



L'effet de serre expliqué

par la physique classique, la physique quantique et la spectroscopie

et variation probable de température à venir

Par le Comité scientifique de Terre & Climat TM, Mars 2026, v.06.2

www.laquestionclimatique.org

Résumé - L'effet de serre dû principalement à la vapeur d'eau et au dioxyde de carbone CO₂ présents dans l'atmosphère est encore sensible à une augmentation future du CO₂. L'augmentation du CO₂ depuis 150 ans semble avoir déjà apporté +1,3°C à la surface terrestre. Néanmoins, même en continuant à s'accroître quelques dizaines d'années par les activités humaines, cet effet du CO₂ devrait rester inférieur à +2,5 °C à l'horizon 2100. Il pourrait même, à ce niveau, s'avérer être plutôt bénéfique à la vie sur Terre.

* * * * *

SOMMAIRE

Radiations terrestres
Niveaux d'énergie des molécules et spectres
Collisions, excitation et désexcitation dans l'air
Emission spontanée vs émission induite
Température terrestre moyenne
Influence des Gaz à Effet de Serre (GES)
Rôle de H₂O & CO₂ sur la température
Conclusion

* * * * *

Radiations terrestres

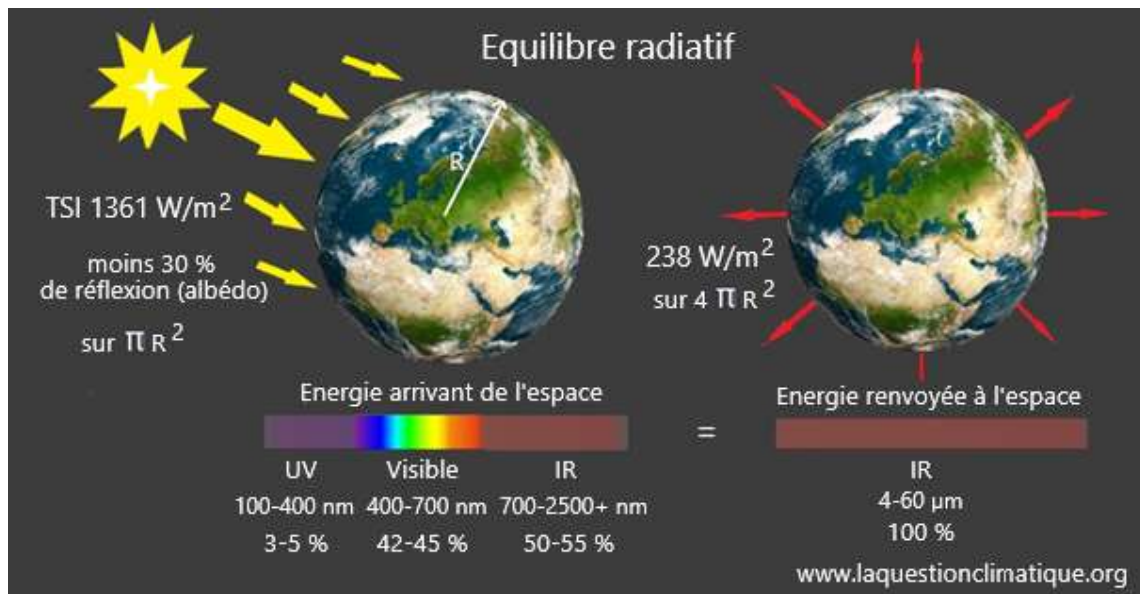
La Terre reçoit du soleil des radiations énergétiques à courte longueur d'onde (Ultraviolet, visible et infrarouge court) et restitue vers l'espace des radiations infrarouges de grande longueur d'onde à travers l'atmosphère.

L'irradiance solaire totale (TSI) est de 1361 W/m² sur une surface réceptrice de disque terrestre égale à πR^2 . L'albédo, c'est-à-dire des réflexions diverses (dont nuages, surfaces glacées,...) lui font perdre 29-30 % du rayonnement. Ainsi la Terre reçoit en haut de l'atmosphère 238-239 W/m² rapportés à sa surface totale de sphère $4 \pi R^2$.

Une partie de ce rayonnement est elle-même absorbée par l'atmosphère (Nuages, ozone O₃,

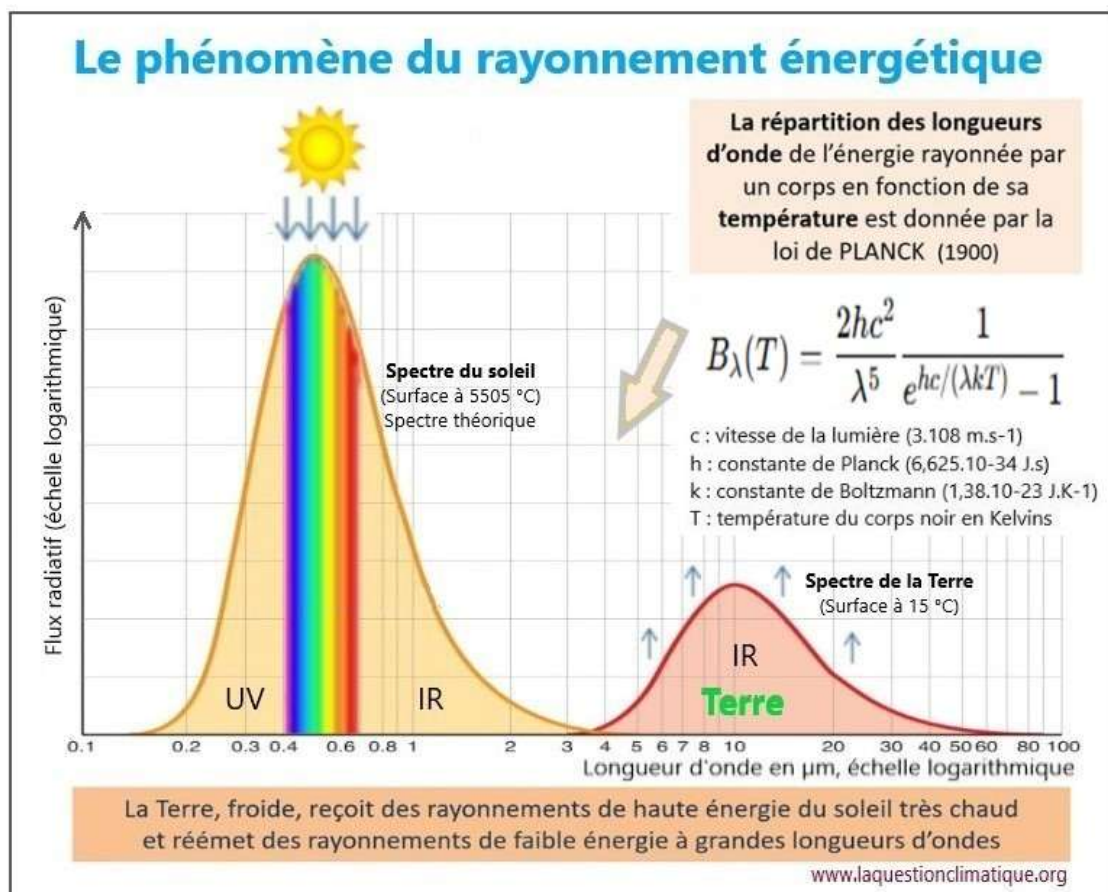
poussières,...) et il ne parvient au niveau du sol qu'environ 165 W/m^2 qui vont réchauffer la planète elle-même.

