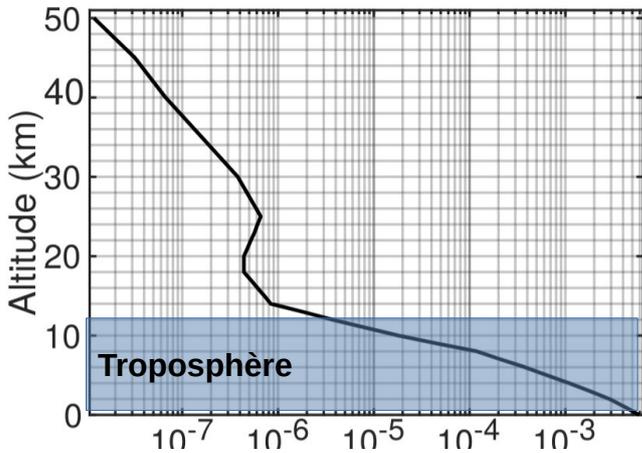


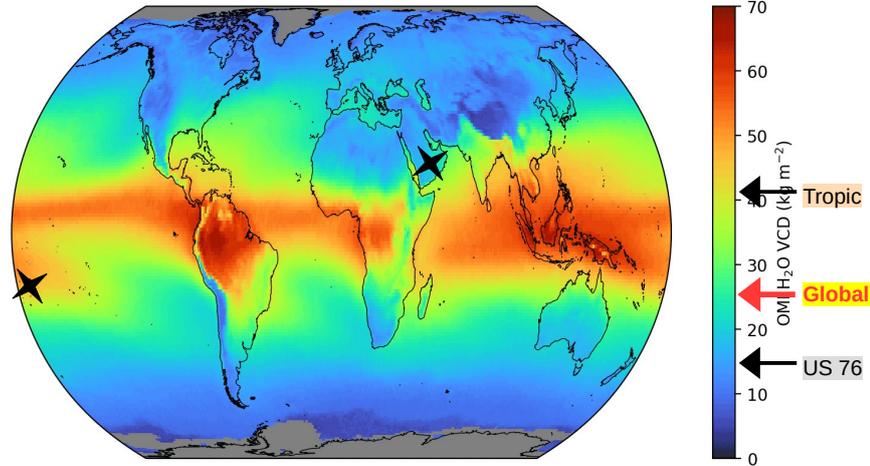
Addendum

1 Atmosphère moyenne ou standardisée ≠ atmosphère réelle

L'absorption des rayonnements infrarouges par l'atmosphère est largement dépendante de la **quantité d'eau (kg/m³)** contenue dans la **totalité de la colonne atmosphérique**. Cette **eau précipitable** est très variable selon la saison et la **latitude** (faible sous les pôles, élevée pour la zone intertropicale : [animation ici](#)).



Eau 'précipitable' (kg/m³) en fonction de l'altitude (km) [US standard 76](#)



Observations 2005-2020 ([ici](#)) Eau 'précipitable' (kg/m²)
2 croix → Péninsule arabique et Fidji (zone intertropicale)

Valeur moyenne **globale** (100 % de la surface du globe)

Total eau atmosphérique ≈ 1,3 10¹⁶ kg Surface Terre = 5,1 10¹⁴ m² Moyenne globale = 1,3 10¹⁶ / 5,1 10¹⁴ ≈ **25 kg/m²**
soit aussi **0,25 %** relativement à la masse totale de la colonne atmosphérique ≈ 10 000 kg/m²

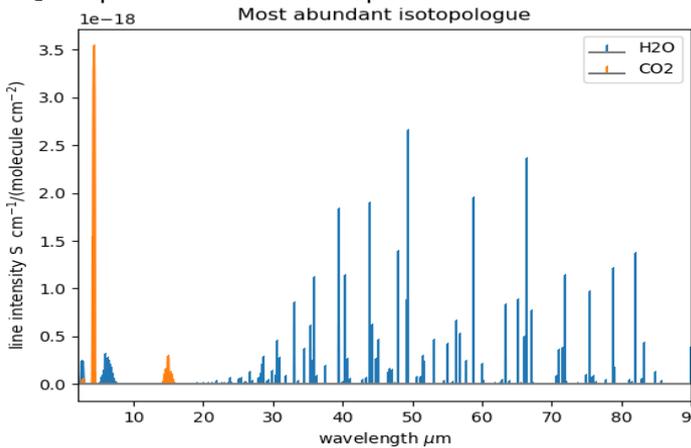
L'**atmosphère 'US standard 76'** pour les latitudes moyennes :

