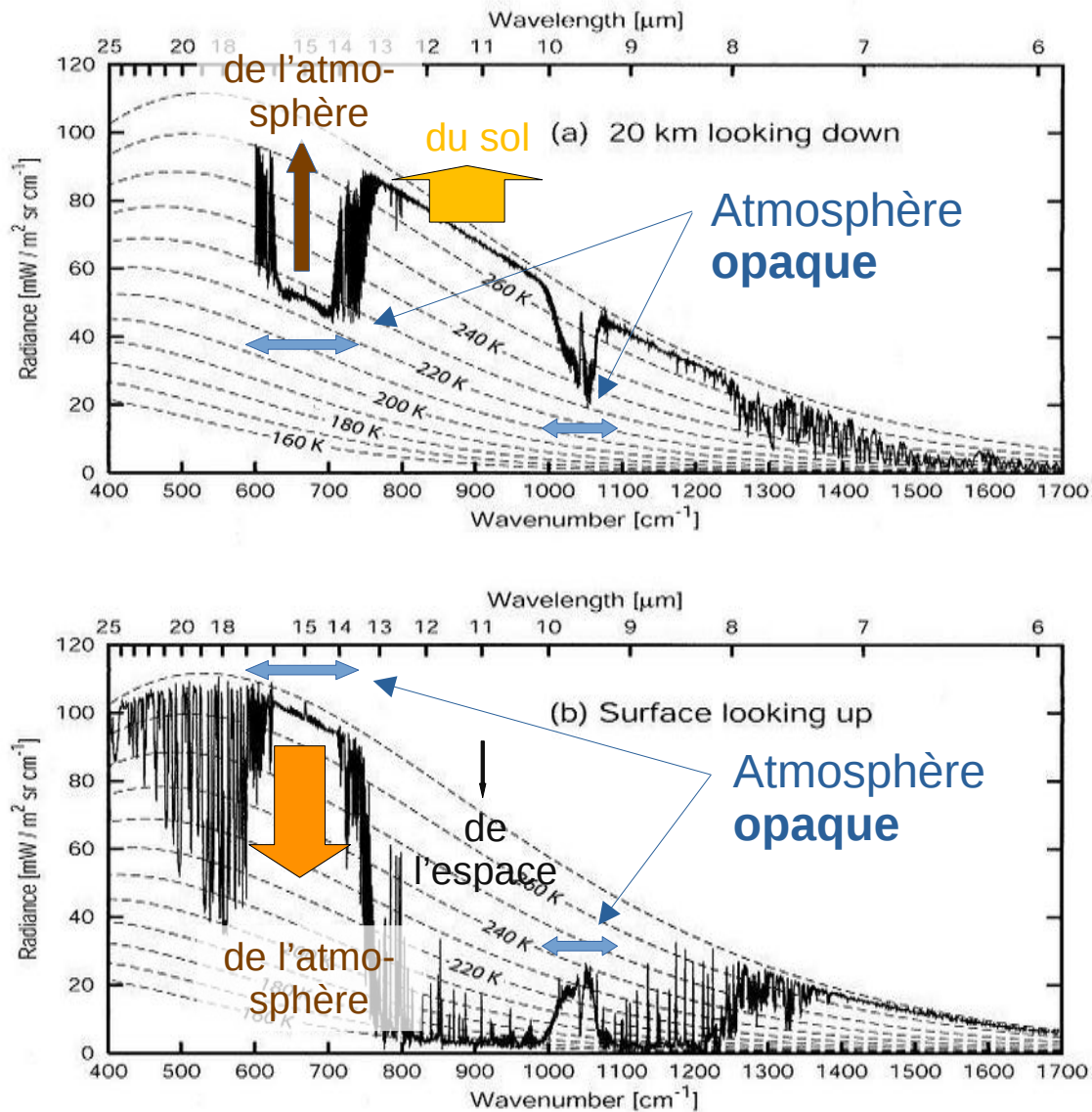


Fig. 8.2: Coincident measurements of the infrared emission spectrum of the cloud-free atmosphere at (a) 20 km looking downward over the polar ice sheet and (b) at the surface looking upward. (Data courtesy of David Tobin, Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison.)

L'atmosphère vue d'en haut (20 km, ballon sonde), vers le bas montre un spectre identique à celui vu de l'espace :

- aux longueurs d'onde où l'atmosphère est transparente on voit le sol d'en haut, l'espace d'en bas

- aux longueurs d'onde où l'atmosphère est opaque on voit : d'en haut vers le bas, le « **sommet** » de la **masse d'air** opaque, plus **froid**, donc **moins rayonnant** que le sol ; et d'en bas vers le haut, la « **base** » de la **masse d'air** opaque d'en bas, **chaude**, plus **rayonnante** que son sommet.

Bilan radiatif de l'atmosphère

Spectres modèles « par en haut » et « par en bas »