Pour maintenir son équilibre thermique dans l'espace et sa température stable, la Terre doit renvoyer autant d'énergie qu'elle reçoit, soit en haut de l'atmosphère, environ 238 W/m^2 par rapport à la totalité de sa surface de 510 100 milliards de m^2 .



La Terre qui a un spectre radiatif continu de « corps noir » d'émissivité ϵ proche de 1 ($\epsilon \approx 0,96$), maintient son équilibre thermique en rayonnant jour et nuit. Les lois qui quantifient les phénomènes radiatifs énergétiques sont les lois :

- 1) de Planck pour la répartition des longueurs d'onde (voir schéma).
- 2) de Stefan-Boltzmann pour l'énergie rayonnée en W ($E = \epsilon \sigma T^4$), σ est la Cste de Boltzmann.



En fonction de sa température moyenne globale de 288K (15°C) la Terre émet une irradiance au niveau du sol de $\approx 390 \text{ W/m}^2$ (Loi de Stefan-Boltzmann. *Puissance émise par radiations infrarouges longues, en considérant une émissivité ϵ de 1*).

Seulement 238-239 W/m^2 atteignent l'espace du fait des mécanismes radiatifs liés à l'effet de serre.

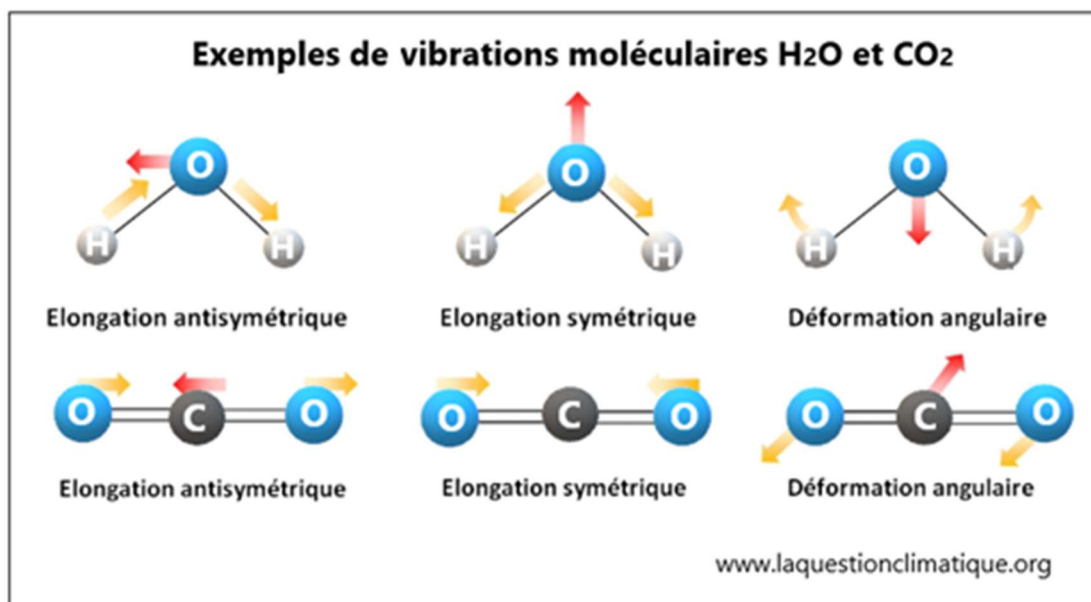
Niveaux d'énergie des molécules et spectres

Les molécules hétéronucléaires qui sont présentes dans l'atmosphère, comme CO_2 , H_2O , N_2O , CH_4 , CFC-12,... vont absorber ou émettre des infrarouges de grande longueur d'onde car elles possèdent un moment dipolaire qui permet des vibrations (élongation, torsion) et des rotations.

CO_2 et H_2O sont dominants en matière d'influence sur l'effet de serre.

CO_2 possède 4 modes de vibration et 2 de rotation ; H_2O a 3 modes de vibration et 3 de rotation.

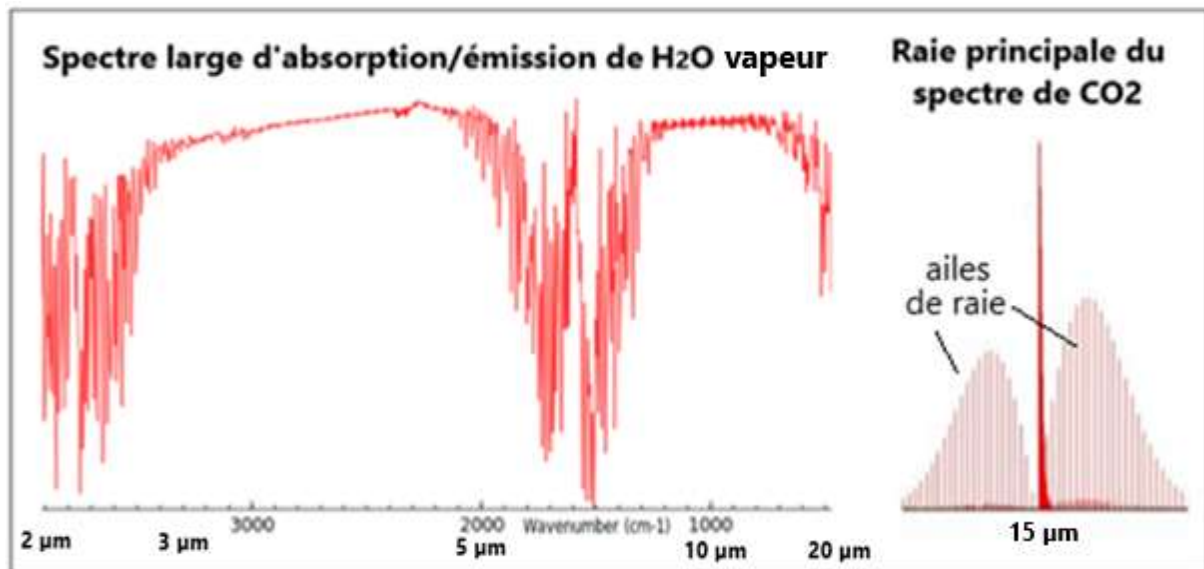
Les molécules homonucléaires d'oxygène O_2 ou d'azote N_2 ne possèdent pas de telles propriétés et sont transparentes au infrarouges.



