

6- Absorption et émission du rayonnement infrarouge thermique par la vapeur d'eau et par le dioxyde de carbone

6-1 Epaisseur optique

Un faisceau de lumière dirigé est, à la traversée d'un corps, atténué en $\exp[-t]$ où t est l'épaisseur optique de ce corps, une grandeur sans dimension, qui dans le cas homogène de la figure 5-5 (absorption par l'eau liquide) est le produit du coefficient linéique d'absorption par la distance traversée.

Pour un rayonnement diffus, la transmission est une fonction de l'épaisseur optique t , fonction qui peut être approchée par $\exp(-t) / (1+0,65 t)$ et vaut **20% pour $t=1,07$** , 5% pour $t=2,15$ et 1% pour $t=3,5$.

La figure 1 montre aux fréquences de l'infrarouge thermique l'épaisseur optique t pour une valeur moyenne de 25 kg/m² de vapeur d'eau et 6 kg/m² de dioxyde de carbone.

Figure 6-1 Epaisseur optique totale de l'air pour 25 kg/m² de vapeur d'eau et 6 kg/m² de dioxyde de carbone

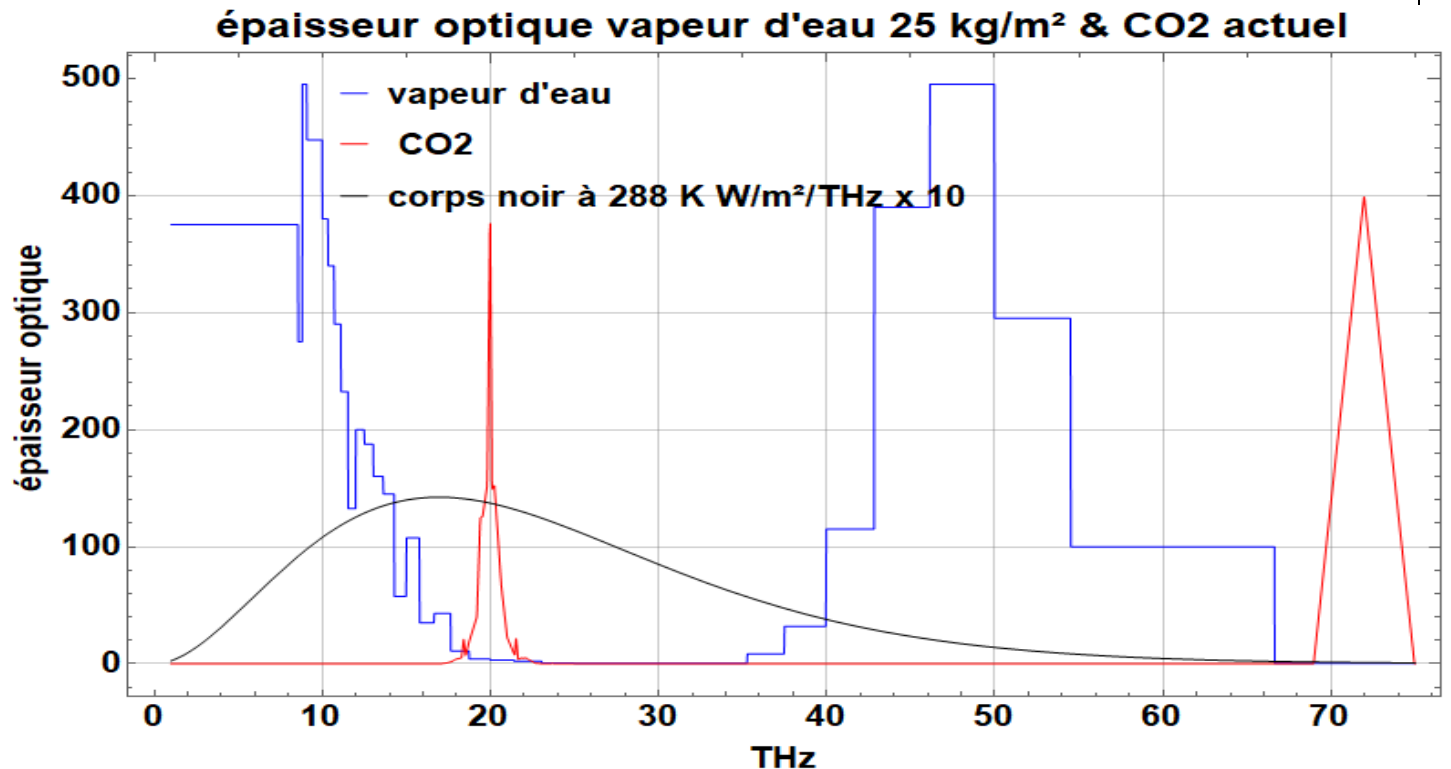
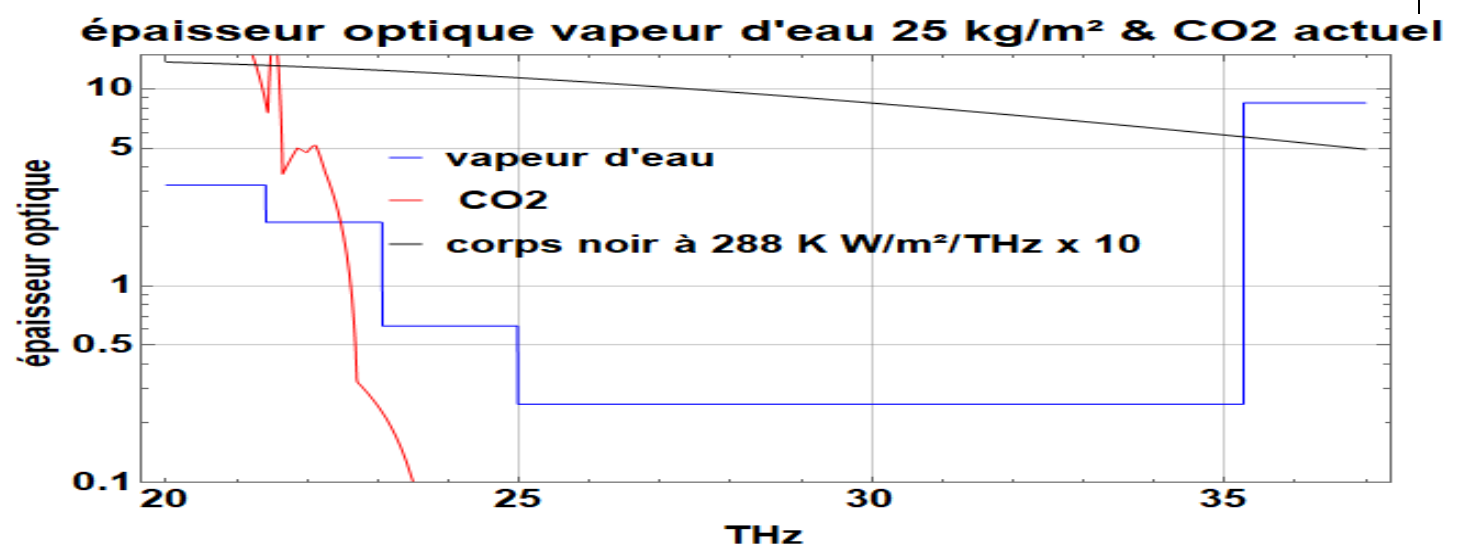


Figure 6-2 La fenêtre de la vapeur d'eau par ciel sans nuage, hypothèse basse (effet du continuum sous-estimé)



Rappelons que la quantité de vapeur d'eau varie de 4 kg/m² pour une surface très froide à 70 kg/m² dans la zone équatoriale ; les quantités de vapeur d'eau cumulées sur toute la hauteur de l'air sont pour les cinq

profils-types des figures 1-3 et 1-4, en tropical 40,6 kg/m², et, pour les moyennes et les hautes latitudes, 29 kg/m² et 20,7 kg/m² en été, et 8,5 kg/m² et 4,3 kg/m² en hiver.