Valeur intégrée verticalement de la quantité de vapeur d'eau : **14,2 kg /m²**. Sources : [#U.S. Standard Atmosphère# \(1976\)](#)

Valeurs tropicales : 41 kg/m² La zone intertropicale entre 23,5 °N et 23,5° S correspond à ≈ **40 % de la surface du globe**

H₂O vapeur d'eau cas intertropical, en surface : 26 000 ppm (260 molécules H₂O pour 10 000 molécules d'air)

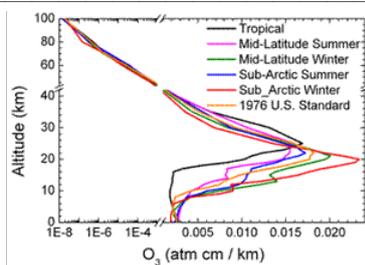
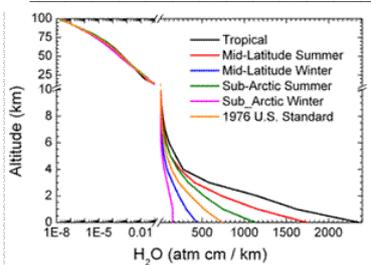
H₂O vapeur d'eau cas intertropical à 7 km d'altitude 1300 ppm 6,3 kg de H₂O par m²



H₂O et CO₂ selon HITRAN <https://vplapps.astro.washington.edu/vplselectmicro.php>

Modèle d'atmosphère	Vapor de l'eau (std atm-cm)	Vapor de l'eau (g/cm ²)	Température de l'air de surface
Hiver subarctique (SAW)	518	0,42	-mundi -munres (de min 3)
Moyen-Latitude Hiver (MLW)	1060	0,85	-1 C (30 F)
États-Unis Norme (États-Unis)	1762	1,42	15° C (59° F)
Été sous-armique (SAS)	2589	2,08	14° C (57° F)
Été de la latitude moyenne (MLS)	3636	2,92	21° C (70° F)
Tropical (T)	5119	4,11	27° C (80° F)

Quantité totale d'eau selon modèles MODTRAN



Profils H₂O et O₃ fonction de l'altitude selon modèles MODTRAN

1.2 Water-vapour pressure

The distribution of water vapour in the atmosphere is generally highly variable, but may be approximated by the equation:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h / h_0) \quad \text{g/m}^3 \quad (6)$$

where the scale height $h_0 = 2$ km, and the standard ground-level water-vapour density is:

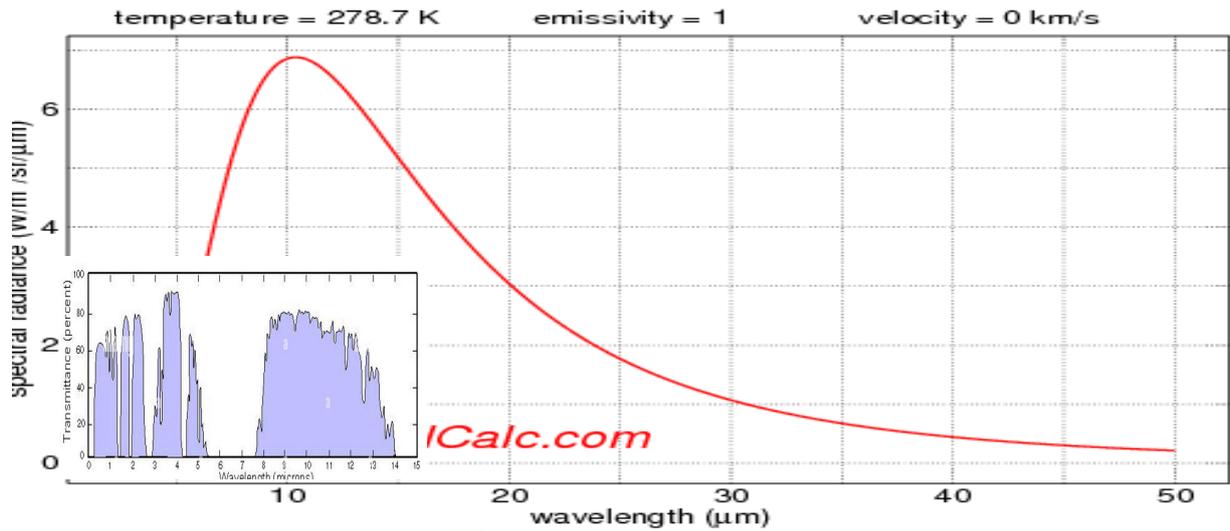
$$\rho_0 = 7.5 \quad \text{g/m}^3 \quad (7)$$

