

LES THEMES DE SCIENCE-CLIMAT-ENERGIE

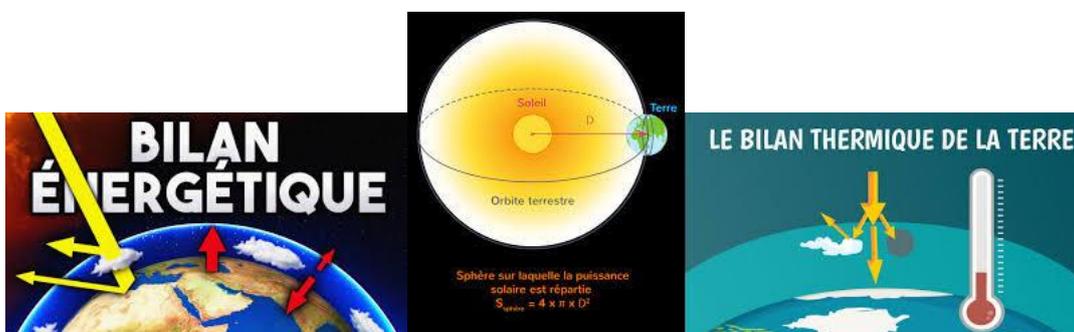
SCE a vu le jour en juin 2018 sous l'impulsion de plusieurs professeurs d'universités européennes. Plus de 250 articles ont été publiés après examen par un Comité Editorial. Les articles sont repris dans une liste des auteurs ([ici](#)) et permettent un dialogue entre lecteurs et auteurs ou lecteurs entre eux, à travers une rubrique 'commentaires' dont les règles ont été fixées ([ici](#)).

Au terme de ces 5 ans, nous avons décidé de regrouper les articles sous forme de .pdf reprenant chaque fois un thème précis. Cela permet de disposer pour tout lecteur d'un document complet sur un sujet précis, plutôt que de devoir aller chercher les articles un à un sur une période de près de 5 ans. Une sélection des articles les plus représentatifs a été opérée afin de couvrir au mieux chaque thème.

Nous publierons au fur et à mesure ces documents reprenant les articles spécifiques.

Le présent document intitulé **Le bilan énergétique de la Terre et l'effet de serre** reprend des articles sélectionnés couvrant la période mars 2018 à février 2023.

Nous espérons que ces documents seront utiles et diffusés à grande échelle.



LE BILAN ENERGETIQUE DE LA TERRE ET L'EFFET DE SERRE

1. Le CO₂ dans les basses couches atmosphériques, G. Geuskens (1/2), p.3-5
2. Le CO₂ dans les basses couches atmosphériques, G. Geuskens (2/2), p.5-8
3. Forçage radiatif, sensibilité climatique et rétroactions positives, G. Geuskens, p.8-12
4. Du bon usage de la formule de Stefan-Boltzmann, G. Geuskens , p.12-16
5. Le CO₂ et le climat avec et sans effet de serre, G. Geuskens, p.17-24
6. Encore des observations n'allant pas dans le sens de la théorie!, N. Jean, p.24-28
7. Le réchauffement climatique d'origine anthropique, G. Geuskens p.28-36
8. L'effet de serre et le bilan énergétique de la Terre, G. Geuskens, p.36-55
9. Pourquoi l'effet du CO₂ sur le climat est exclu par la physique, J. Van Vliet, p.55-57
10. Puissances en jeu dans le système Terre/atmosphère (1/3), J.C. Maurin, p.57-64
11. Puissances en jeu dans le système Terre/atmosphère (2/3), J.C. Maurin, p.64-75
12. Puissances en jeu dans le système Terre/atmosphère (3/3), J.C. Maurin, p.75-84
13. Selon le physicien W. Happer il y aura peu d'effets pour un doublement du taux de CO₂ , Jean N., p.84-87



1. Le CO₂ dans les basses couches atmosphériques (1/2)

Mis en ligne SCE : 28.03.2018

Certains climatologues estiment, sur la base de modèles informatiques, que l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère pourrait avoir une influence sur le climat. Avant d'aborder ce problème il est important d'analyser le comportement de ce gaz dans les basses couches atmosphériques.