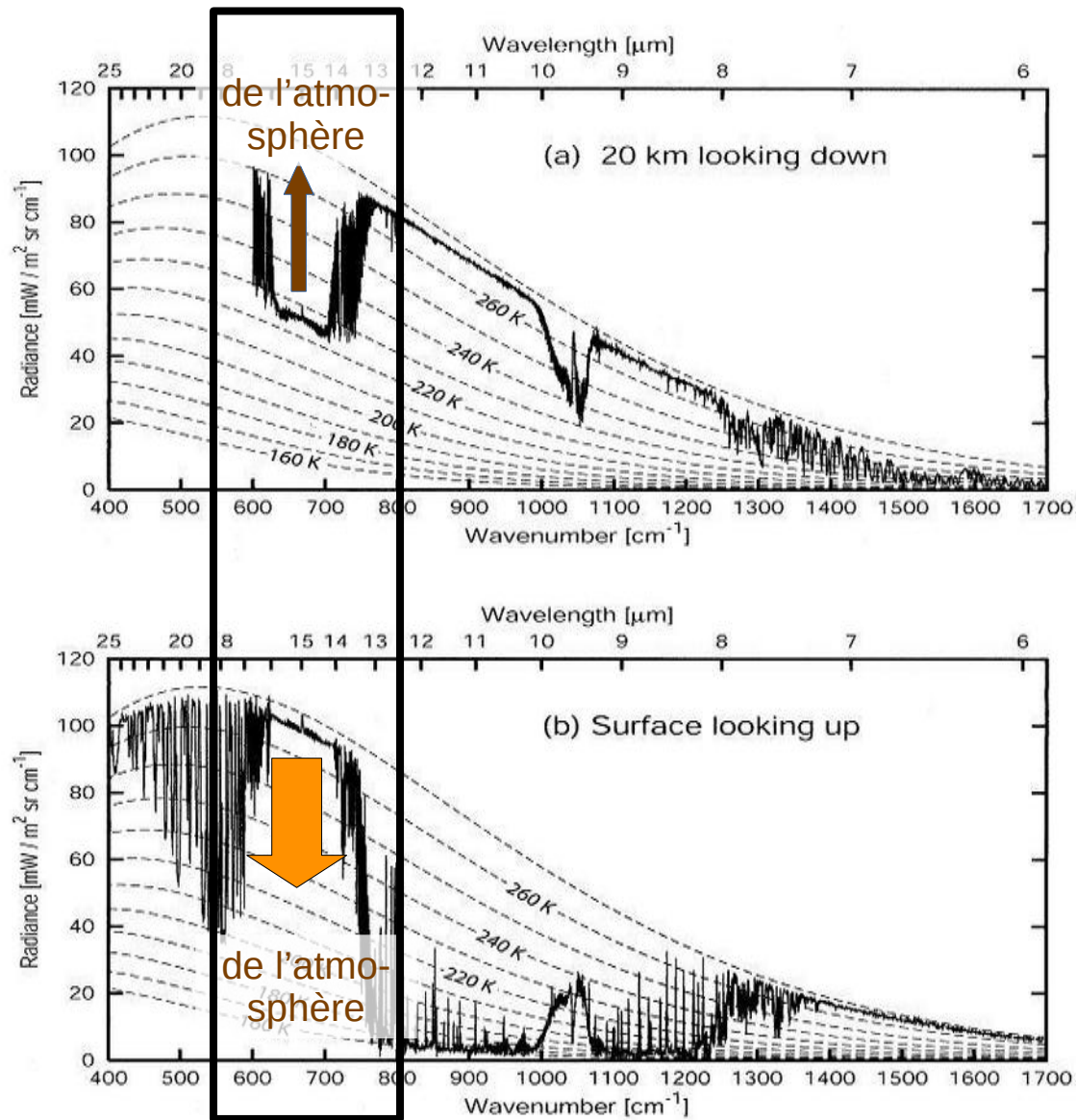


Fig. 8.2: Coincident measurements of the infrared emission spectrum of the cloud-free atmosphere at (a) 20 km looking downward over the polar ice sheet and (b) at the surface looking upward. (Data courtesy of David Tobin, Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison.)

L'atmosphère vue d'en haut (20 km), vers le bas montre un spectre type de la Terre vue de l'espace :

- aux longueurs d'onde où l'atmosphère est transparente on voit le sol d'en haut, l'espace d'en bas

- aux longueurs d'onde où l'atmosphère est opaque on voit : d'en haut vers le bas, le « **sommet** » de la **masse d'air** opaque, plus **froid**, donc **moins rayonnant** que le sol ; et d'en bas vers le haut, la « **base** » de la **masse d'air** opaque d'en bas, **chaude**, plus **rayonnante** que son sommet.

Différence fondamentale par rapport à la plaque de plexiglass : **l'atmosphère ne rayonne pas pareil à sa base et à son sommet.**

Bilan radiatif de l'atmosphère

Spectres modèles « par en haut » et « par en bas »