Mais la teneur de l'air en vapeur d'eau en kg par tonne d'air est très inhomogène et varie dans un rapport mille entre la surface et la haute troposphère.

6-2 Altitude du rayonnement vers le cosmos et origine du refroidissement de l'air par émission d'infrarouge thermique

Une couche de gaz d'épaisseur optique 1,07 absorbe 80% du rayonnement incident sur l'une ou l'autre de ses faces, ne laisse passer que 20% ; elle fournit donc à peu près 80% du rayonnement total qui sort par ses faces.

Pour 30 kg/m² de vapeur d'eau aux fréquences où l'épaisseur optique est 107 ce sera une couche de 300 grammes de vapeur d'eau qui, en haut ou en bas de la troposphère, produit le gros (80%) du rayonnement vers le cosmos ou vers la surface.

Comme vu aux figures 1-3 et 1-4 la teneur en vapeur d'eau est pour les cinq cas-types, en surface, par tonne d'air, 16 kg, 11,5 kg, 7,5 kg, 2,5 kg et 1 kg.

En surface une tonne d'air occupe 100 mbar environ puisque l'on a 10,3 tonnes d'air sur 1013 millibar, et les 300 grammes tiennent dans

$(0,3 \text{ kg} / 16 \text{ kg/tonne d'air}) \times 100 \text{ mbar} / \text{tonne} = 1,9 \text{ mbar}$ en tropical

$(0,3 \text{ kg} / 1 \text{ kg/tonne d'air}) \times 100 \text{ mbar} / \text{tonne} = 30 \text{ mbar}$ en hiver des hautes latitudes.

Le tableau 1-B dit, près de la surface, une altitude $z(p)$ en $z(p) = T_0 / \gamma (1 - (p/p_0)^{0,19})$ soit

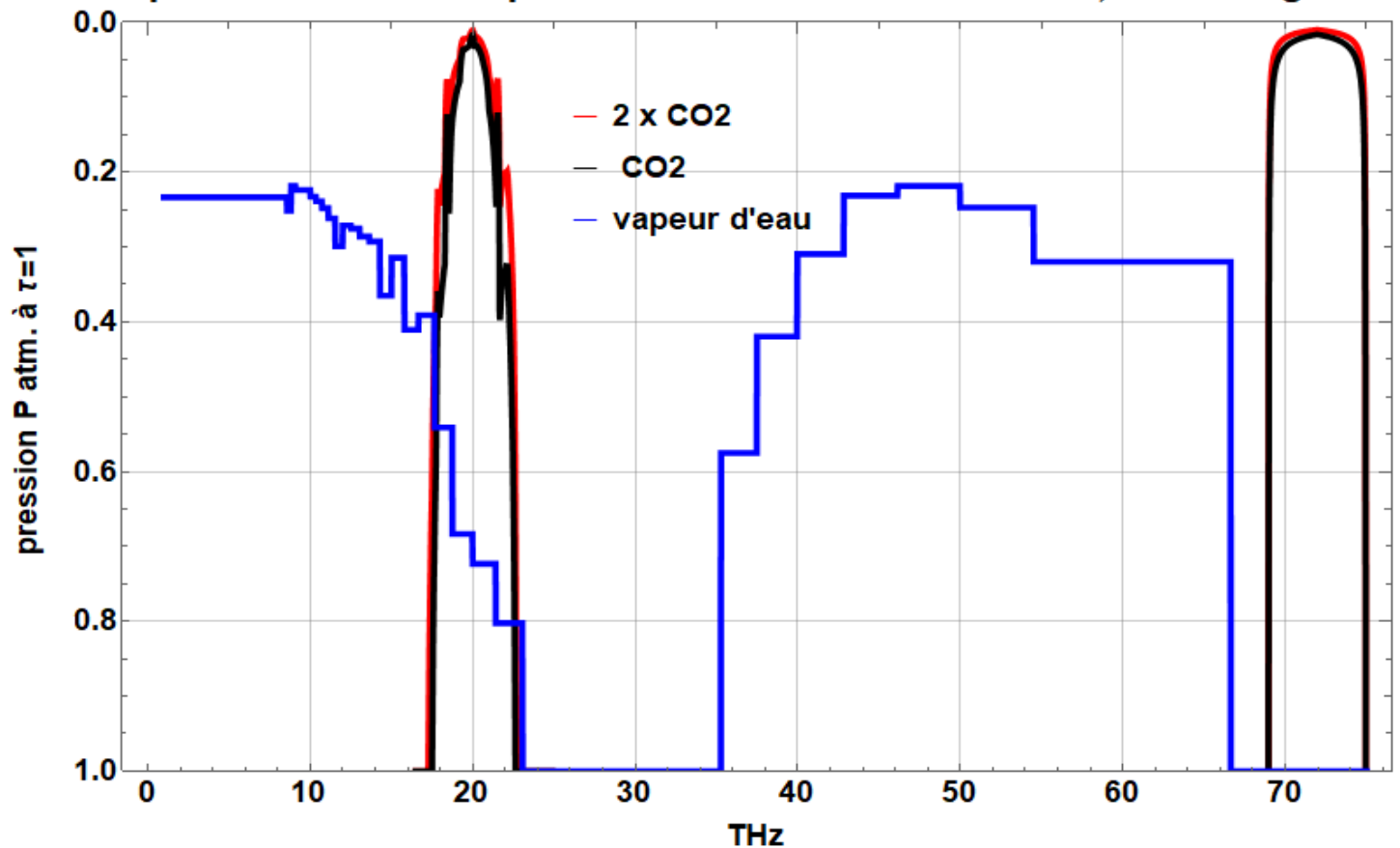
$300 \text{ K} / 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K/m} (1 - (1 - 1,9 \cdot 10^{-3})^{0,19}) = 17 \text{ mètres}$ en tropical pour 1,9 mbar,

$270 \text{ K} / 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K/m} (1 - (1 - 30 \cdot 10^{-3})^{0,19}) = 240 \text{ m}$ pour $T_0 = 270 \text{ K}$ et 30 mbar de l'hiver des hautes latitudes.