A cette fin envisageons une boîte opaque contenant, à l'abri de tout rayonnement extérieur, une certaine quantité d'air sec à 15°C et à la pression d'une atmosphère. Dans cette boîte 78 % des molécules sont des molécules d'azote N₂ et 21 % sont des molécules d'oxygène O₂. Le troisième constituant par ordre d'abondance est l'argon Ar (environ 1 % des molécules). Les molécules de CO₂ n'interviennent que pour environ 0,04 %. Toutes ces molécules n'ont pratiquement pas d'interaction entre elles, si ce n'est qu'étant en constante agitation elles entrent en collisions les unes avec les autres lors de chocs dont la plupart sont élastiques (avec conservation de l'énergie cinétique). La théorie cinétique des gaz permet de calculer qu'à la température de 15°C les molécules de l'air sont animées de vitesses de l'ordre de 500 m par seconde (voir fig. 1, courbe à 300 K) et qu'à cette température et à la pression d'une atmosphère chacune subit plusieurs milliards de collisions par seconde. De plus, ces molécules présentent une large distribution de vitesses qui est fonction de la température en accord avec la loi de Maxwell-Boltzmann (Fig. 1).

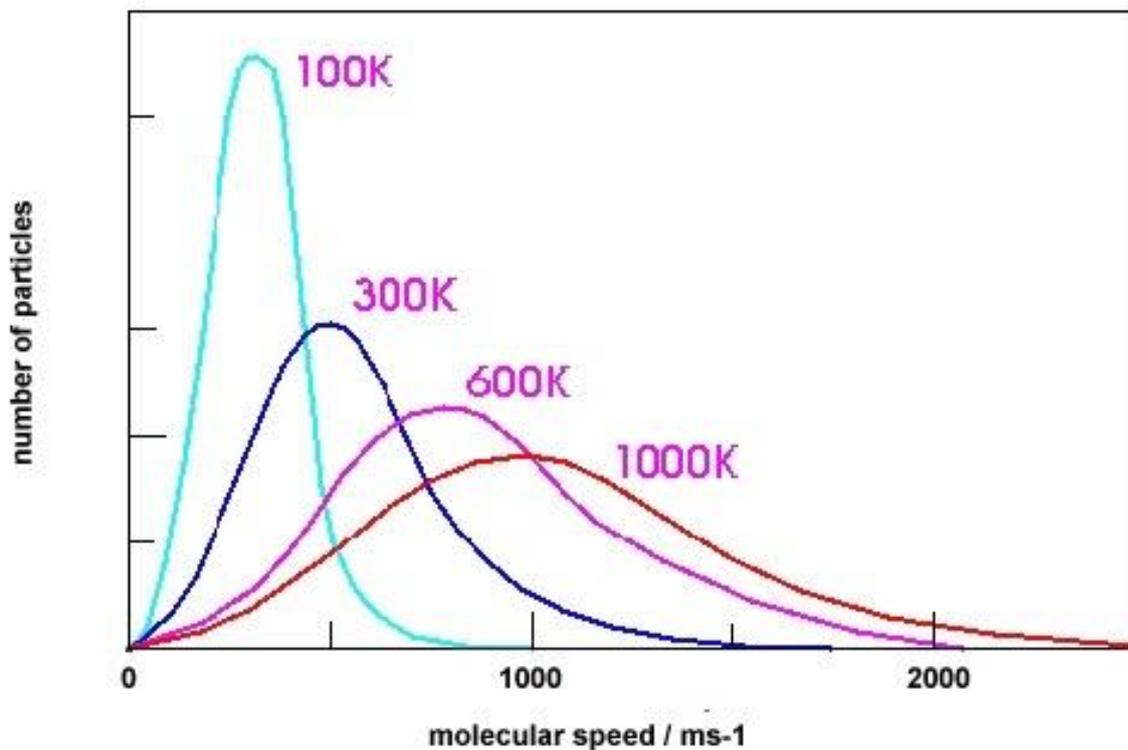
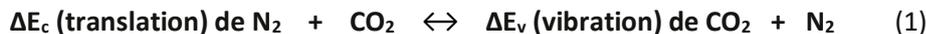


Fig. 1 Loi de distribution des vitesses de Maxwell-Boltzmann

Les molécules de l'air ne sont pas seulement animées de mouvements de translation. Si elles disposent de l'énergie suffisante elles peuvent aussi entrer en vibration avec variation rapide et périodique des longueurs ou des angles de leurs liaisons interatomiques. Contrairement aux mouvements de translation dont l'énergie peut varier d'une manière continue seuls certains niveaux énergétiques de vibration sont permis. La mécanique quantique nous apprend, en effet, que l'énergie de vibration ne peut varier de manière continue. A chaque fréquence de vibration permise est associée une énergie qui peut être déterminée expérimentalement par spectroscopie d'absorption dans le domaine infrarouge ou Raman. Les molécules biatomiques N_2 et O_2 sont très rigides et ne vibrent pratiquement pas à $15^\circ C$. Par contre, les molécules triatomiques de CO_2 , linéaires à l'état fondamental $O=C=O$, peuvent se déformer facilement et devenir anguleuses en vibrant. L'énergie de cet état de vibration peut être calculée à partir de la bande d'absorption détectée à $15 \mu m$ dans le spectre infrarouge du CO_2 grâce à la relation $E_v = hc / \lambda$ (où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde du rayonnement absorbé, dans ce cas $15 \mu m$). Cette valeur n'est que de 30 % supérieure à l'énergie cinétique moyenne des molécules environnantes N_2 et O_2 qui, d'après la théorie cinétique des gaz, vaut $E_c = 5/2 k T$ (où k est la constante de Boltzmann et T la température en Kelvin). Or, beaucoup de molécules ont une vitesse et donc une énergie cinétique supérieure à la moyenne comme l'indique la fig. 1 (la vitesse moyenne est très proche du maximum de la courbe de distribution des vitesses).