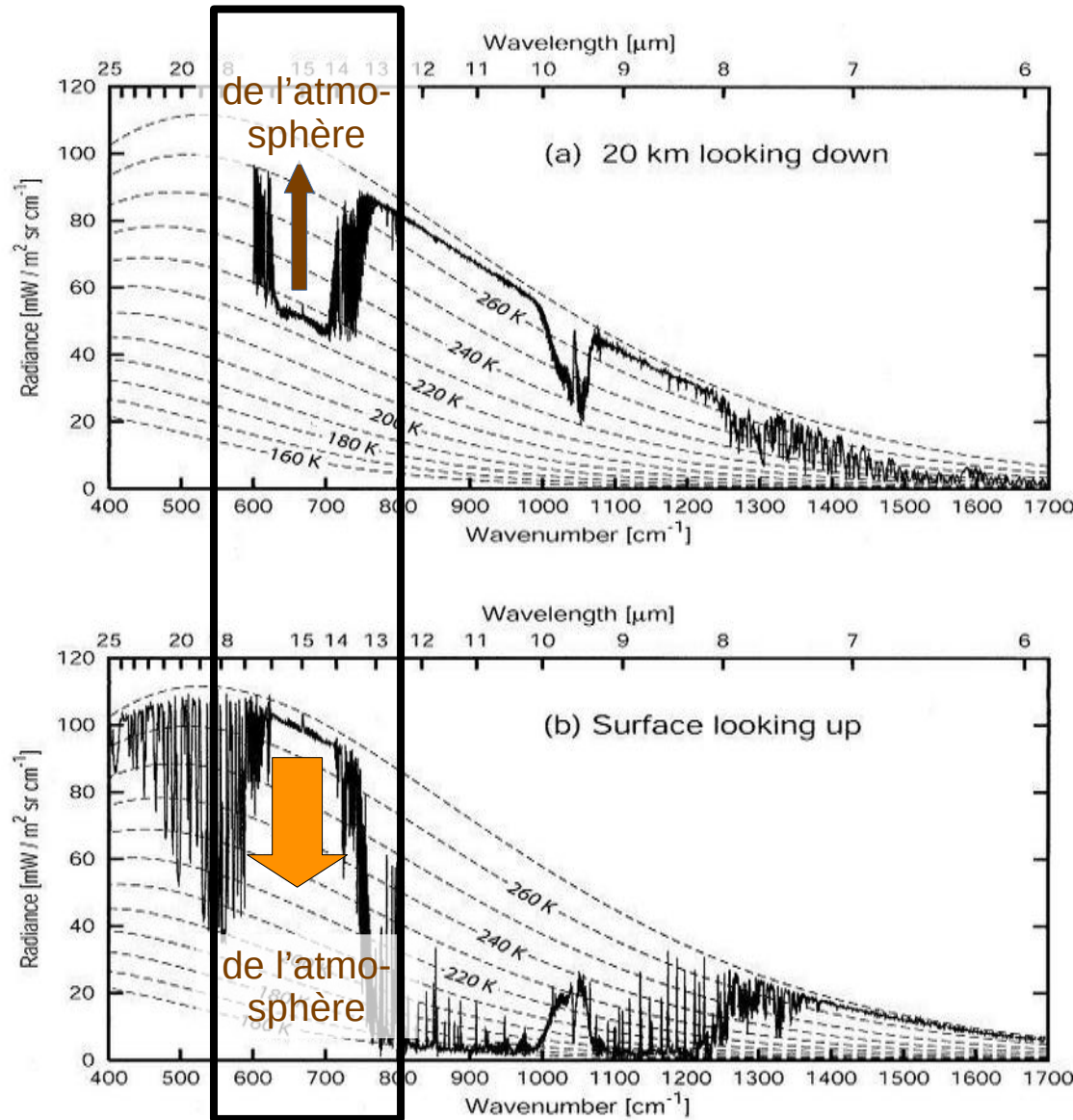


Fig. 8.2: Coincident measurements of the infrared emission spectrum of the cloud-free atmosphere at (a) 20 km looking downward over the polar ice sheet and (b) at the surface looking upward. (Data courtesy of David Tobin, Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison.)

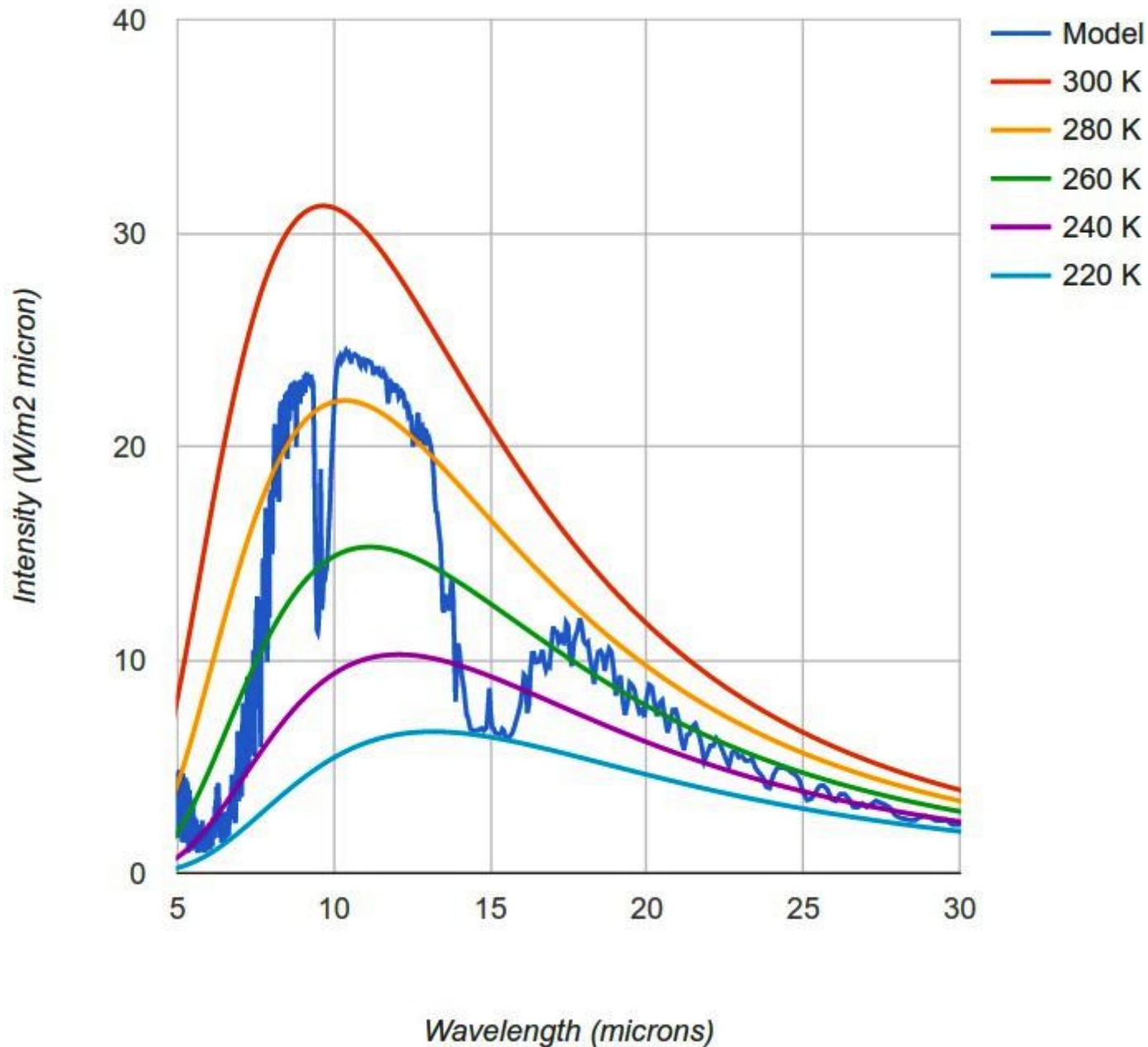
Implications : les conséquences d'un ajout de GES !