Vapour pressure is obtained from the density using the equation (see Recommendation ITU-R P.453):

$$e(h) = \frac{\rho(h) T(h)}{216.7} \quad \text{hPa} \quad (8)$$

Water-vapour density decreases exponentially with increasing altitude, up to an altitude where the mixing ratio $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$. Above this altitude, the mixing ratio is assumed to be constant.

2 Estimations de l'absorption en basse troposphère pour l'atmosphère 'moyenne'



Les 3 premiers km d'atmosphère contiennent $\approx 1/2$ de l'eau atmosphérique.

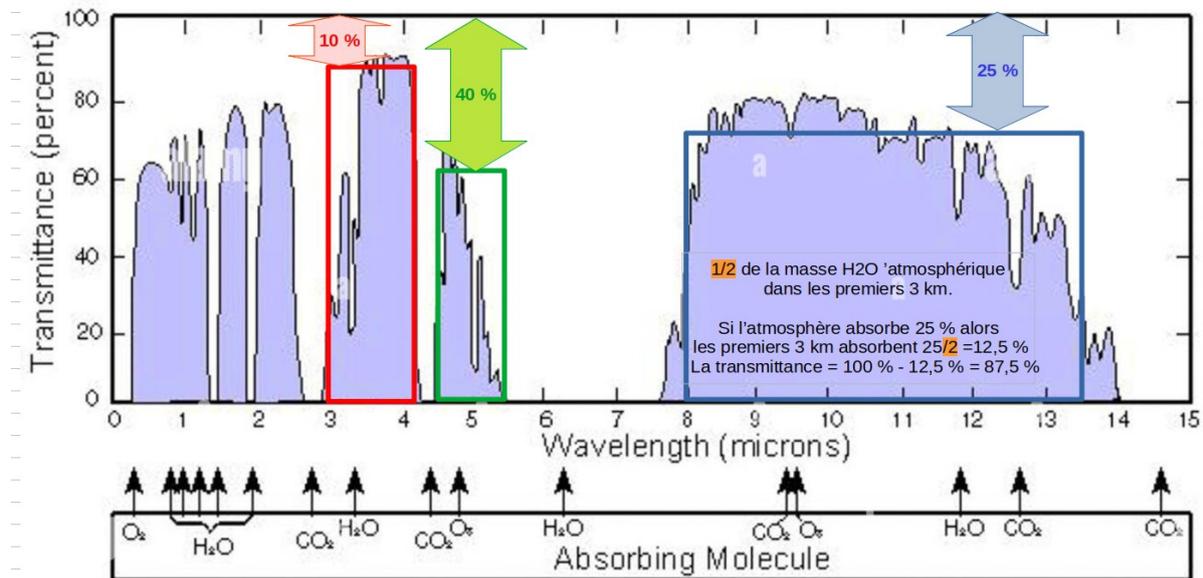
La transmittance de l'atmosphère (8 à 13,5 μm) est de l'ordre de **75 %**. Pour seulement 3 km d'atmosphère, l'absorption sera plus faible et la transmittance plus grande. On adoptera une transmittance corrigée : $100 - (25/2) = 87,5 \%$.