La position de la couche d'épaisseur optique 1,07 qui en haut de l'air assure le gros du rayonnement vers le cosmos peut être évaluée grossièrement, séparément pour la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone en supposant une épaisseur optique croissant comme le cumul de la vapeur d'eau en $P^{4,2}$ (voir figures 1-3 et 1-4, exercice 1-2 du § 1-4 et figure 1-6) et comme le cumul du CO₂ en $P^{1,45}$ ce, pour rendre compte de l'élargissement des raies d'absorption quand la pression augmente.

Figure 6-3 Position du bas de la couche d'épaisseur optique 1 pour la vapeur d'eau (30 kg/m²), pour le dioxyde de carbone actuel (en noir) et après doublement de la teneur en dioxyde de carbone (en rouge).

position de $\tau=1$ compté du haut de l'air CO₂ & 2xCO₂, H₂O 30 kg/m²



La figure 3 montre que doubler la teneur de l'air en dioxyde de carbone (la courbe rouge remplace la courbe noire) ferme très légèrement la fenêtre de la vapeur d'eau vers 22 THz et réduit donc le rayonnement qui, échappant aux nuages et à la vapeur d'eau, passe directement de la surface au cosmos ; cet effet l'ordre de $0,8 \text{ W/m}^2$ par ciel clair. Il est à réduire du rapport du rayonnement de la surface parvenant au cosmos en moyenne (effet des nuages inclus), 22 W/m^2 en moyenne globale, au rayonnement de la surface parvenant au cosmos par ciel clair sans nuage, disons 50 W/m^2 dans la fenêtre.

Ne reste donc, pour effet du doublement de la teneur de l'air en dioxyde de carbone sur l'absorption du rayonnement de la surface, que $(22 / 50) \times 0,8 \text{ W/m}^2 = 0,35 \text{ W/m}^2$ qui au lieu d'aller de la surface au cosmos, passeront par le cycle évaporation, advection (ou déplacement de l'air), condensation, rayonnement en altitude vers le cosmos. Ce supplément d'absorption par le CO_2 est donc négligeable comparé à l'évaporation moyenne de 100 W/m^2 , le double ou le triple en zone tropicale, le tiers aux hautes latitudes (figure 7-2).

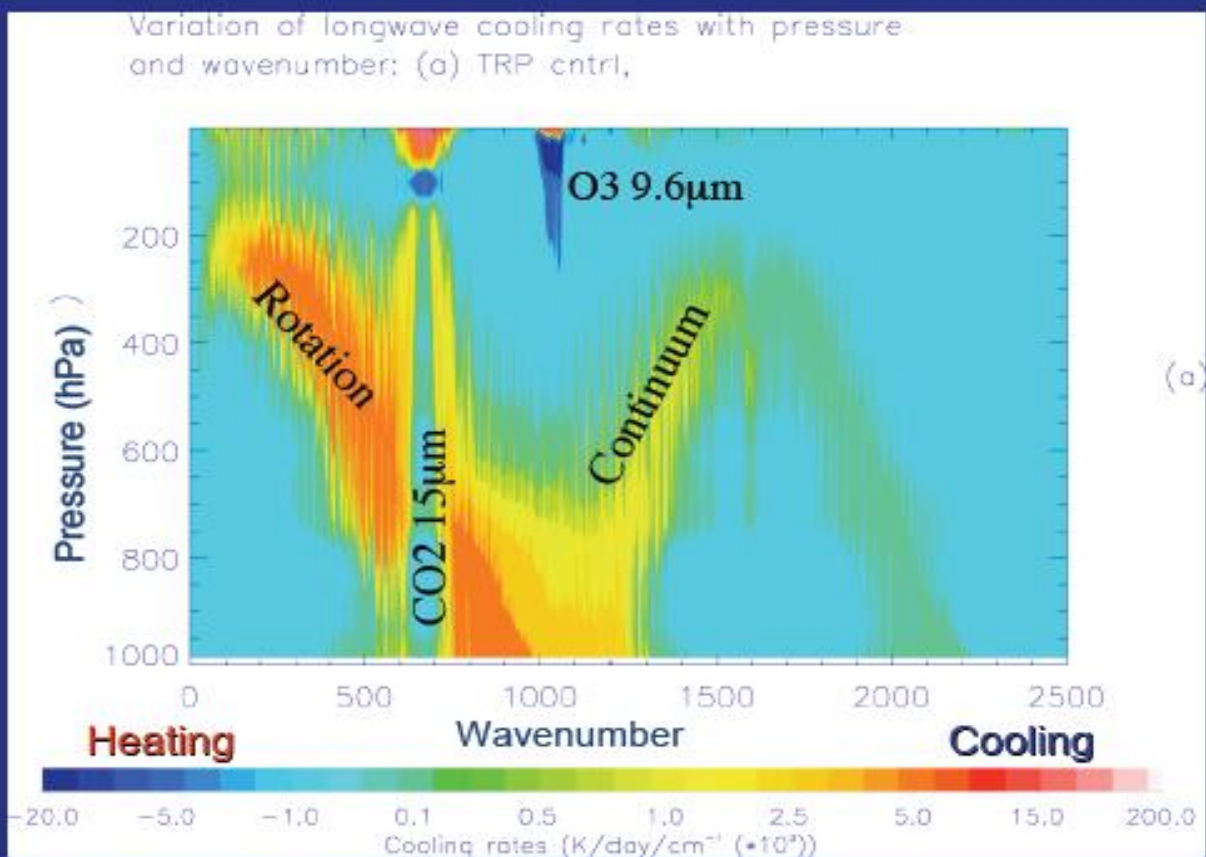
Le calcul « exact » raie d'absorption par raie d'absorption, figure 4 confirme la position des courbes bleues et rouge de la figure 3.

Figure 6-4 Calcul raie d'absorption par raie d'absorption de la position de la couche qui, en haut de l'air, assure le refroidissement du globe exprimé en millième de degré par 24 heures et par cm^{-1} (ou bande spectrale de 30 GHz) cas tropical avec la tropopause vers 100 mbar ou 100 hectoPascal(hPa)

Source :

http://airs.jpl.nasa.gov/Science/ResearcherResources/MeetingArchives/TeamMeeting20060307/2006_03_07/Gettelman_airs_climate.pdf

H₂O dominates Longwave



Brindley & Harries 1998 (SPARC 2000)