Si l'atmosphère devient **plus opaque** à pression égale (**plus de GES** en proportion), la hauteur limite d'opacité (qui dépend d'une pression absolue de GES) monte et donc le flux vers l'espace diminue.

Mais le flux total vers l'espace doit rester le même !

C'est le sol qui compense en émettant plus... ce qui n'arrive que s'il se réchauffe !

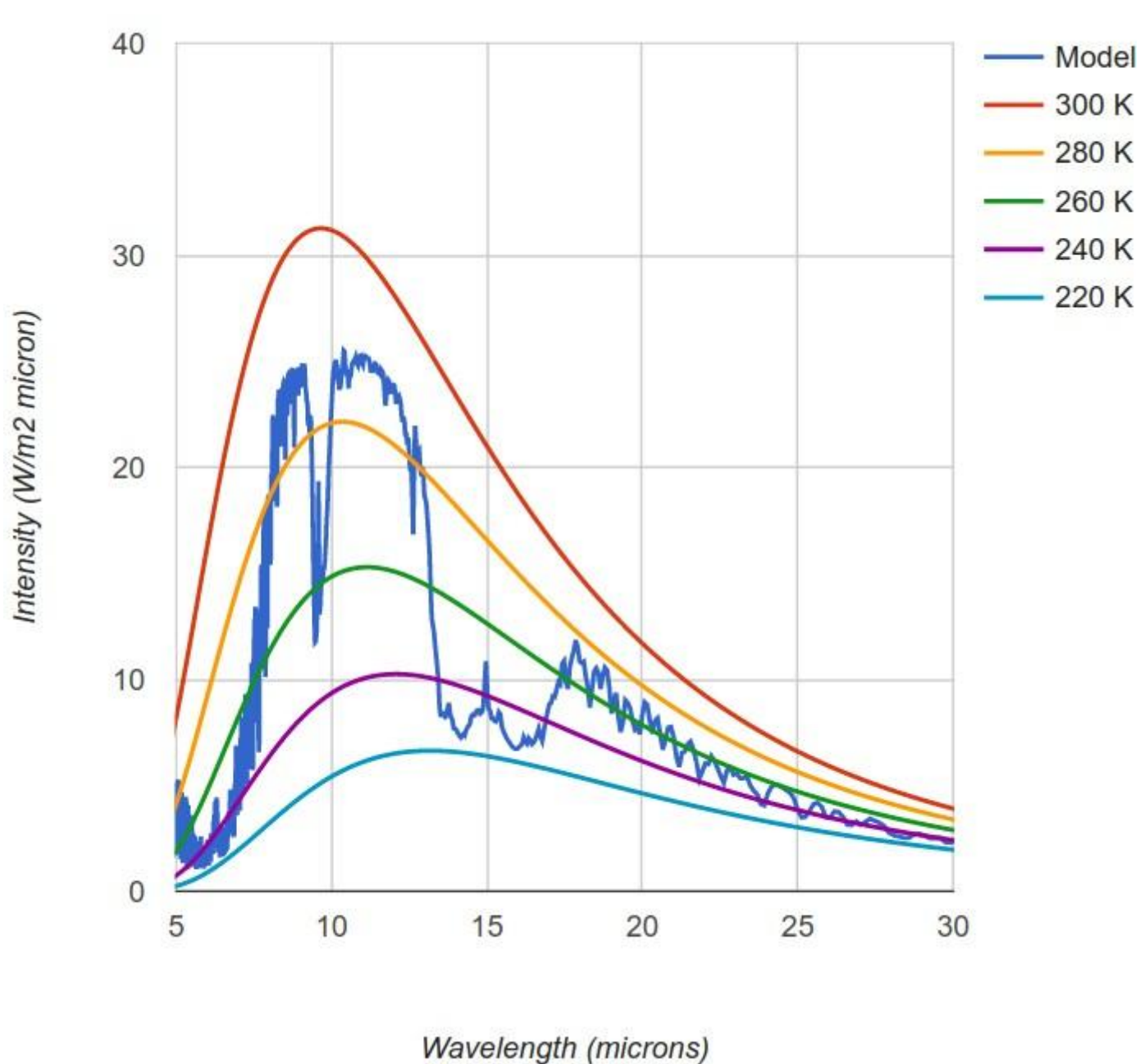
Conséquence d'une augmentation de GES : ex. du CO₂ (modèle)