En l'absence d'une source extérieure de rayonnement l'énergie nécessaire pour exciter la vibration de CO_2 ne peut provenir que de l'énergie d'agitation thermique du milieu ambiant. La quantification de l'énergie n'intervenant pas au niveau des mouvements de translation les énergies cinétiques de translation $E_c = mv^2/2$ présentent une large distribution continue semblable à celle illustrée sur la fig. 1. La fonction mathématique correspondant à ces courbes permet de calculer qu'à $15^\circ C$ plus de 40 % des molécules N_2 et O_2 ont suffisamment d'énergie cinétique pour amener les molécules de CO_2 à leur plus bas niveau de vibration lors d'une collision inélastique (sans conservation de l'énergie cinétique). Dans ces conditions il y a conversion d'une fraction Δ de l'énergie cinétique de translation des molécules N_2 ou O_2 en énergie de vibration du CO_2 :



Ce ne sont évidemment pas toujours les mêmes molécules de CO_2 qui sont en état de vibration car cette conversion est réversible et les molécules se désactivent endéans quelques microsecondes pour retourner à l'état fondamental lors de nouveaux chocs avec les molécules environnantes qui, de ce fait, acquièrent temporairement un surcroît d'énergie cinétique de translation.

Il existe donc un équilibre dynamique résultant des très nombreuses collisions. Il ne dépend que de la température et de la pression (par le biais de la distribution des énergies et du nombre de chocs entre molécules). Quoique ce ne soient pas toujours les mêmes molécules de CO_2 qui vibrent la proportion de molécules en état de vibration reste constante à une température et une pression déterminées (environ 40 % à $15^\circ C$ et à la pression d'une atmosphère).

Les molécules de CO_2 amenées à l'état de vibration pourraient-elles se désactiver par réémission du rayonnement de $15 \mu m$ correspondant à l'excédent d'énergie de ce niveau par rapport à l'état fondamental ? Un tel phénomène de désactivation radiative est bien connu entre niveaux d'énergie électronique et est appelé fluorescence mais il n'a été observé entre niveaux d'énergie de vibration qu'à très haute altitude à des pressions extrêmement faibles (voir paragraphe 2c ici). La raison en est qu'en solution ou en phase gazeuse à des pressions voisines d'une atmosphère la désactivation radiative ne peut entrer en compétition avec la désactivation par collisions que pour des états excités de très courte durée de vie (10^{-9} à 10^{-7} s). Ces derniers peuvent alors émettre un

rayonnement avant qu'une collision inélastique se produise. Ce n'est pas le cas des états de vibration dont la durée de vie est de l'ordre des millisecondes. L'équilibre (1) ne sera donc pas modifié si certaines molécules de CO₂, en plus des collisions dues à l'agitation thermique, étaient excitées par absorption d'un rayonnement de longueur d'onde appropriée λ (15 μm en l'occurrence) car cet apport d'énergie serait rapidement converti en un surcroît d'énergie de translation des molécules environnantes. Le fait qu'à 15°C et à la pression d'une atmosphère les molécules de CO₂ à l'état de vibration ne peuvent se désactiver par réémission d'un rayonnement est une conclusion essentielle pour comprendre l'influence que ce gaz pourrait avoir sur le climat.

2. Le CO₂ dans les basses couches atmosphériques (2/2)

Mis en ligne SCE : 028.04.2018

La présence de CO₂ dans les basses couches atmosphériques peut-elle avoir une influence sur le climat en modifiant le bilan énergétique global de la Terre ? Le bilan énergétique doit tenir compte du fait que pour maintenir une température constante la Terre doit dissiper l'énergie reçue du Soleil et que différents mécanismes de dissipation sont possibles. Le modèle le plus complet est celui proposé par la NASA (fig. 1).