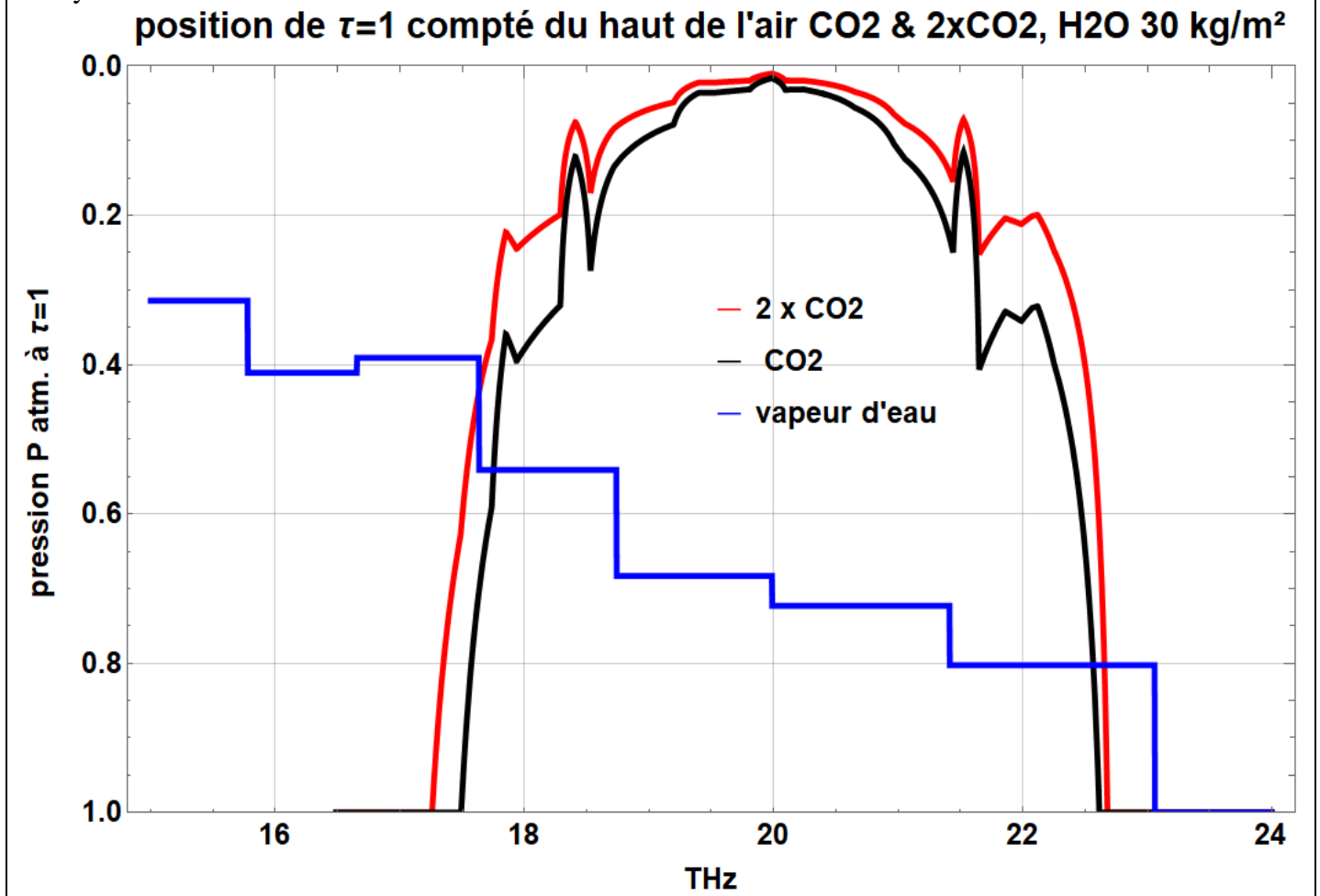
La sommation sur tout le spectre de l'infrarouge thermique montre un refroidissement par rayonnement vers le cosmos de l'ordre de 2 degrés par 24 heures à peu près uniforme entre la surface et 200 mbar. Bien noter que le CO_2 en réchauffant la tropopause (le point bleu à 100 mbar et entre 600 cm^{-1} et

700 cm^{-1}) contribue au transfert de chaleur de la surface et des basses couches vers les hautes couches de la troposphère, mais bien moins que la condensation et la convection ; augmenter la valeur absolue $|C_h|$ diminue le gradient de température $g/(C_p + |C_h|)$ et à température constante de la tropopause diminue la température de surface.

6-3 Plus haut plus froid pour le dioxyde de carbone et plus bas plus chaud pour la vapeur d'eau

La comparaison des courbes noire et rouge de la figure 3 (agrandie à la figure 5 ci-dessous) montre entre 400 mbar et la tropopause un effet « *plus haut plus froid* » autour de 18 THz et de 22 THz.

Figure 6-5 Effet, dans la troposphère, d'un doublement de la teneur de l'air en dioxyde de carbone sur la position du bas de la couche qui rayonne vers le cosmos évaluée séparément pour la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.



Cet effet « *plus haut plus froid* » amènerait une réduction de l'ordre de $1,8 \text{ W/m}^2$ du flux rayonné vers le cosmos, au bout de deux siècles, temps qu'il faudrait pour passer de 400 ppm à 800 ppm au rythme actuel de $+2 \text{ ppm/an}$ (voir figure 7-10, vignette de gauche).

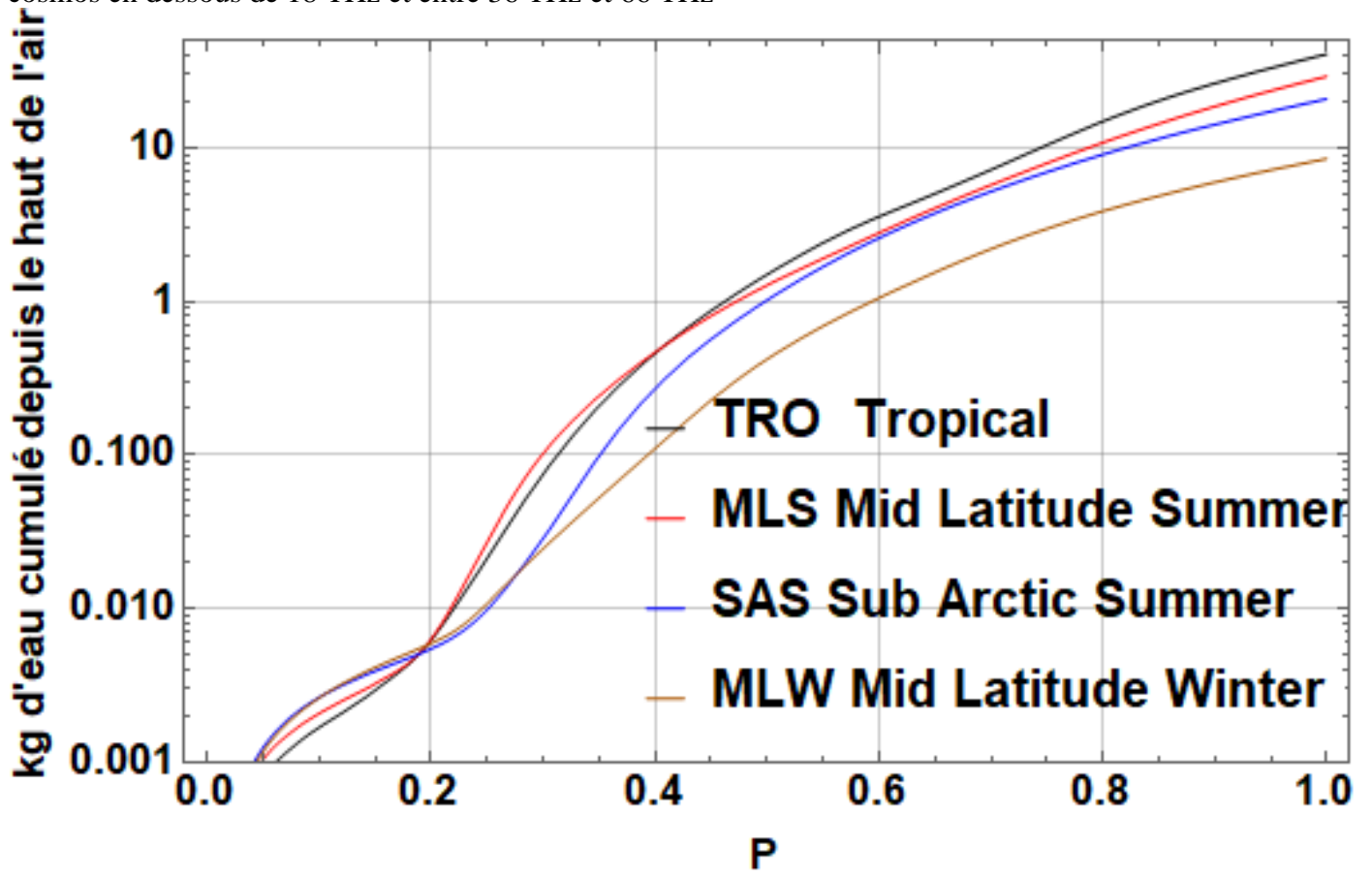
Cela suppose que la vapeur d'eau reste inchangée pendant tout ce temps !