Modèle MODTRAN standard à **280 ppm** de CO₂

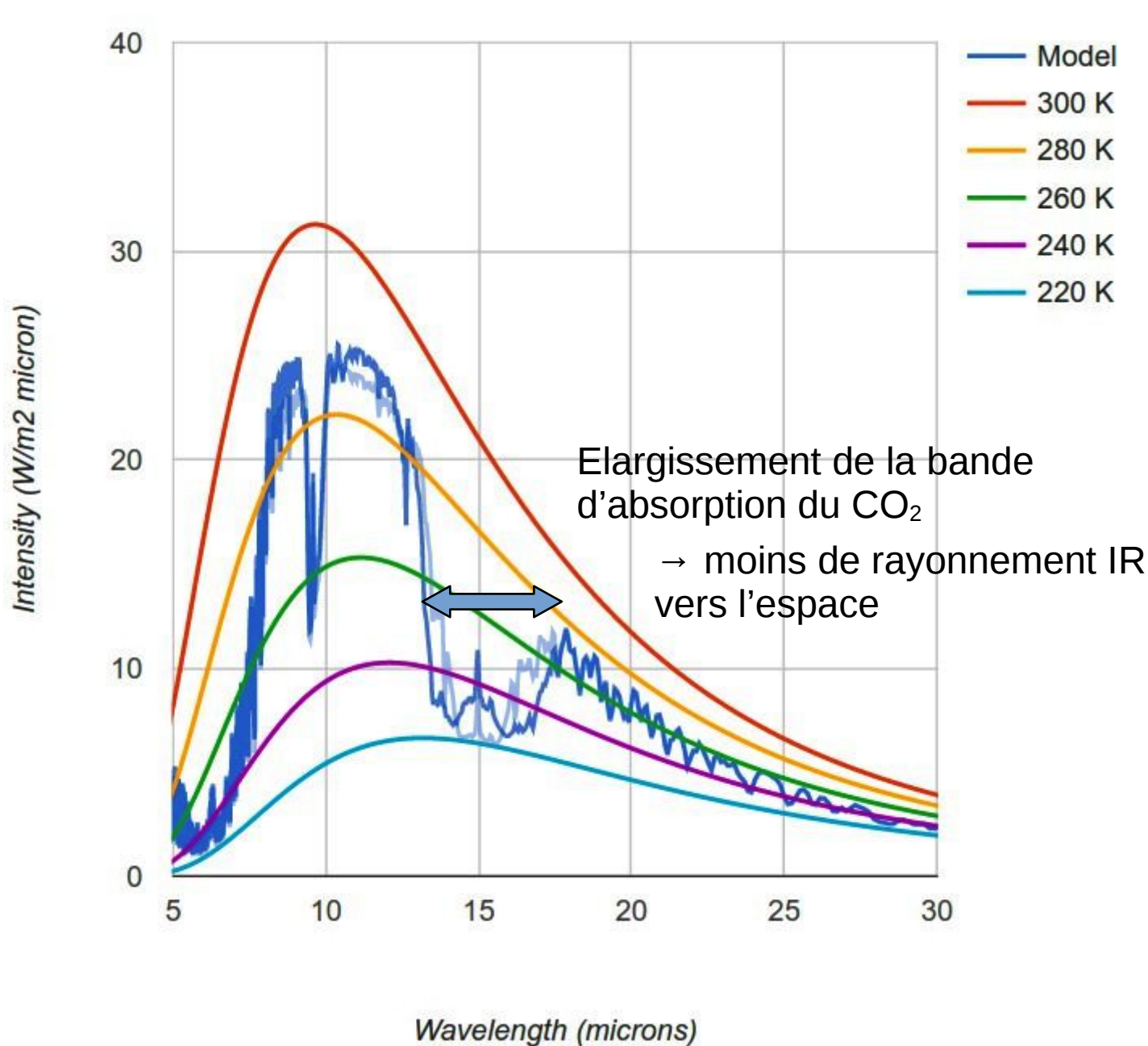
(état « préindustriel », donnant dans ce modèle une température au sol à **-0.6K** par rapport à l'actuel.

Conséquence d'une augmentation de GES : ex. du CO₂ (modèle)



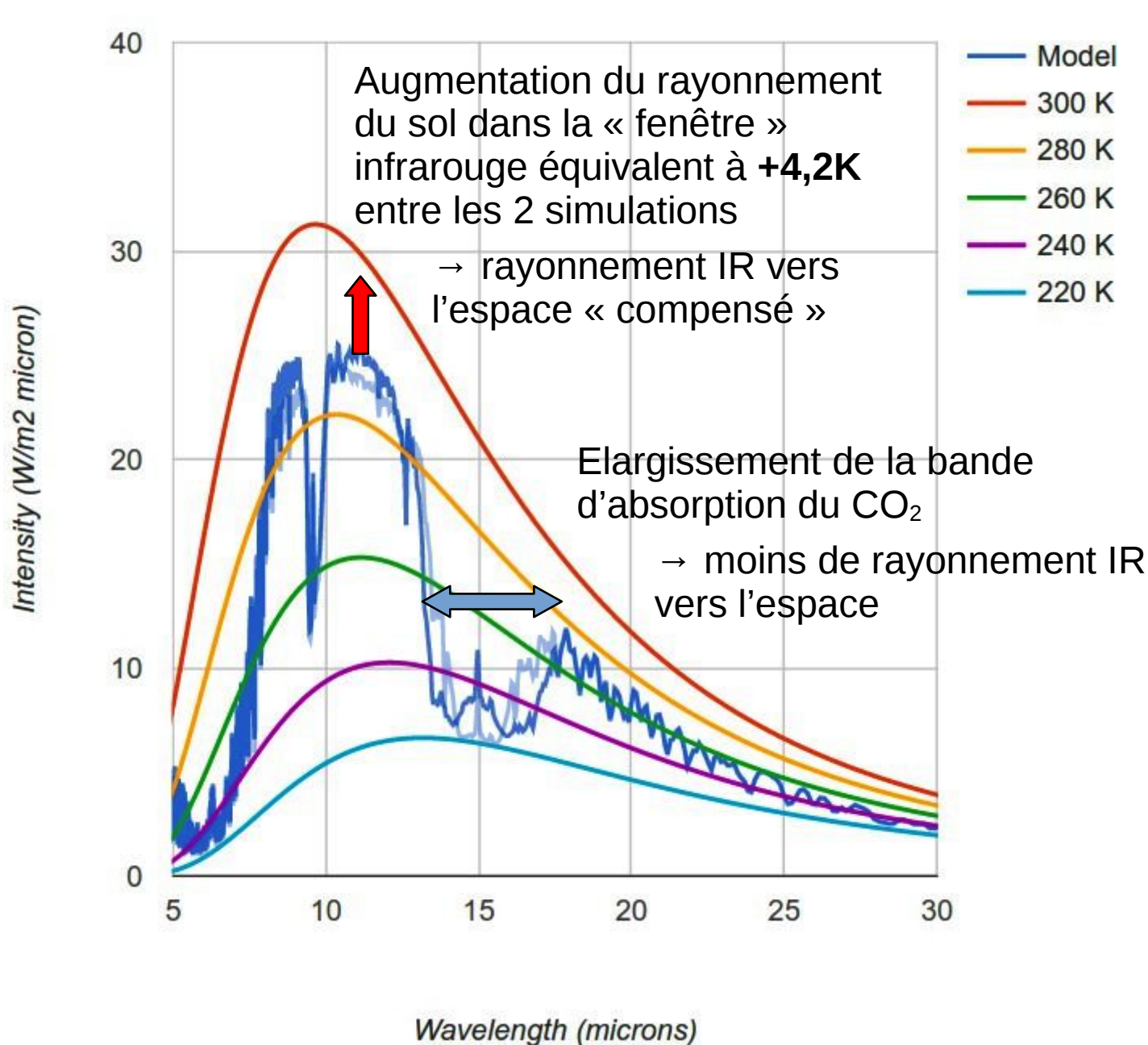
Modèle MODTRAN standard à **2800** ppm de CO₂ (10x plus)