Pour CO_2 le mélange du mode de torsion de fréquence ω_1 avec le mode d'élongation symétrique ω_2 produit une condition connue sous le nom de résonance de Fermi qui élargit nettement (à 13-17 μm) le spectre des ailes de la raie principale 15 μm . Ceci conduit le CO_2 à être très actif sur le plan spectroscopique, alors même que la raie principale est rapidement saturée à 15 μm .

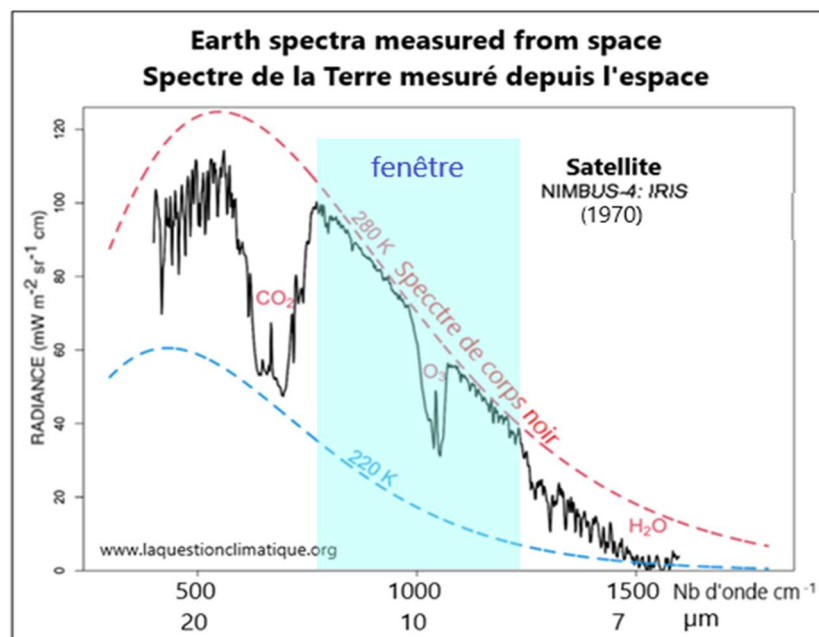
Ces propriétés des molécules leur permettent d'interférer avec le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde émis par la surface terrestre. Les molécules absorbent ou réémettent des radiations infrarouges qui modifient leur niveau d'énergie. Elles sont alors à un niveau énergétique réduit ou augmenté selon qu'elles sont désexcitées ou excitées. A son niveau inférieur une molécule peut absorber un quantum de rayonnement infrarouge (=photon) ; à son niveau supérieur excité elle est susceptible d'émettre un photon.

Les radiations infrarouges capables d'interférer doivent être de longueurs d'ondes compatibles avec les caractéristiques rotationnelles et vibrationnelles des molécules. Ceci conduit à des spectres spécifiques. Les spectres sont constitués de milliers de raies quantiques de fréquences différentes qui ont été mesurées et sont établies dans la base universelle HITRAN.

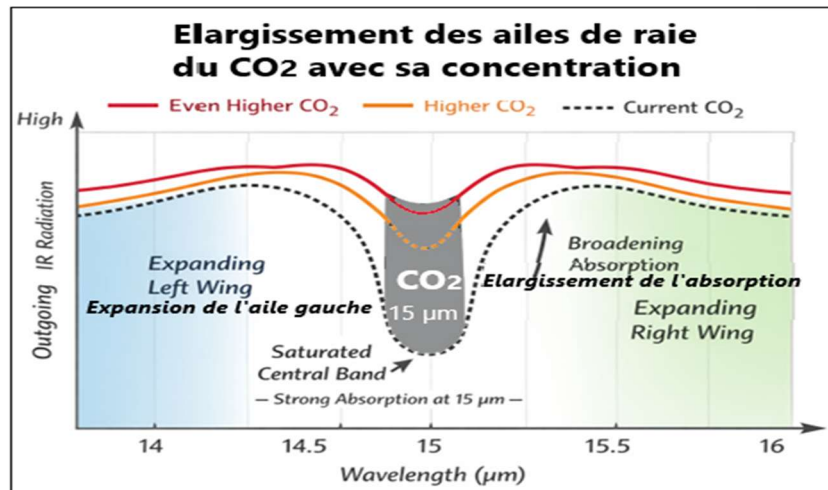


Contrairement à ce qui est parfois affirmé, l'absorption atmosphérique du CO₂ est loin d'être "saturée". Il est vrai que le rayonnement infrarouge à la fréquence exacte ω_1 du mode de torsion du dioxyde de carbone est déjà totalement absorbé dès quelques centaines de mètres mais cette affirmation est fausse pour les fréquences situées dans les ailes du large spectre d'absorption du CO₂. En fait, le forçage radiatif lié au CO₂ varie proportionnellement au logarithme de sa concentration dans l'atmosphère. L'une des raisons de cette loi remarquable est la forme triangulaire du spectre d'absorption autour de la fréquence du mode de torsion. Ainsi, augmenter la concentration augmente simplement son action d'un montant proportionnel au logarithmique $\ln$.

Les spectres infrarouges des gaz à effet de serre, dont le plus étendu est celui de la vapeur d'eau, couvrent la quasi-totalité du spectre d'émission infrarouge de corps noir de la Terre, hormis une « fenêtre atmosphérique » entre 3-5 et 8-13 μm, transparente aux infrarouges.



Il faut noter que les capacités d'absorption et d'émissions des molécules actives sont liées à la température (cf Planck, en T^4) et qu'elles subissent des élargissement des raies en fonction d'effets divers : concentration, pression, effet Doppler, collisions, line mixing, hot bands, forme de raie de Voigt, résonance de Fermi (CO₂), structure rotationnelle des bandes, ...



La Terre rayonne directement vers l'espace de l'ordre de 40-50 W/m², ce qui est une proportion significative. La fenêtre 8-13 μm se situe en effet près du maximum d'intensité du spectre d'émission terrestre qui va de 4 à 50 μm et le spectre d'absorption de H₂O est faible entre 8 et 13 μm. En revanche les raies de CO₂ sont encore plus proches du maximum du spectre terrestre (Maximum de Wien).