Le calculateur https://spectralcalc.com/blackbody_calculator/blackbody.php estime la radiance pour 3-4 μm ; 4,5-5,5 μm et 8-13,5 μm . La radiance est ensuite corrigée par la transmittance (élevée au carré pour la puissance) pour 3 km d'atmosphère. On passe de radiance ($\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$) vers Émittance déduite (W/m^2) en multipliant par $\pi = 3,1416$.

https://spectralcalc.com/blackbody_calculator/blackbody.php			Emittance	Radiance	100-10/2	100-40/2	100-25/2	radiance	Émittance déduite
			W/m ²	W/m ² /sr	3 μm à 4 μm	4,5 μm à 5,5 μm	8 μm à 13,5 μm	totale	%
Sol	Altitude 0 km	Température 289,5 K	398,3	126,8	0,19	1,87	43,2	34,4	27,2 %
Atmosphère	1,7 km	Température 278,7 K	342,1	108,9	0,11	1,28	35,9	28,4	26,1 %
									89

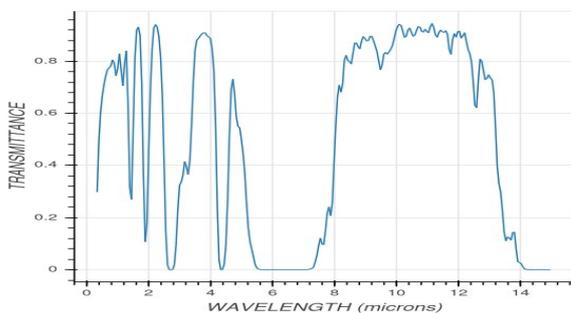
Les 3 fenêtres atmosphériques pour un rayonnement IR de longueur d'onde entre 2,5 μm et 90 μm sont

[3 μm à 4 μm] [4,5 μm à 5,5 μm] [8 μm à 13,5 μm]

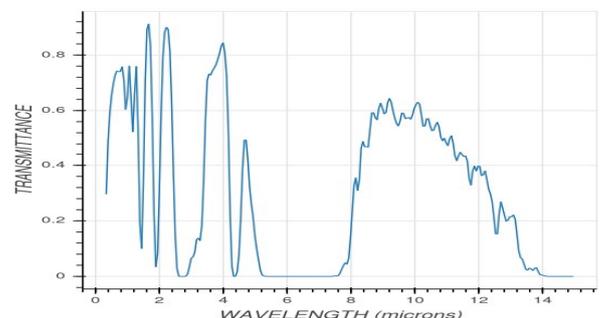


Selon le simulateur Modtran http://modtran.spectral.com/modtran_home la transmittance des 3 fenêtres atmosphériques **varie beaucoup** selon la latitude et les zones géographiques (dépendance de la quantité totale d'eau dans la colonne atmosphérique)