Conséquence d'une augmentation de GES : ex. du CO₂ (modèle)

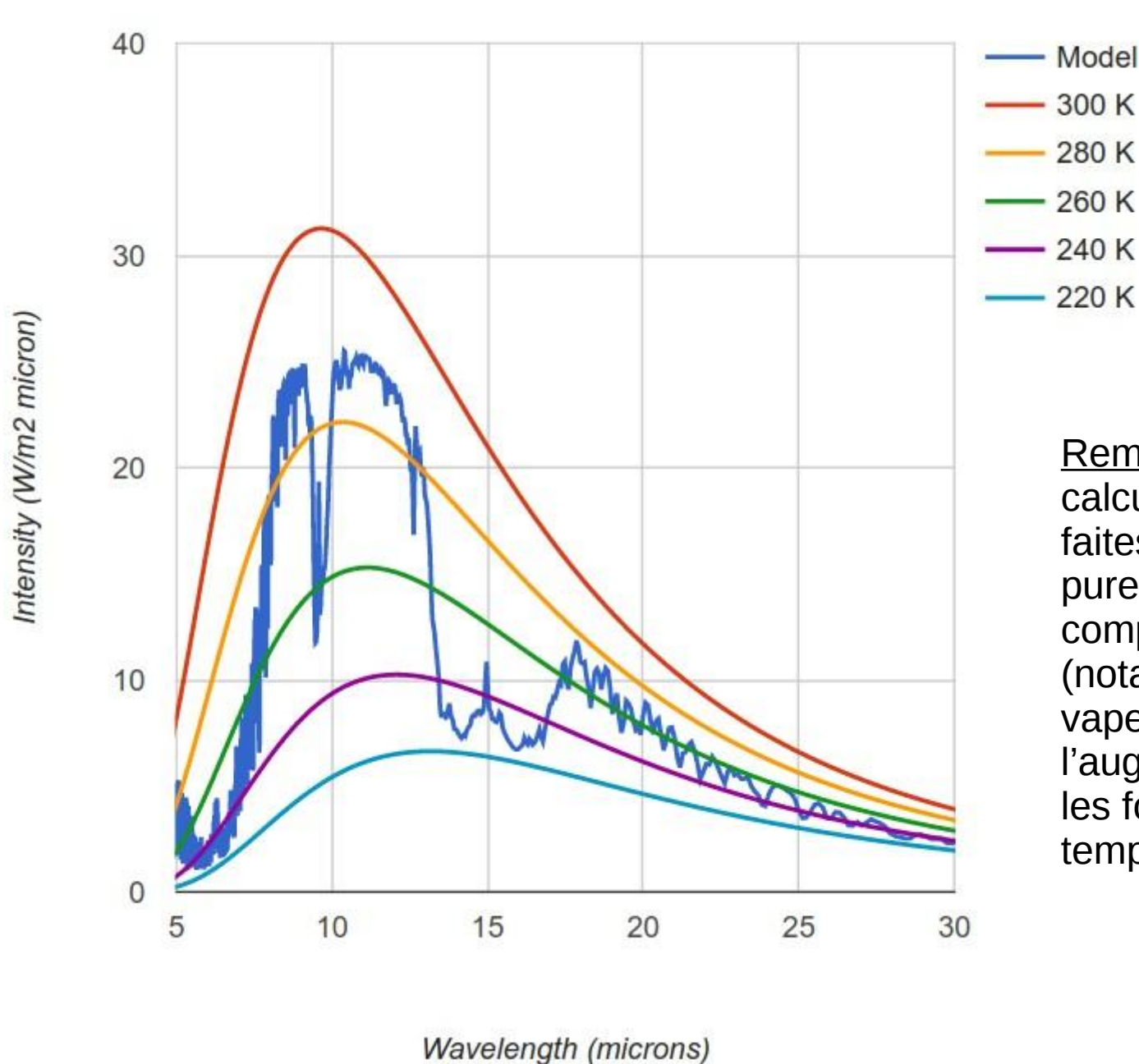


Modèle MODTRAN standard à **2800** ppm de CO₂ (10x plus)

Conséquence d'une augmentation de GES : ex. du CO₂ (modèle)



Conséquence d'une augmentation de GES : ex. du CO₂ (modèle)



Modèle MODTRAN standard à **2800** ppm de CO₂ (10x plus)

Remarque : ces 2 simulations, qui calculent **+4,2 K** d'écart au sol sont faites avec un modèle 1D et purement radiatif qui ne prend en compte ni les rétroactions diverses (notamment l'augmentation de H₂O vapeur a priori consécutive à l'augmentation de température), ni les fortes inégalités spatiales et temporelles (latitudes, saisons).