Si le bas de la couche de la vapeur d'eau d'épaisseur optique 1,07 baisse de 10 mbar, en passant par exemple de 290 mbar à 300 mbar entre 1 THz et 18 THz et entre 36 THz et 66 THz (figures 3 et 4), le flux rayonné augmente de $1,6 \text{ W/m}^2$ par effet « *plus bas plus chaud* ».

La **quantité de vapeur d'eau** au-dessus de 500 mbar est dynamique comme vu à la figure 1-7 (l'humidité relative est extrêmement variable et instable entre 400 mbar et 200 mbar), et régule le flux infrarouge thermique émis par le globe vers le cosmos ; la figure 3-3 montre que le contenu calorifique des océans ne change que très peu d'une année à l'autre, d'environ un millième du flux solaire absorbé par le globe, ce qui démontre l'efficacité de la régulation par la quantité de vapeur d'eau entre 100 mbar et 400 mbar, et par les nuages.

Les fables du réchauffement de l'atmosphère par plus de dioxyde de carbone ignorent soigneusement l'existence de la vapeur d'eau et **postulent** que, lorsque le niveau d'émission du dioxyde de carbone monte, c'est **la température** des hautes couches de la troposphère qui doit croître pour compenser le moindre rayonnement vers le cosmos ; la température devrait, nous dit-on, pour un doublement des teneurs en CO₂ croître de 1°C à quelques °C selon les -mauvais- traitements appliqués à la vapeur d'eau dont on suppose l'humidité relative constante ce que dément la figure 8.

Figure 6-6 évolution (échelle logarithmique en kg/m²) de la quantité cumulée de vapeur d'eau à partir du haut de l'atmosphère en kg/m² montrant la position des derniers 100 à 300 grammes de vapeur d'eau par m² entre 0,2 atm et 0,4 atm ; ces derniers 200 grammes font, hors fenêtre, le rayonnement du globe vers le cosmos en dessous de 18 THz et entre 36 THz et 66 THz



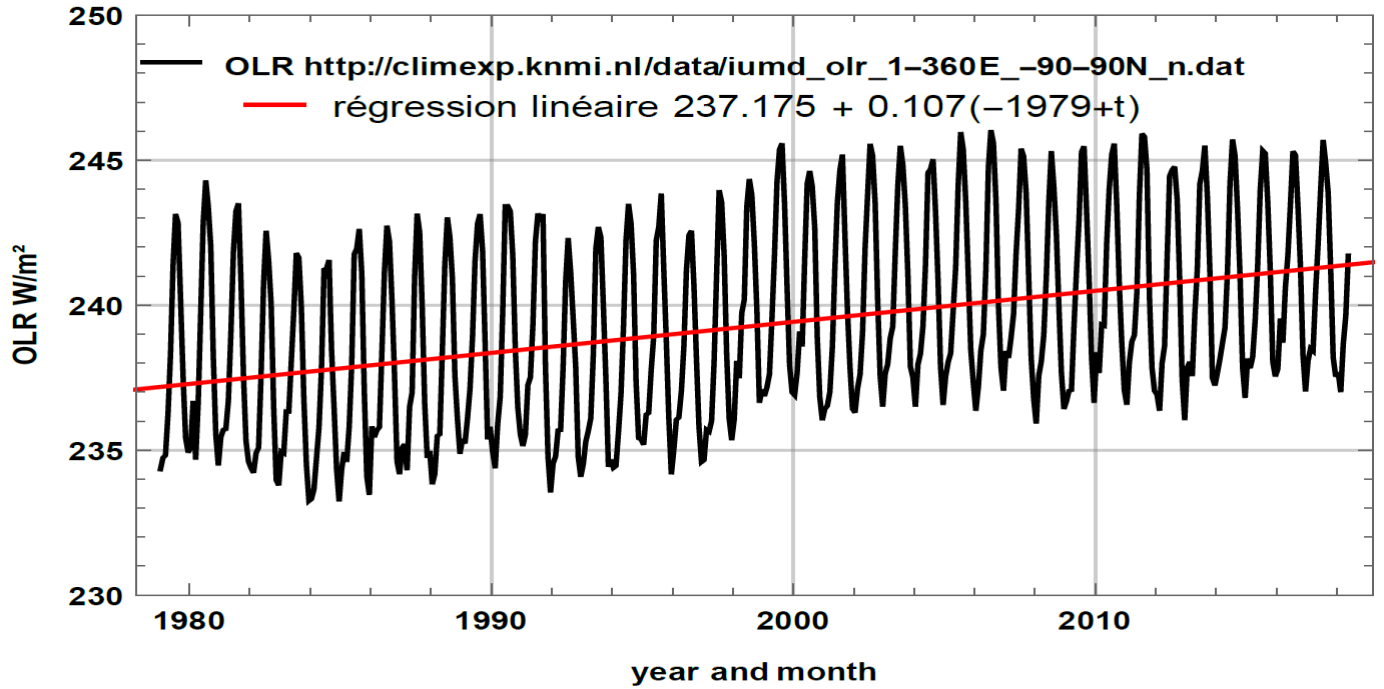
Les observations (figure 7) montrent **une augmentation** du rayonnement thermique émis par le globe d'environ 1,1 W/m² / décennie, ce malgré une augmentation sur 1979-2018 de 21% de la teneur de l'air en CO₂.

L'effet *plus haut plus froid* du CO₂ n'est pas visible !

Ce que l'on voit est l'effet « *plus bas, plus chaud* » de la vapeur d'eau.

Figure 6-7 Variations du rayonnement global moyen vers le cosmos observé par divers satellites depuis 1979.

La teneur de l'air en CO₂ est passée de 336 ppm en 1979 à 407 ppm en 2018.