Collisions, excitation et désexcitation dans l'air

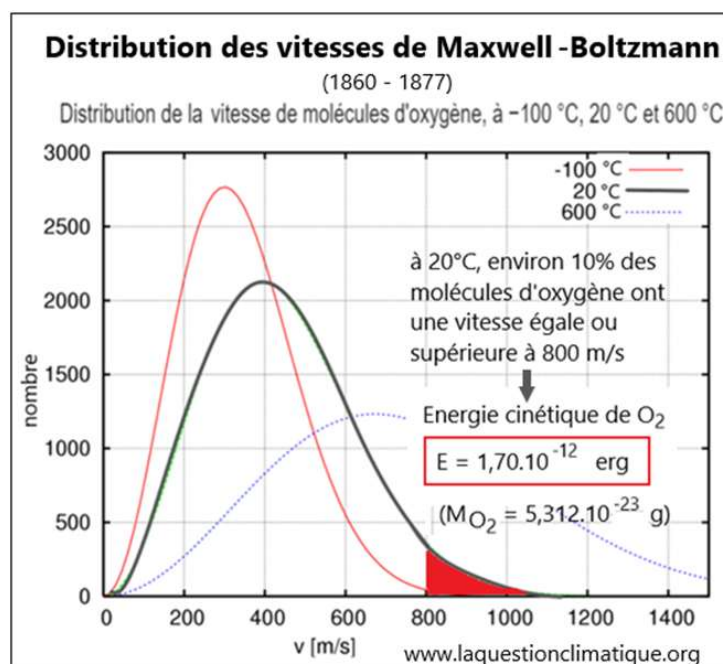
Selon la cinétique des gaz, les collisions des molécules de Gaz à Effet de Serre (GES : CO₂, H₂O, CH₄,...) avec les molécules de l'air (O₂, N₂, Ar) sont beaucoup plus nombreuses et fréquentes que les émissions spontanées d'infrarouge par les molécules de GES à leur niveau excité, et qui les amènent alors à un niveau désexcité.

Une erreur fréquente est d'en déduire qu'ainsi les GES sont désexcités et ne peuvent donc émettre spontanément des infrarouges (IR). Mais à l'inverse, des collisions adaptées portent également au niveau d'énergie supérieur (excité) des molécules GES qui n'étaient pas excitées.

=> Ainsi, les collisions excitent ou désexcitent et entretiennent, contrôlent, une population statistique de quelques % des GES à l'état excité (cf distribution de Boltzmann).

Soit environ **3 à 4 % à l'état excité pour le CO₂ à 288K (15°C)** et 1 atmosphère de pression.

Ce taux est nettement plus faible pour la vapeur d'eau mais sa concentration est ≈50 fois plus élevée.



($E = (h \times \nu) / \lambda$) Energie d'un IR de CO₂ à 15 μm : $E = 1,33.10^{-13}$ erg)

Pour une molécule les ordres de grandeur sont :

- ~4×10⁹ collisions par seconde
- ~3×10⁸ collisions énergétiques par seconde
- ~10⁶ excitations vibratoires effectives par seconde
- ~10 à 10² émissions radiatives spontanées par seconde

Les émissions spontanées infrarouges (IR) multidirectionnelles au sein de l'atmosphère ont lieu, bien qu'elles soient proportionnellement rares. Mais le nombre de molécules / m³ est colossal. Ceci se traduit par des flux IR spontanés de centaines de W/m² (par rapport à la surface terrestre) pour toute la colonne atmosphérique. Ces émissions, ayant le spectre spécifique du GES concerné, dépendent de la température cinétique du gaz (Valeur en °K, cf Planck).

Note : Les collisions de O₂ et N₂ créent un dipôle instantané. Ce dipôle permet une interaction avec le rayonnement - Mais de durée de vie ~10⁻¹² s à probabilité faible => intensité spectrale très diffuse d'où une émission très large, mais de l'ordre de 0,2 à 0,3 W/m² qui est très faible par rapport aux 240 W/m² de l'OLR vers l'espace. Avec seulement O₂ et N₂ l'atmosphère serait transparente aux infrarouges terrestres.

Emission spontanée vs émission induite

Pour les molécules excitées, c'est-à-dire qui sont à un niveau supérieur d'énergie, la relation d'Einstein $A_{ul} = (8 \pi h \nu^3 / c^3) \times B_{ul}$ (h Cste Planck ; c vitesse lumière) relie émission spontanée A_{ul} et émission induite B_{ul} (émission induite, stimulée par un photon incident). La relation impose le ratio A_{ul} / B_{ul} pour une longueur d'onde donnée.

Einstein écrivait dans son article « Sur la théorie quantique du rayonnement » (1917) :
 (Traduit de l'allemand) « Récemment, j'ai trouvé une dérivation de la formule du rayonnement de Planck qui est basée sur l'hypothèse de base de la théorie quantique et qui est liée aux considérations originales de Wien ; dans cette dérivation, la relation entre la distribution de Maxwell et la distribution chromatique du corps noir joue un rôle. Cette dérivation est intéressante non seulement parce qu'elle est simple, mais surtout parce qu'elle semble clarifier quelque peu les phénomènes actuellement inexplicables d'émission et d'absorption du rayonnement par la matière. J'ai montré, sur la base de quelques hypothèses sur l'émission et l'absorption du rayonnement par les molécules, qui sont étroitement liées à la théorie quantique, que les molécules distribuées en équilibre de température sur des états d'une manière compatible avec la théorie quantique sont en équilibre dynamique avec le rayonnement de Planck. De cette façon, j'ai déduit d'une manière remarquablement simple et générale la formule de Planck. C'était une conséquence de la condition selon laquelle la distribution des molécules sur les états de leur énergie interne, requise par la théorie quantique, doit être établie uniquement par l'absorption et l'émission de rayonnement »

A la densité spectroscopique $\rho(\nu)$ liée à la longueur d'onde et à la température (cf Planck) l'émission spontanée multidirectionnelle ; de CO₂ par exemple, est environ **28 fois** supérieure à l'émission induite (ratio 0,036). Les mêmes principes sont applicables à la vapeur d'eau et au méthane.

Dans un champ thermique : loi de Planck

En équilibre thermodynamique :

$$\frac{A_{ul}}{B_{ul}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \quad \rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$\frac{R_{stim}}{R_{sp}} = \frac{\rho(\nu)}{8\pi h \nu^3 / c^3}$

$\frac{R_{stim}}{R_{sp}} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \approx 0.036$

Et comme les molécules GES sont en faible % dans l'état excité ; les émissions induites (stimulées) directives sont négligeables. Ainsi, la directivité du rayonnement issu de la surface terrestre n'a pas d'incidence.