Analogies sur l'effet de serre et son augmentation

Idée 1 : une maison plus ou moins isolée

D'après Fourier on a une densité de flux à travers les parois (par m²) F :

$$F = \lambda \Delta T / e$$

avec λ la conductivité thermique des parois, e leur épaisseur, ΔT l'écart de température entre intérieur et extérieur (T extérieure qu'on suppose fixée).

Le flux **F est fixé** et analogue au flux de chaleur que la Terre évacue vers l'espace (= flux solaire absorbé)

On a 2 façons de faire une analogie avec l'augmentation des GES :

- on *augmente l'épaisseur d'isolant e* (« épaisseur » de GES dans l'atmosphère)
- on *diminue la conductivité λ* (atmosphère plus opaque)

Et alors il vient qu'à **F constant** l'écart de température **ΔT augmente**.

Si T_{ext} n'a pas changé, l'intérieur de la maison chauffe jusqu'à ce que ΔT permette au flux F fixé de passer à travers les parois.

Attention :

en conduction le flux F est proportionnel à l'écart **ΔT**

en rayonnement le flux F est proportionnel à la puissance 4 de la température absolue : **T^4 !**

- augmenter l'épaisseur d'isolant de sa maison e de 1% (x1.01) multiplie ΔT (en K) par 1.01 (ex. 20 → 20.2 si on chauffait à 20°C depuis 0°C dehors)
- augmenter l'opacité de l'atmosphère de 1% multiplie T (absolue) par ≈ 1.0025 (300 → 300,75)

Analogies sur l'effet de serre et son augmentation

Idée 2 : variante : le « seau percé »

Attention : une idée plus délicate à faire passer car faisant d'une pression l'analogie d'une température...

Un seau percé de trous à sa base est placé sous un robinet ouvert à débit constant (analogue du flux thermique que la Terre absorbe = émet). La pression à la base du seau monte jusqu'à permettre un débit d'évacuation par les trous égal à celui du remplissage par le haut.

La hauteur d'eau / pression est analogue à la température à la surface de la Terre. Le volume d'eau dans le seau est analogue à la quantité de chaleur à la surface de la Terre.

Si on bouche un ou plusieurs trous le débit d'évacuation diminue (analogue à l'opacité de l'atmosphère arrêtant plus de rayonnement)

Le niveau dans le seau monte alors (analogue à la chaleur qui s'accumule), augmentant la pression au niveau des trous, et le débit d'évacuation

Un nouvel équilibre dynamique s'établit.

→ attention aux malentendus possibles (la chaleur **n'est pas** un fluide ! etc.)

Analogies sur l'effet de serre et son augmentation

Idée 2 : un pommeau de douche plus ou moins « ouvert »

Attention : une idée plus délicate à faire passer car faisant d'une pression l'analogie d'une température...

Avec un même débit d'eau sortant d'un pommeau de douche (analogie du flux thermique que la Terre évacue = le flux solaire reçu), on a une pression d'eau sortant du pommeau, celle dans le pommeau, variant selon l'ouverture des trous :

- avec beaucoup de trous ouverts (atmosphère plus transparente au rayonnement thermique) la pression est plus faible
- avec peu de trous ouverts (atmosphère plus opaque au rayonnement thermique) la pression est plus forte

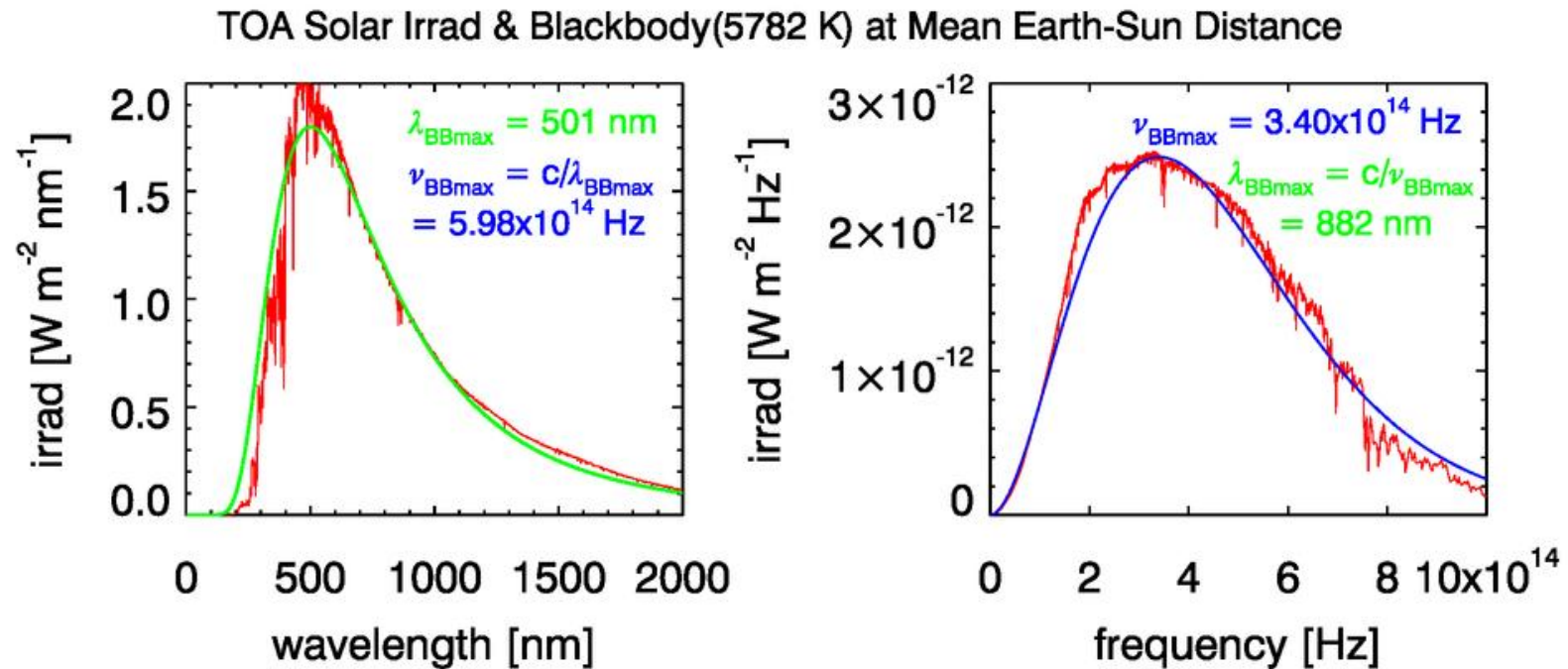
La pression dans le pommeau deviendrait une analogie de la température de la Terre. Le flux d'eau correspondrait au flux de chaleur.