La figure 8, vignette du bas, montre, après 1980, une décroissance de l'humidité autour de 300 mbar (9 km) qui expliquerait que le bas de la couche d'épaisseur optique 1,07 soit descendu, par exemple, de $p = 300$ mbar à $p = 311$ mbar¹. Ces pressions correspondent, pour 288 K en surface, selon la relation $T \sim P^{0,19}$, à des températures de 229,1 K et de 230,7 K².

Comme, à ces températures, $4 \sigma T^3$ vaut $2,75 \text{ (W/m}^2\text{) / K}$, on aurait, en corps noir, une variation du flux $4 \sigma T^3 dT = 2,75 (230,7 \text{ K} - 229,1 \text{ K}) = + 4,3 \text{ W/m}^2$. La figure 3 montre que la vapeur d'eau à ces pressions n'émet que sur une partie du spectre infrarouge thermique, sur 50 THz environ des 75 THz.

En dessous de 600 mbar la température de surface détermine la teneur de l'air en vapeur d'eau, mais n'a d'effet radiatif que dans la fenêtre de la vapeur d'eau (figure 2) : la régulation s'y fait par les nuages (bas) qui réduisent l'ensoleillement, absorbent le flux rayonné par la surface et rayonnent vers le cosmos, par leur face supérieure, à leur température propre.

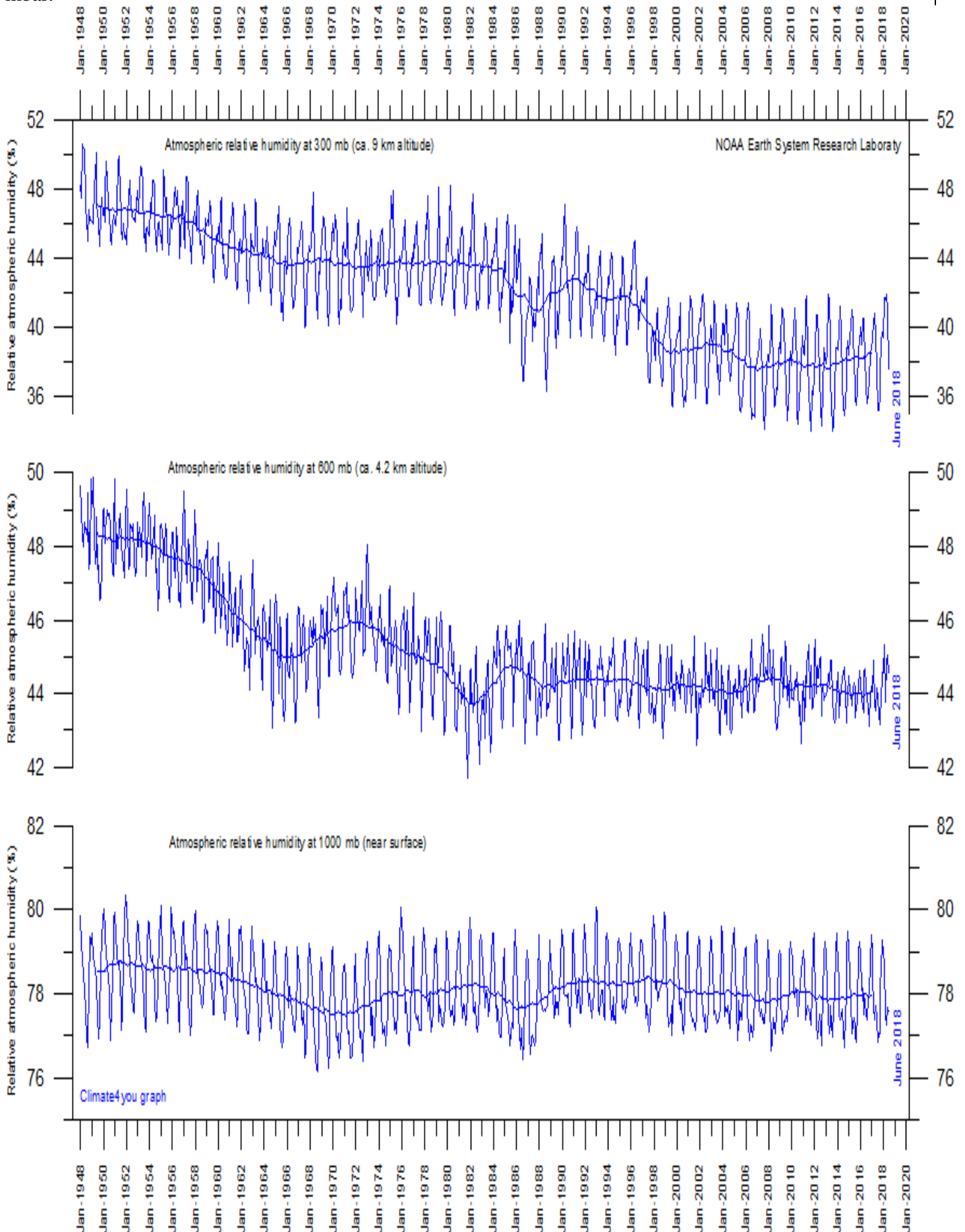
Entre 400 mbar et 200 mbar le mouvement de l'air détermine la quantité de vapeur d'eau dont les observations montrent qu'elle assure une remarquable régulation du rayonnement de l'air vers le cosmos (figures 3 et 4 et figures 7 et 8).