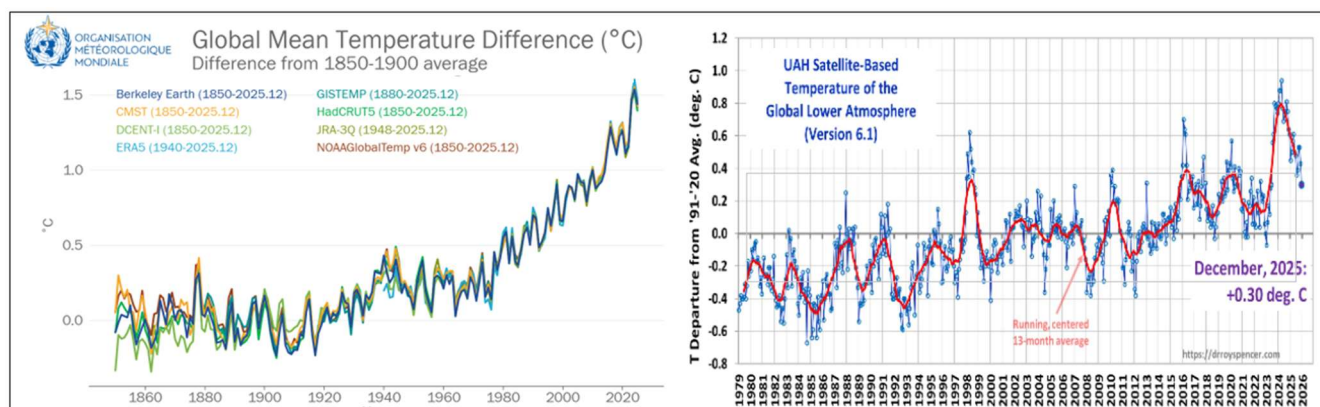
Note - Dans le domaine de longueur d'onde radio (micro-ondes) les émissions stimulées directives dominant, c'est le régime des masers. C'est celui des lasers lorsqu'on applique une amplification d'origine externe. Dans le visible, l'émission spontanée isotrope est ultradominante.

Température terrestre moyenne

La température moyenne de la Terre correspond par convention universelle à la température de l'air près de la surface, mesurée à environ ≈ 2 mètres au-dessus du sol.

(La température du sol -Sahara ou calotte glaciaire- peut en diverger considérablement).

Selon les données terrestres de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), en 2025 la température moyenne à la surface du globe a dépassé de $1,44\text{ °C} \pm 0,13\text{ °C}$ la moyenne de la période 1850-1900. Les mesures par satellites semblent donner une valeur légèrement inférieure. Ainsi, de 1980 à 2025 les observations de l'OMM conduisent à une augmentation de température de $0,8\text{--}0,9\text{ °C}$ tandis que les observations par satellites conduisent à une augmentation moindre de $0,6\text{--}0,7\text{ °C}$.



* On doit noter que des perturbations temporaires de température sont liées aux effets périodiques de l'ENSO (El Nino) qui revient plus au moins régulièrement tous les deux à sept ans. D'autres variations modestes, inexpliquées, peuvent être attribuées à des causes naturelles inconnues. Ainsi, une apparente stabilité de température a eu lieu de 1945 à 1975 puis de 1995 à 2015. Ces influences temporaires ont une amplitude inférieure à $0,5\text{ °C}$ et viennent perturber une progression de fond d'apparence régulière. Il n'est pas exclu que des modérations de température puissent être attribuée en partie à une fluctuation d'irradiance solaire. Selon plusieurs études, l'influence solaire a été minime aux périodes modernes, voire très légèrement moindre depuis les dernières décennies (Fedorov, 2013). Quant aux minima du cycle solaire de 11 ans (Ex. cycle 24 ; 2008-2019,..) ils diminuent de $1,3\text{ W}$ environ la TSI et l'amplitude de la fluctuation de température est d'environ $0,2\text{ °C}$.

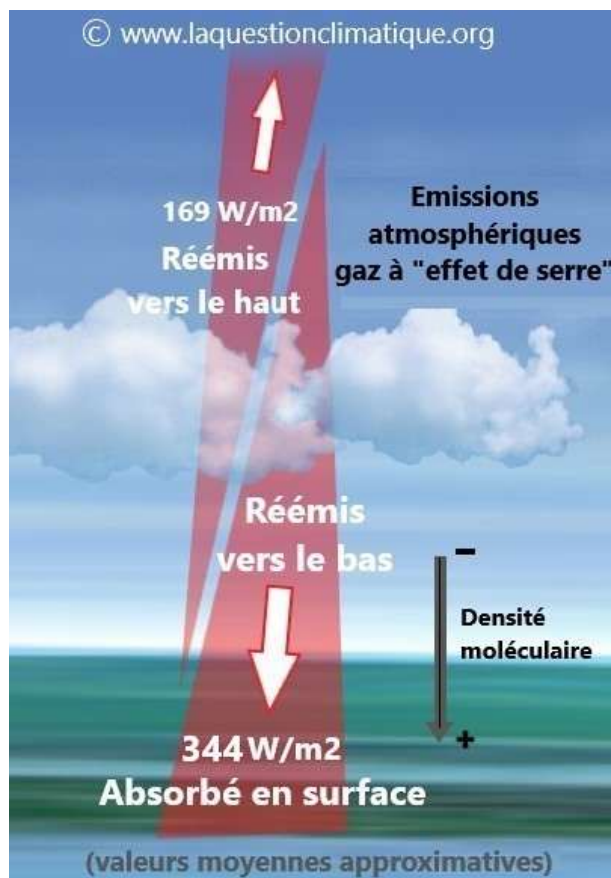
Dans la présente étude il n'est pas tenu compte de ces diverses fluctuations faibles et éphémères.

Influence des Gaz à Effet de Serre (GES)

Le flux radiatif d'IR terrestres vers l'espace, ayant un spectre initial de corps noir, est "freiné" par l'épaisseur atmosphérique des GES (sauf dans la fenêtre $8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$). Les molécules de GES non excitées interceptent progressivement ce flux selon leur spectre. Ensuite, les émissions spontanées réémettent des IR ayant les spectres des GES vers l'espace ($238\text{--}240\text{ W/m}^2$ moins la fenêtre) et vers la surface (344 W/m^2 Back radiation). Le spectre de la Back radiation est analysé par interférométrie AERI. On a mesuré

l'accroissement de cette émission vers la surface avec l'accroissement de la température globale. Elle est en moyenne de $+0,02 \text{ W/m}^2/\text{an}$ attribuée au CO_2 .