Transmittance en **zone polaire** pour 5 km de basse troposphère

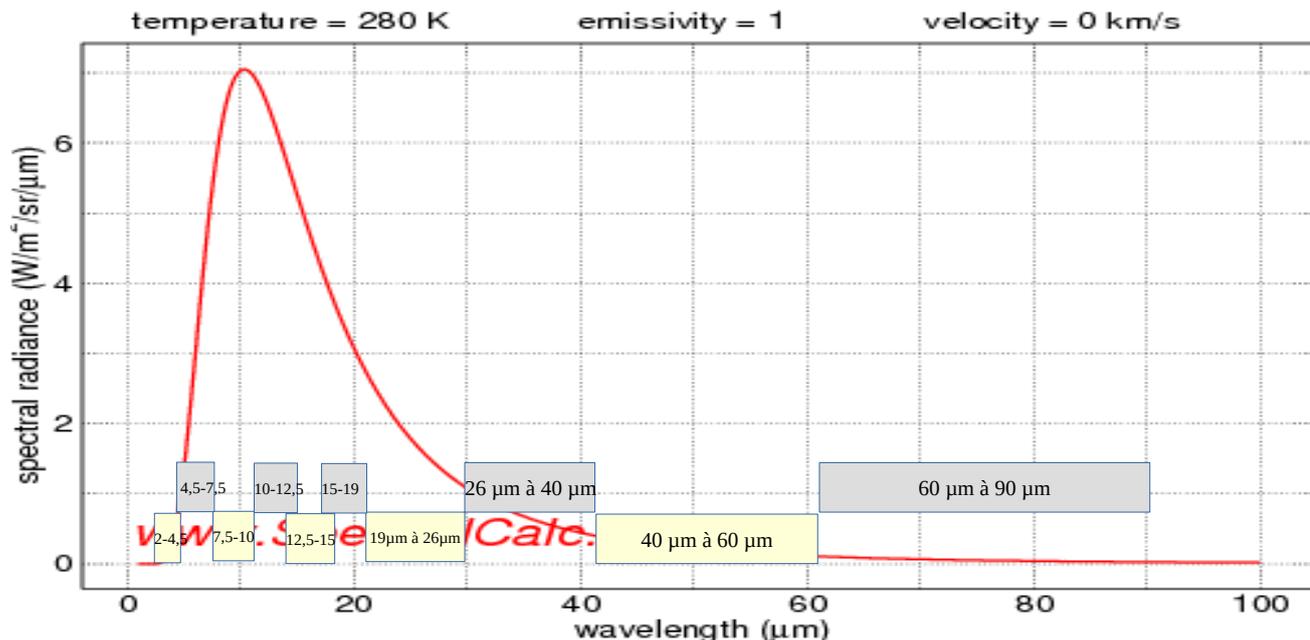


Transmittance en **zone intertropicale** pour 5 km de basse troposphère



3 Estimations du nombre de photons (par seconde et par m²)

La plage 2,5µm à 90 µm est divisée en **10 sous-intervalles** dans lesquels l'énergie par photons reste assez voisine. L'énergie par photon ($E_{\text{photon}} = h c / \lambda$) est estimé avec λ = longueur d'onde du centre de l'intervalle.



Le calculateur https://spectralcalc.com/blackbody_calculator/blackbody.php estime la radiance (Band radiance) pour les 10 sous-intervalles. On passe de Band radiance ($W/m^2/sr$) vers (W/m^2) en multipliant par $\pi = 3,1416$

Le nombre de photons de chaque intervalle est estimé par le rapport band radiance / E_{photon} .

On somme ensuite les 10 sous-intervalles pour estimer le nombre de photons transportant 99 % du flux énergétique.

On somme aussi **5 sous-intervalles englobant largement les 3 fenêtres de transparence atmosphérique.**

Le calcul donnant les estimations pour 3 températures (donc 3 altitudes) figure ci-dessous :

T = 289,5 K altitude 0 398 W/m ²	W/m ²	hc 1,9864748E-25	Band radiance	E photon (J)	Nombre photons	
Intervalle 2,5 µm à 4,5 µm	1,75	5,676E-20			3,083E+19	
Intervalle 4,5 µm à 7,5 µm	36,336	3,311E-20			1,098E+21	
Intervalle 7,5 µm à 10 µm	61,261	2,270E-20			2,698E+21	
Intervalle 10 µm à 12,5 µm	62,93	1,766E-20			3,564E+21	
Intervalle 12,5 µm à 15 µm	52,747	1,445E-20			3,651E+21	1,10E+022 31 % des photons entre 2,5 µm et 15 µm
Intervalle 15 µm à 19 µm	60,281	1,169E-20			5,159E+21	
Intervalle 19 µm à 26 µm	57,642	8,829E-21			6,529E+21	
Intervalle 26 µm à 40 µm	41,55	6,020E-21			6,902E+21	
Intervalle 40 µm à 60 µm	15,51	3,973E-21			3,904E+21	
Intervalle 60 µm à 90 µm	5,634	2,649E-21			2,127E+21	
SOMME	396	↔ 99 % du flux ↔			3,57E+22	99 % 99 % des photons entre 2,5 µm et 99 µm