→ attention aux malentendus possibles (la chaleur **n'est pas** un fluide ! etc.)

Conclusion

- On a vu comment montrer opacité et transparence au rayonnement ainsi que réflexion et absorption avec 2 manips simples. On peut faire émerger la notion d'équilibre thermique radiatif.
- On a comparé nos manips avec l'atmosphère terrestre pour ses propriétés radiatives (transparence et opacité, due aux GES)
- On a construit un bilan radiatif simplifié de la Terre avec une atmosphère réaliste au 1^{er} ordre pour son opacité et transparence, et isotherme.
- On a vu la différence avec la véritable atmosphère, au gradient de température décroissant avec l'altitude.
- On a pu avec ce modèle mettre en évidence sur le spectre terrestre (et le bilan radiatif) la conséquence d'une augmentation de GES dans l'atmosphère : un réchauffement de la surface.

Annexe : longueur d'onde vs. Énergie (ou fréquence) et « pic » de rayonnement



Selon la façon de « grouper » le rayonnement par nm ou par Hz, on « construit » des flux dont le contenu énergétique n'est pas proportionnel sur chaque intervalle de longueur d'onde et vice-versa.

Cela se comprend en voyant ces courbes comme des histogrammes d'énergie.

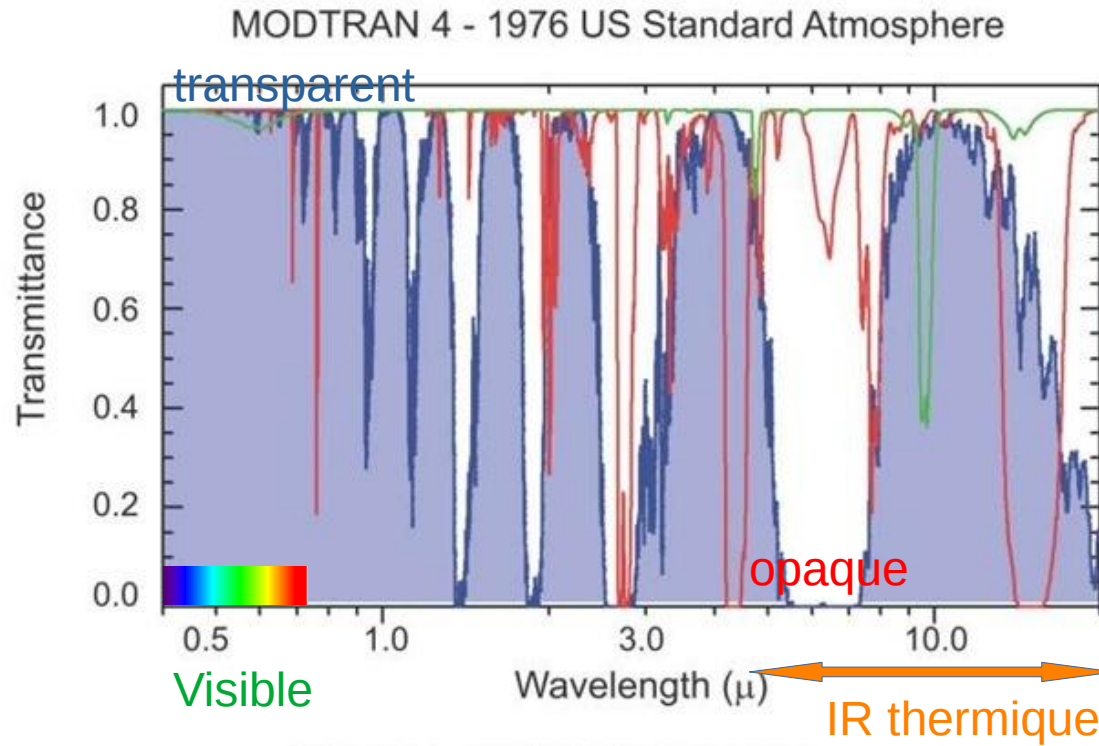
Par ex. l'intervalle 200-400 THz (200 THz) correspond à 750-1500 nm (750 nm) mais l'intervalle « identique » en énergie 400-600 THz correspond à 500-750 nm (250 nm, 3 fois moins !). Le pic de rayonnement en énergie est donc « poussé » vers les plus basses énergies, dont les points de courbe « regroupent » une plus grande gamme de longueur d'onde.

L'inverse est tout aussi valide : l'intervalle 500-750 nm (250 nm) correspond à 400-600 THz (200 THz) mais l'intervalle « identique » 750-1000 nm correspond à 300-400 THz (100 THz, 2 fois moins !) : le pic de rayonnement en longueur d'onde est « poussé » vers les plus courtes longueurs d'onde, dont l'histogramme « regroupe » une plus grande gamme d'énergies.

Annexe : opacité et transparence de l'atmosphère

Autre présentation : transmission de l'atmosphère

Sans diffusion



Avec diffusion