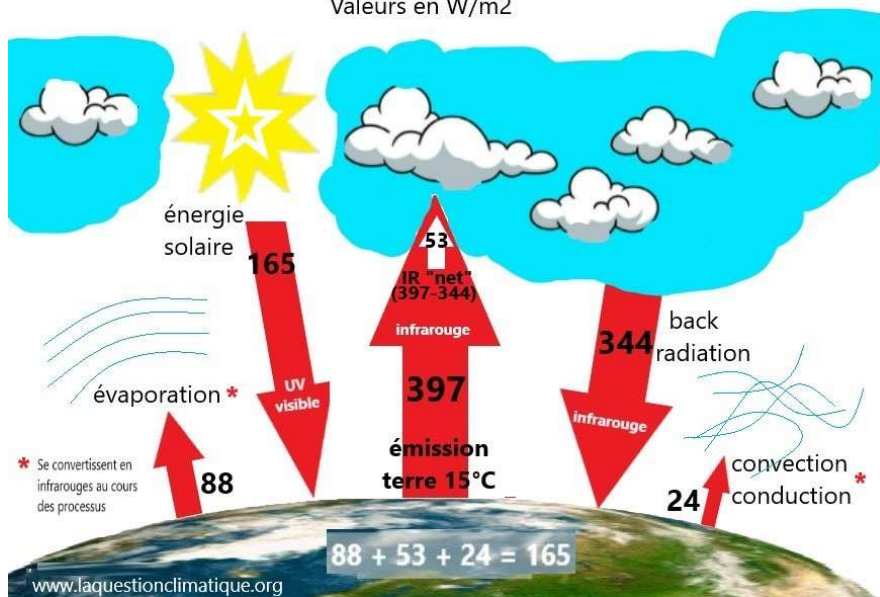
La réémission vers la surface (Back radiation, ou radiation en retour, ou DLR-Downwelling Longwave Radiation) est plus importante du fait de la densité moléculaire et de la température, plus élevées près de la surface qu'en altitude, ainsi que par l'action de la vapeur d'eau plus dense aux premiers kilomètres, à laquelle s'ajoute encore l'influence des nuages bas (stratus, stratocumulus).

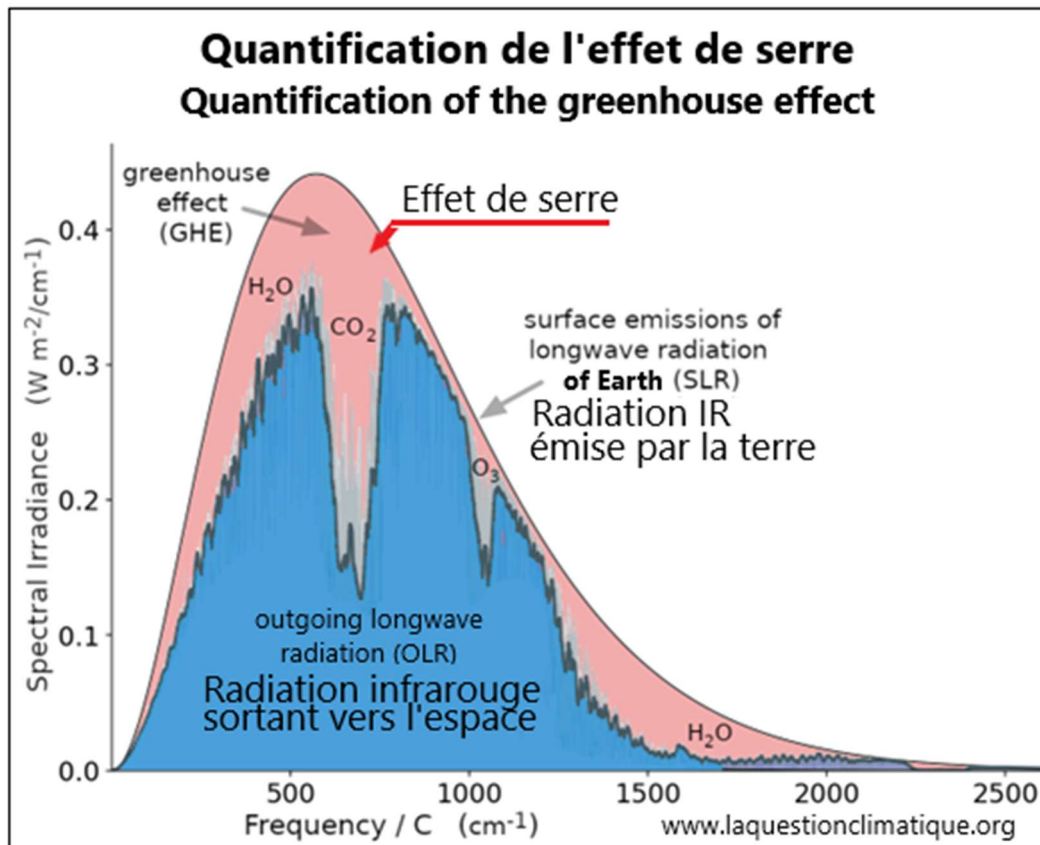


Cette accumulation temporaire d'énergie en retour sur terre est absorbée (sols, océans) et provoque un moindre refroidissement de la surface qui est assimilé à un réchauffement par effet de serre.

Bilan énergétique en surface

Valeurs en W/m^2





Le flux IR terrestre rayonné qui est capturé dans l'atmosphère est approximativement :

Par la vapeur d'eau : $\approx 60\%$

Par le CO_2 : $\approx 20\%$

Par les nuages + autres : $\approx 20\%$

Mais le CO_2 est crucial car, notamment en altitude, il **contrôle la température de fond**, qui elle-même contrôle la vapeur d'eau.