T = 278,7 K altitude 1700 m 342 W/m ²	W/m ²	hc 1,9864748E-25	Band radiance	E photon (J)	Nombre photons	
Intervalle 2,5 µm à 4,5 µm	1,09	5,676E-20			1,920E+19	
Intervalle 4,5 µm à 7,5 µm	26,76	3,311E-20			8,083E+20	
Intervalle 7,5 µm à 10 µm	49,116	2,270E-20			2,163E+21	
Intervalle 10 µm à 12,5 µm	52,873	1,766E-20			2,994E+21	
Intervalle 12,5 µm à 15 µm	45,563	1,445E-20			3,154E+21	9,14E+021 29 % des photons entre 2,5 µm et 15 µm
Intervalle 15 µm à 19 µm	53,41	1,169E-20			4,571E+21	
Intervalle 19 µm à 26 µm	52,273	8,829E-21			5,921E+21	
Intervalle 26 µm à 40 µm	38,456	6,020E-21			6,388E+21	
Intervalle 40 µm à 60 µm	14,577	3,973E-21			3,669E+21	
Intervalle 60 µm à 90 µm	5,331	2,649E-21			2,013E+21	
SOMME	339	↔ 99 % du flux ↔			3,17E+22	99 % 99 % des photons entre 2,5 µm et 99 µm

T = 270 K altitude 3000 m 301 W/m ²	W/m ²	hc 1,9864748E-25	Band radiance	E photon (J)	Nombre photons	
Intervalle 2,5 µm à 4,5 µm	0,719	5,676E-20			1,267E+19	
Intervalle 4,5 µm à 7,5 µm	20,574	3,311E-20			6,214E+20	
Intervalle 7,5 µm à 10 µm	40,593	2,270E-20			1,788E+21	
Intervalle 10 µm à 12,5 µm	45,506	1,766E-20			2,577E+21	
Intervalle 12,5 µm à 15 µm	40,235	1,445E-20			2,785E+21	7,78E+021 27 % des photons entre 2,5 µm et 15 µm
Intervalle 15 µm à 19 µm	48,16	1,169E-20			4,121E+21	
Intervalle 19 µm à 26 µm	48,079	8,829E-21			5,446E+21	
Intervalle 26 µm à 40 µm	36,01	6,020E-21			5,982E+21	
Intervalle 40 µm à 60 µm	13,829	3,973E-21			3,481E+21	
Intervalle 60 µm à 90 µm	5,096	2,649E-21			1,924E+21	
SOMME	299	↔ 99 % du flux ↔			2,87E+22	99 % 99 % des photons entre 2,5 µm et 99 µm

On peut comparer ces estimations pour 99% des flux 'up' et 'down', avec les valeurs pour 100% de l'[exitance photonique](#)

$$\bar{L}_{\Omega}^{\circ}(T) = \frac{4\pi\zeta(3)k^3}{h^3c^2} T^3 = 1,520 \times 10^{15} T^3$$

Pour 289,5 K (altitude 0) on obtient **3,7 10²²** photons/s/m²
et pour 278,7 K (altitude 1,7 km) on obtient **3,3 10²²** photons/s/m²

4 Atmosphère homogène versus atmosphère réelle (inhomogène)

Dans le §3 de l'article [Trenberth Kiehl](#) (inspirateur de la [figure 7.2 AR6](#)) on peut lire : « We use the U.S. Standard Atmosphere, 1976 for vertical profiles of temperature, water vapor [...] Note that we are using a **single** column model to represent the **average** flux conditions of the atmosphere ».

On montre, à l'aide du simulateur [MODTRAN](#), les dangers de telles simplifications. Selon [MODTRAN](#), en fixant la latitude (locality) et 7 paramètres (CO₂, CH₄, water vapor, etc) on pourrait estimer la transmittance atmosphérique (théorique) et en déduire un flux IR sortant de l'atmosphère (**Upward IR Heat flux**).

4.1 Atmosphère globale 'moyenne' vs atmosphère inhomogène (2 échantillons)

En faisant **varier uniquement** CO₂ (315 ppm – 425 ppm) le simulateur estime que l'évolution 1960-2025 (delta) du flux IR correspondrait à une baisse de **-1,29 W/m²** <https://climatemodels.uchicago.edu/modtran/>
→ réglages (1976 US Standard, no clouds/rain, Water vapor scale = 1, altitude 70 km, looking down).

https://climatemodels.uchicago.edu/modtran/	no clouds/rain	Water vapor scale = 0,8 US Standard	Water vapor scale = 1 US Standard	Water vapor scale = 1,2 US Standard
	Upward IR flux (W/m ²)			
CO ₂ en 1960	315 ppm	272,11	268,88	266,05
CO ₂ en 2025	425 ppm	270,79	267,59	264,83
	delta flux à 70 km altitude	-1,32	-1,29	-1,22
		Moyenne 2 échantillons →	-1,27	