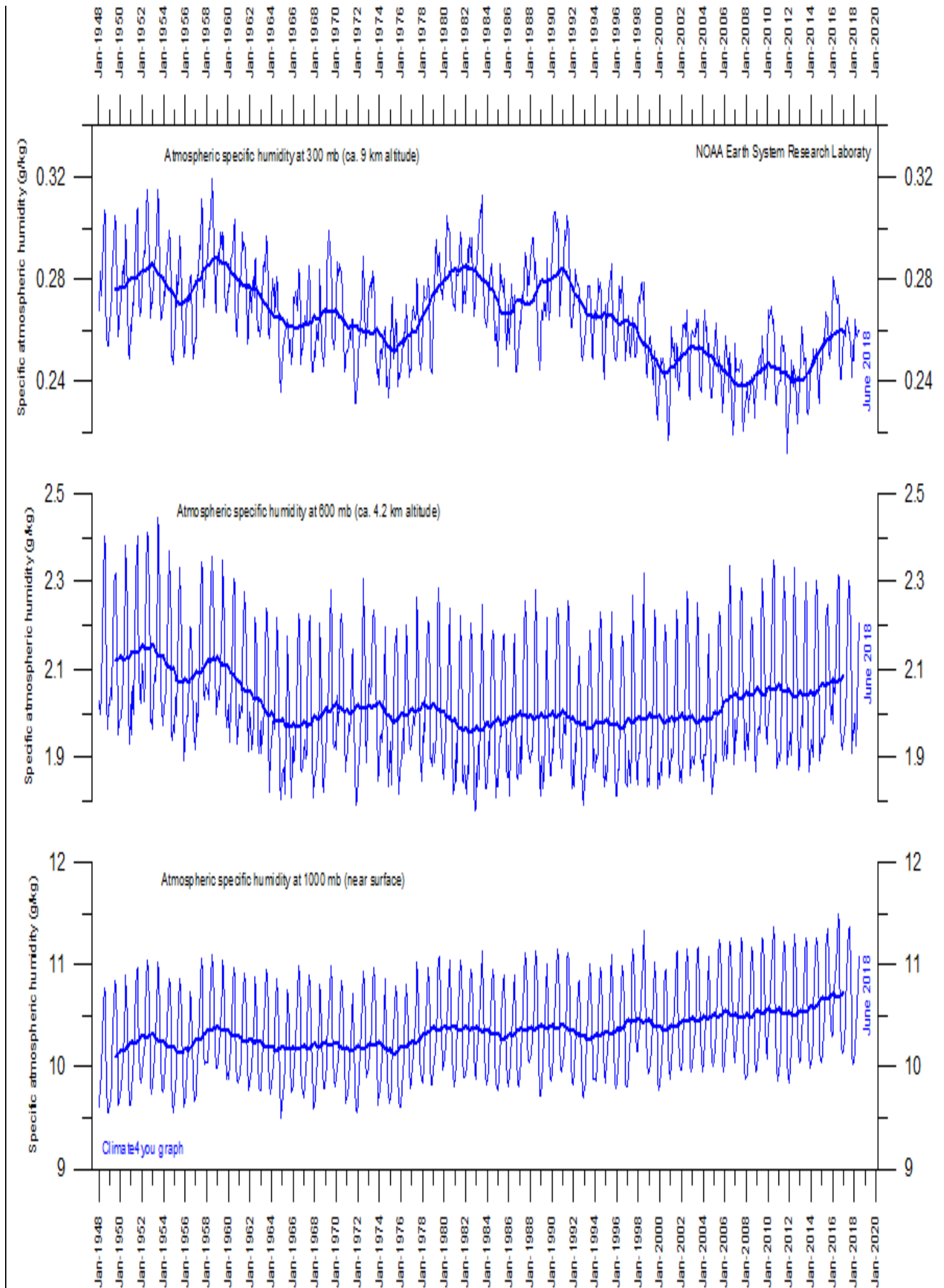
¹ Supposons que la teneur en vapeur d'eau soit, à 300 mbar, passée de 280 grammes par tonne d'air à 240 grammes par tonne d'air.

Comme les teneurs en vapeur d'eau cumulées entre le haut de l'air et p varient en $p^{4,2}$ (figures 1-3 et 1-4 et exercice du § 1-3-2), on aura, avec 240 g/tonne, la même quantité cumulée de vapeur d'eau à 311 mbar = 300 mbar $(280 / 240)^{(1/4,2)}$ que précédemment à 300 mbar et 280 g/tonne.

² Une surface corps noir à ces températures émettrait $156,2 \text{ W/m}^2$ et $160,6 \text{ W/m}^2$ sur tout le spectre soit $+4,4 \text{ W/m}^2$; mais la vapeur d'eau à ces pressions vers 300 mbar ne rayonne que sur une partie du spectre (figures 3 et 4).

Figure 6-8 Variations de l'humidité relative (RH en % de la teneur à saturation) et de l'humidité spécifique (en kg/tonne d'air ou kg de vapeur d'eau par 100 mbar) de 1948 à 2018 source : http://climate4you.com/greenhouse_gases. Courbes pour 300 mbar (9 km), 600 mbar (4,2 km) et 1000 mbar.





6-4 Observations commentées

Les considérations qui précèdent sont à confronter aux réalités de la géographie.

La figure 9 montre la répartition du rayonnement émis par le globe vers le cosmos, en moyenne sur une semaine ; il va, sauf cas particuliers, de 160 W/m² au-dessus de régions très froides à 300 W/m² au-dessus de quelques déserts. A comparer aux émissions de la surface de la Lune entre 2 W/m² (face obscure) et 1270 W/m² (sous le soleil au zénith, en supposant un albédo lunaire de 7%).

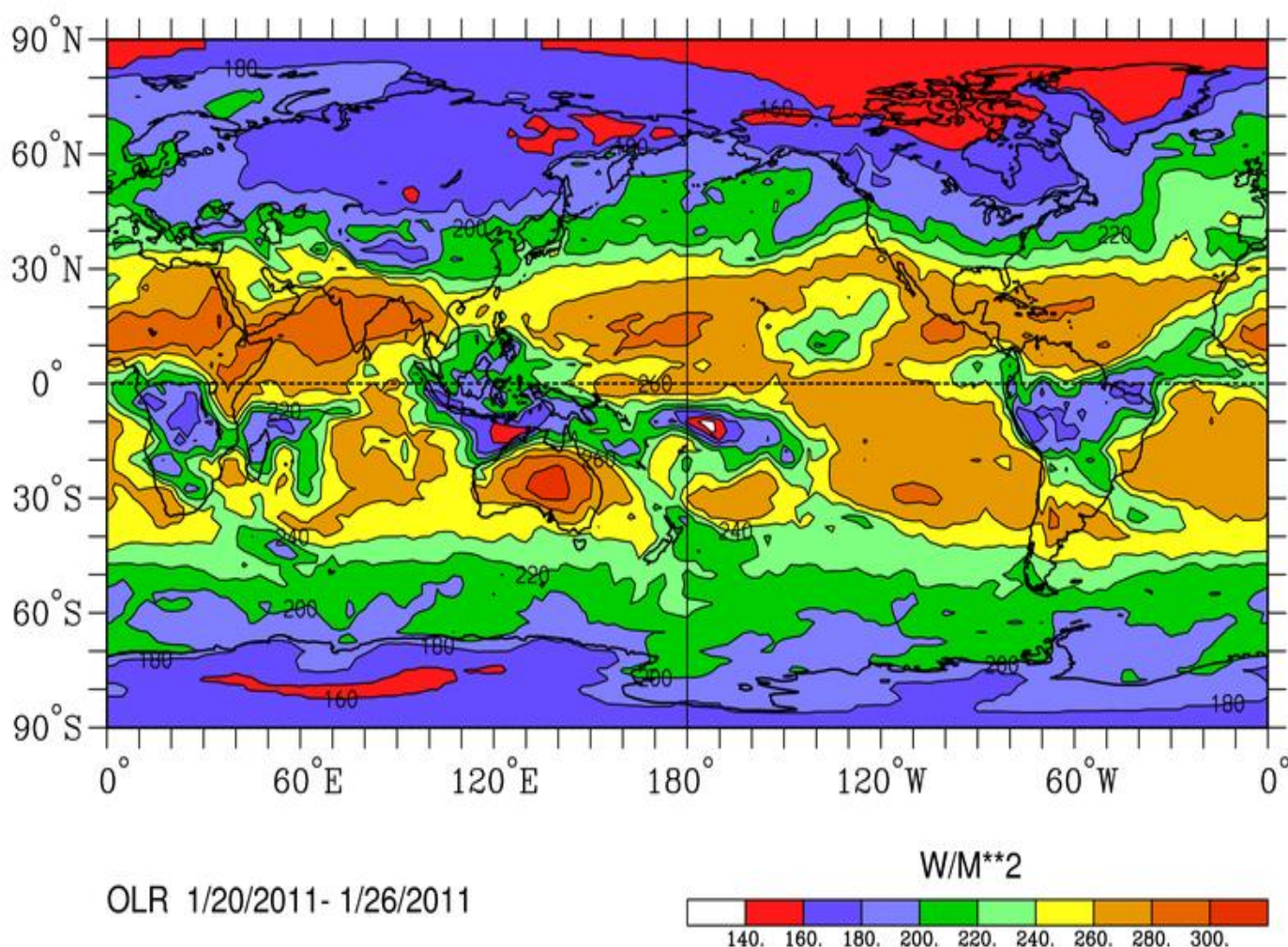
L'équateur météorologique vertical ou « cheminée équatoriale » est à la figure 9, fin janvier, vers 10°S à 15°S et se voit par sa couverture de nuages très hauts (le sommet des « tours convectives ») et très froids ; la mousson arrose alors le sud de l'Afrique, Madagascar, le nord de l'Australie et le Brésil.