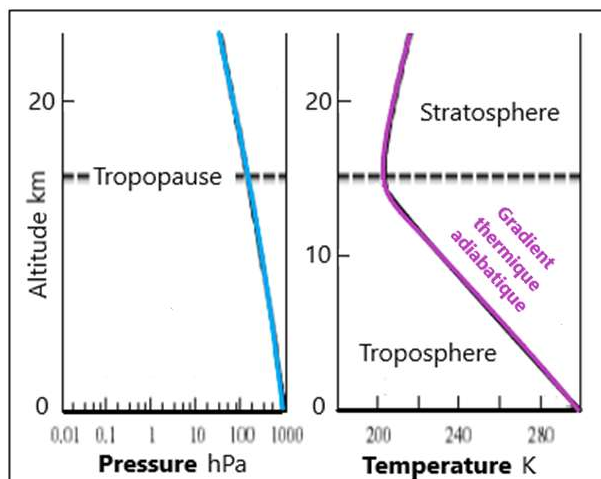
Le spectre réel vu depuis l'espace par les observations satellites (par exemple les instruments de la **NASA**) montrent typiquement :

<u>Zone spectrale</u>	<u>Altitude d'émission</u>
Fenêtre 8-13 μm	surface terrestre (fraction de spectre continu de corps noir)
ails de CO_2	$\sim 3\text{-}5\text{ km}$ (13 à 17 μm)
centre de CO_2	$\sim 11\text{ km}$ (15 μm)
bandes H_2O	$\sim 2\text{-}6\text{ km}$ (larges)

Le rayonnement terrestre exerce une influence directe immédiate sur la température de l'air par l'énergie cinétique communiquée par les gaz à effet de serre excités, notamment aux faibles altitudes, ce qui participe aux convections. A l'équilibre, les absorptions sont compensées par les émissions dans une cellule élémentaire d'air qui doit respecter l'équilibre thermodynamique local obtenu (ETL) imposé par la cinétique des gaz et les collisions.

En l'absence de GES les émissions radiatives vers l'espace auraient lieu à partir d'une altitude zéro, à la surface terrestre. En présence de GES qui absorbent le rayonnement sur plusieurs kilomètres avant de pouvoir réémettre, elles ont lieu à une altitude moyenne virtuelle qui est équivalente à environ 5-6 km

d'altitude où il fait -18°C (cf Goody & Yung 1952-1989 et satellites modernes). Ce qui conduit à $\approx 33^{\circ}\text{C}$ d'écart avec la surface (« effet de serre »).



Gradient de pression : La gravité terrestre attire et retient les molécules du gaz atmosphérique mais leur agitation thermique (cinétique des gaz) tend à les propulser vers l'espace. Ceci crée un gradient de pression entre 1 atm. au niveau du sol et ≈ 0 atm. à plusieurs dizaines de km d'altitude (1/100 000 atm. à 80 km). Toutefois, aucune molécule n'atteint la vitesse de libération terrestre de 11,2 km/s qui leur permettrait d'échapper à la Terre, ce qui maintient la permanence de l'atmosphère. Il faut noter que la gravité terrestre n'intervient pas proportionnellement ; l'accélération de la gravité terrestre qui est de $9,81 \text{ m/s}^2$ au niveau du sol est encore de $9,78 \text{ m/s}^2$ à 10 km d'altitude.

Un supplément de GES va naturellement accroître l'épaisseur atmosphérique d'absorption, spécifique à chaque GES, et donc élever l'altitude d'émission de quelques dizaines ou centaines de mètres. Pour maintenir une irradiance d'équilibre et irradier 239 W/m^2 à la nouvelle altitude ; l'atmosphère doit se réchauffer globalement et compenser la température d'émission sur toute la colonne atmosphérique, jusqu'au sol, pour obtenir une température suffisante à la nouvelle altitude d'émission.

Ceci ne se fait pas par l'action directe d'irradiance de la Back Radiation (344 W/m^2) vers la surface -qui représente néanmoins l'effet de serre- mais se fait par l'intermédiaire du gradient thermique atmosphérique ($-6,5^{\circ}\text{C/km}$ pour le gradient thermique en atmosphère humide standard). Sans vapeur d'eau, le gradient thermique sec serait de $-9,8^{\circ}\text{C/km}$.

C'est en effet **toute l'atmosphère qui se rééquilibre** à travers le gradient thermique pour compenser les 33°C d'écart.

* La température de surface dépend directement de l'altitude d'émission.

Le gradient thermique s'appuie sur le gradient de pression, qui résulte lui-même de la gravité à laquelle est soumise la masse atmosphérique, ceci dans le respect de la loi des gaz parfaits $PV = nRT$. (faible pression = + froid, forte pression = + chaud). Le gradient thermique ajuste sa valeur en quelques jours ou semaines par les mouvements d'homogénéisation de l'atmosphère : advection (horizontal), convection (vertical) et toute turbulence, qui mélangent la vapeur d'eau et les gaz émis à la surface.

Exemple de rééquilibrage de l'atmosphère avec un doublement de la teneur en CO2 et rétroactions

Altitude	Température °C		
	420 ppm CO2	840 ppm CO2	Delta °C
2 m	15	17,2	+2,2
2 km	2	4,3	+2,3
5 km	-17,5	-14,8	+2,7
5,2 km	-18,8	-16	+2,8
6 km	-24	-21,2	+2,8
10 km	-50	-46,8	+3,2

Rôle de H2O & CO2 sur la température

Variation de l'irradiance vers l'espace

En basse troposphère (plus basse couche de l'atmosphère), l'effet de la vapeur d'eau, de spectre large et à une teneur élevée, domine l'effet de serre. En plus haute atmosphère où la vapeur d'eau se raréfie par condensation, le CO2 joue alors un rôle déterminant. Celui-ci a sa raie principale 15 μm vite saturée mais les ailes de raie ne le sont pas et subissent les effets d'élargissement (Effet Doppler, concentration, collisions, résonance de Fermi, etc.).

La concentration du CO2 joue donc un rôle significatif sur la température de l'ensemble de l'atmosphère.

Diminution d'irradiance vers l'espace due à plus de CO2 :

Forçage radiatif en W/m^2 : $\Delta F = 5,35 \ln (C/C_0)$

C = concentration actuelle en CO2 C_0 = concentration initiale en CO2

Un doublement de la teneur en CO2 entraîne ainsi un Δ d'irradiance de **-3,7 W/m^2** à l'OLR.

Le coefficient numérique 5,35 W/m^2 est issu de calculs spectroscopiques réalisés notamment par les travaux de Gunnar Myhre et al. (1998), James Hansen, etc.

Ces valeurs sont remarquablement robustes et indépendantes des modèles climatiques globaux. Le coefficient 5,35 repose sur la spectroscopie moléculaire ligne par ligne (OLBL, HITRAN,...) et est confirmé par mesures satellitaires et par les profils atmosphériques observés. Les satellites (IRIS, IMG, AIRS, IASI) montrent entre les années 1970 et aujourd'hui une diminution progressive du flux sortant exactement : dans la bande 15 μm du CO2, dans certaines bandes CH4 et N2O, aucune diminution équivalente ailleurs. Ce qui est une signature spectrale sans ambiguïté.

Effet du CO2 sur la température

Emettons une hypothèse sur l'évolution entre le début du 20^{ème} siècle et 2026 (passage de 280 à 420 ppm de CO2). L'écart d'irradiance est donc assurément de $5,35 \ln(420/280) = 2,17 \text{ W/m}^2$ qui peut correspondre à **+1,3°C** en surface si l'on attribue sur 150 ans la totalité de cette variation de température mesurée à l'effet du CO2.