Mais l'atmosphère réelle **n'est pas homogène pour la vapeur d'eau** : la même estimation avec 2 échantillons **symétriques** indique une baisse de -1,32 W/m² dans les zones plus sèches (Water vapor = 0,8) et -1,22 W/m² dans les zones plus humides (Water vapor = 1,2), La **moyenne Δ flux IR des 2 estimations** est (-1,32 + -1,22)/2 = -1,27 W/m², différent de **-1,29 W/m²** (calcul initial avec humidité moyenne).

Échantillons	CO2 1960	CO2 2025	Water scale	Δ IR flux
1	315	425	0,8	-1,32
2	315	425	1,2	-1,22
3	315	425	1,05	...
4	315	425	1,5	...
...
508	315	425	1,3	...
509	315	425	0,7	...
510	315	425	1,01	...
Moyennes	315	425	1	-1,29 ?

Moyenne Δ flux IR avec 510 simulations donnera-t-elle **-1,29 W/m²** ?
(510 échantillons de 1 million de km² recouvrant 100 % du globe)
Le résultat dépend-il du maillage ? (ici maille = 1 million km²)

4.2 Zone intertropicale 'moyenne' (homogène) vs Fidji et péninsule arabique

On reprend le même type de comparaison avec 2 échantillons (Fidji et Péninsule arabique) en zone intertropicale (40 % du globe), dont on fixe Water vapor scale en fonction des **précipitations annuelles** (mm/an).

https://climatemodels.uchicago.edu/modtran/	no clouds/rain	Water vapor scale = 0,064 Tropical atmosphère	Water vapor scale = 1 Tropical atmosphère	Water vapor scale = 1,86 Tropical atmosphère
	Upward IR flux (W/m ²)			
CO ₂ en 1960	315 ppm	343,52	299,68	282,85
CO ₂ en 2025	425 ppm	341,63	298,24	281,63
	delta flux à 70 km altitude	-1,89	-1,44	-1,22
		péninsule arabique 90 mm/an	Tropical 1400 mm/an	Fidji 2600 mm/an
		Moyenne 2 échantillons →	-1,56	

Selon [MODTRAN](#), l'écart avec l'atmosphère tropicale 'moyenne' est encore plus grand : moyenne Fidji / Péninsule arabique = (-1,89 + -1,22)/2 = -1,56 W/m² contre **-1,44 W/m²**. La moyenne Δ flux IR de 203 calculs (203 éch. de 1 million de km² recouvrant la zone intertropicale = 40 % du globe) donnera-t-elle **-1,44 W/m²** ?

4.3 Atmosphère standard US avec **double** variation temporelle pour CO₂ et H₂O

On reprend le même type de comparaison qu'au § 4.1 (avec atmosphère US standard) mais on fait évoluer **simultanément** CO₂ et Water vapor scale pour les 2 échantillons **symétriques** d'atmosphère réelle.

https://climatemodels.uchicago.edu/modtran/	no clouds/rain	Water vapor scale 1 → 1,1 US Standard	Water vapor scale = 1 US Standard	Water vapor scale 1 → 0,9 US Standard
	Upward IR flux (W/m ²)			
CO ₂ en 1960	315 ppm	268,88	268,88	268,88
CO ₂ en 2025	425 ppm	266,15	267,59	269,13
	delta flux à 70 km altitude	-2,73	-1,29	0,25
		+10% humidité entre 1960 et 2025	humidité constante entre 1960 et 2025	-10% humidité entre 1960 et 2025
		Moyenne 2 échantillons →	-1,24	

Selon [MODTRAN](#), la variation **simultanée** de CO₂ et Water vapor influencerait beaucoup le résultat : Δ IR = -2,73 W/m² et Δ IR = 0,25 W/m². Pour ces 2 échantillons **symétriques** (dont les variations d'humidité sont opposées), Δ IR **moyen** = (-2,73 + 0,25)/2 = -1,24 W/m² reste différent de **-1,29 W/m²**.