En Europe occidentale, vers 40°N à 50°N, l'insolation en janvier en haut de l'atmosphère n'est que de 100 W/m² (en moyenne sur 24 heures : figure 3-2, courbe bleue « Janvier ») et deux fois moindre en surface, alors que le flux rayonné vers le cosmos est de 220 W/m² à 240 W/m² apportés surtout par le mouvement de l'air humide.

Les centres de hautes pressions anticycloniques subtropicales entre 280 W/m² et 300 W/m² rayonnent à la température du haut de la vapeur d'eau que la circulation de l'air³ confine là en-dessous de 2 km, avec, au-dessus, des couches très sèches et subsidentes.

Figure 6-9 Exemple de rayonnement du globe vers le cosmos, observations de fin janvier 2011

Source <https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/clim/olr.hov.shtml>



³ Dont le cisaillement d'alizés : l'alizé supérieur vient d'une haute pression anticyclonique plus à l'est, l'alizé inférieur vient de l'anticyclone le plus proche : cette différence d'orientation empêche le développement de structures convectives et l'humidité reste sous le « stratus marin » qui marque l'ouest des continents vers 20° de latitude ; l'air au-dessus est très sec et le rayonnement vient de « bas et chaud »

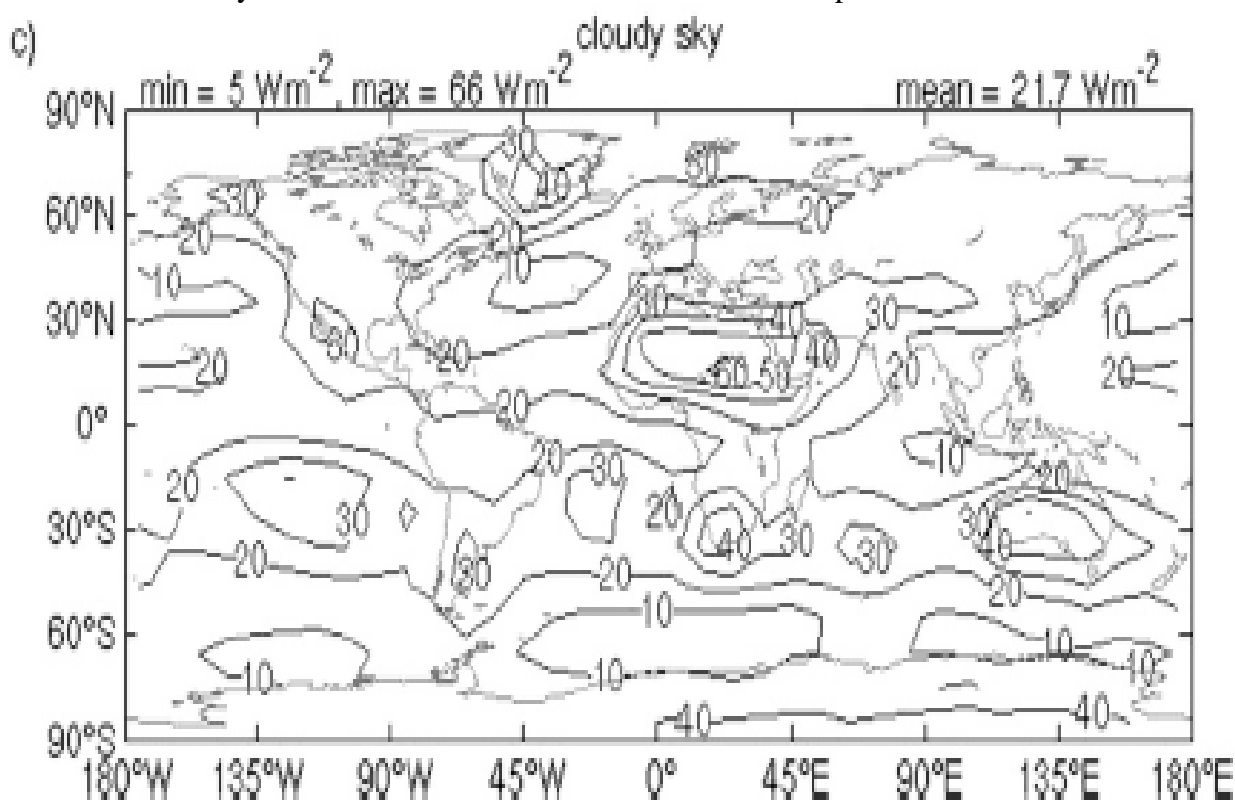
Voir figure 4 de Juno Hsu, 2017 *A Radiative Transfer Module for Calculating Photolysis Rates and Solar Heating in Climate Models: Solar-J 7.5.1* et Marcel Leroux *La dynamique du temps et du climat* Dunod, 2004, 367 pages.

La figure 10 montre que la surface ne contribue que fort peu au rayonnement infrarouge thermique du globe, pour 22 W/m^2 en moyenne sur les 240 W/m^2 de la figure 6-6 dont au moins 220 W/m^2 viennent de la troposphère ou de la surface et le reste, 5 à 15 W/m^2 , de la stratosphère selon l'altitude de la tropopause. **La vapeur d'eau et les nuages font donc la quasi-totalité ($200/220 = 91\%$) du rayonnement du globe hors stratosphère.**

Figure 6-10 Flux infrarouge thermique rayonné par la surface qui parvient au cosmos après avoir échappé à l'absorption par la vapeur d'eau et les nuages.

S.Costa and K. Shine *Outgoing longwave radiation due to directly transmitted surface emission* Journal of Atmospheric Sciences, vol. 69, 2012 pp. 1865-1870

<http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/11.28.19.31.24/doc/Outgoing%20Longwave%20Radiation%20due%20to%20Directly%20Transmitted%20Surface%20Emission-1.pdf>



6-5 Rôle de la stratosphère

Comme la stratosphère rayonne toujours autant, couche par couche, que ce qu'elle reçoit du soleil, elle peut être exclue des bilans de la troposphère et de la surface.

Elle contribue, comme la troposphère au chauffage radiatif de la tropopause par le CO_2 et l'ozone comme vu à la figure 6-4 (pastilles en bleu foncé autour de 100 mbar, tropopause tropicale).

Cet apport est évacué par la vapeur d'eau de la tropopause. (Voir figure 4).