Une difficulté est la détermination du coefficient de sensibilité climatique, noté le plus souvent λ (lambda), qui est défini comme le facteur reliant un forçage radiatif ΔF (exprimé en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) à une variation de la température moyenne globale de surface ΔT (en K ou °C), selon la relation linéarisée : $\Delta T = \lambda \cdot \Delta F$. Ce coefficient doit intégrer en effet les rétroactions (vapeur d'eau, nuages,...)

Pour une température moyenne de surface d'environ 288 K, la dérivée du flux infrarouge émis par rapport à la température conduit à une valeur typique : $\alpha_0 \approx 3,2 \text{ à } 3,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ce qui correspond à une sensibilité climatique **sans rétroaction** : $\lambda_0 \approx 0,30 \text{ K}\cdot(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})^{-1}$.

Cette valeur de 0,30 constitue ainsi une borne inférieure absolue à la sensibilité climatique (*Hansen, 1984*), (*Pierrehumbert, 2010*). Aucune hypothèse réaliste sur les nuages, la circulation atmosphérique ou l'océan ne peut annuler cette contrainte, car elle est incompressible et imposée par la thermodynamique et le rayonnement. Elle est parfois appelée « minimum de Planck ».

Mais des rétroactions interviennent, notamment l'effet additif de plus de vapeur d'eau du fait des évaporations accrues en surface par augmentation de température (Formule de Clausius Clapeyron ; $+1^\circ\text{C} \Rightarrow +7\%$ d'évaporation potentielle – Ceci est néanmoins un maximum qui n'est pas automatique ni atteint selon les régions concernées).

Il faut noter que plus d'évaporation en surface refroidit de façon significative les sols et les surfaces océaniques (de 88 W/m^2) mais pas directement la basse atmosphère puisque l'énergie extraite est une énergie latente, c'est-à-dire qui sera restituée en altitude par la vapeur d'eau seulement lors de sa condensation. La basse atmosphère ne peut être directement refroidie que par conduction, qui est très faible, et convection près de la surface qui ne représentent pas plus de 24 W/m^2 , soit 5% des énergies en jeu. Un refroidissement direct ne serait obtenu que par pulvérisation dans l'air ; ce que fait d'une certaine façon la pluie fine. Ce sont donc bien les mécanismes radiatifs qui ont le plus d'importance.

Il existe aussi une rétroaction due aux nuages. C'est la moins bien maîtrisée et c'est elle qui entretient une grande incertitude sur la valeur de la sensibilité climatique λ . Ceci entraîne par exemple des grandes divergences dans les projections du GIEC selon les hypothèses retenues.

De l'hypothèse précédente (cf encadré) $2,17 \text{ W/m}^2 \Rightarrow +1,3^\circ\text{C}$ on déduit une valeur de $\lambda \approx 0,60 \text{ K}\cdot(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})^{-1}$. Donc, il faudrait multiplier par 0,60 la variation d'irradiance pour obtenir la variation de température en surface. Ceci est un maximum excluant toute cause naturelle significative et durable (Ce que ne sont pas des événements temporaires comme El Nino ou l'éruption du Hunga-Tonga).

Température future ; projections

Avec une progression des émissions de **CO2** maintenues à **2,2 ppm/an** dans l'atmosphère (moyenne depuis 30 ans) et avec 425 ppm en 2026 on obtiendrait :

Variations maximales probables depuis 1900, sans aucune réduction des émissions de CO2

(En attribuant le doublement de λ_0 ; de 0,3 à $\lambda = 0,6$ aux rétroactions, sans cause naturelle)

1900	: ~280 ppm	=>	0,00 W/m ²	=>	+0,00 °C
2026	: ~425 ppm	=>	2,23 W/m ²	=>	+1,33 °C <u>déjà acquis</u>
2050	: ~480 ppm	=>	2,88 W/m ²	=>	+1,73 °C
2100	: ~590 ppm	=>	3,98 W/m ²	=>	+ 2,39 °C
2150	: ~700 ppm	=>	4,90 W/m ²	=>	+ 2,94 °C
2200	: ~810 ppm	=>	5,68 W/m ²	=>	+ 3,40 °C

Le GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC) qui a des finalités autant politiques que scientifiques est assez nettement plus pessimiste. Dans son dernier rapport AR6, 2021-2023, les projections de réchauffement global moyen par rapport à 1850-1900 sont :

Avec de fortes réductions d'émissions CO₂ (« Net zéro »,...)

Vers 2050 : +1,2 à +2,0 °C ; Vers 2100 : +1,0 à +1,8°C

Avec des émissions très élevées de CO₂

Vers 2050 : + 1,9 à +5,0 °C ; Vers 2100 : +3,3 à +5,7 °C

Conclusion

Selon notre hypothèse raisonnable qui s'appuie sur l'évolution réelle constatée jusqu'à présent...

...il ne semble pas y avoir en vue la catastrophe climatique prochaine annoncée...

...par le GIEC (IPCC) dans son résumé à l'attention des décideurs politiques et relayée sans la moindre précaution par la plupart des médias.

Bien entendu, toute projection future comporte un risque mais qui semble faible en s'appuyant sur un siècle et demi de données acquises et non sur des modèles théoriques.

L'influence des nuages est le paramètre le moins maîtrisable puisque suivant leur abondance ils ont un effet sur la diminution ou l'augmentation de l'albédo qui modifie le rayonnement solaire incident.

L'évolution décrite reste plausible avec les émissions de CO₂ qui continueront très probablement à court terme. Il ne faut pas se faire trop d'illusion sur la rapidité de mise en œuvre et l'intensité des futures réductions d'émission à l'échelle mondiale. Et ce n'est pas la réduction rapide et ruineuse pour leur économie de quelques petits pays, comme la France (0,9 % des émissions mondiales), qui retournera la tendance globale.

La future température en France ne devrait pas poser de problème nouveau fondamental à ses habitants. D'ailleurs une légère augmentation de température générale semble même bienfaitrice, ceci sans avoir à craindre plus de catastrophes naturelles. D'autre part, l'augmentation du CO₂ favorise le verdissement terrestre (NASA).

Si des réductions d'émission de CO₂ commencent à se faire sentir au-delà de 2075, notamment avec le développement des diverses générations d'énergie nucléaire totalement décarbonée, le climat terrestre n'aura pas à subir de grand bouleversement ...en attendant le refroidissement sévère dû au prochain cycle de Milankovitch auquel l'humanité devra ensuite faire face.