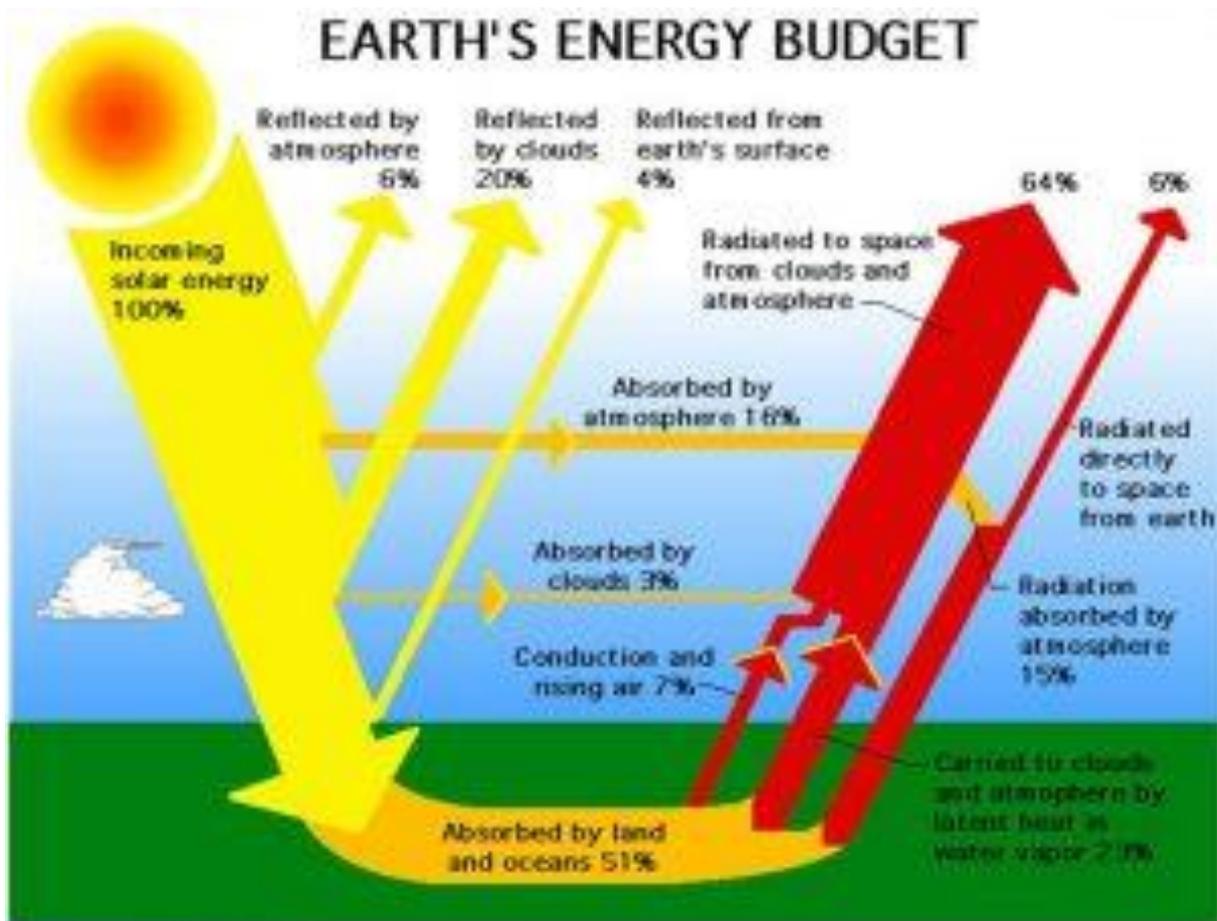


Fig. 1 Bilan énergétique de la Terre selon la NASA

D'après ce bilan 30 % de l'énergie reçue par la Terre au sommet de l'atmosphère seraient réfléchis par les nuages, l'atmosphère et la surface terrestre : c'est l'albédo de la Terre. L'atmosphère et les nuages absorberaient en plus 19 % du rayonnement solaire transmis et finalement 51 % seulement seraient absorbés par les continents et les océans. Cette énergie serait dissipée ensuite par trois mécanismes distincts : évaporation de l'eau des océans (23 %), convection de l'air (7 %) et rayonnement thermique (21 %). Remarquons sur la fig. 1 qu'une petite fraction seulement de l'énergie détectée au sommet de l'atmosphère sous forme de rayonnement provient directement de la surface terrestre (fine flèche rouge à droite). Finalement toute l'énergie dissipée par la surface terrestre (quel que soit le mécanisme) ou absorbée directement par l'atmosphère et les nuages est convertie en rayonnement dans les couches supérieures de l'atmosphère (large flèche rouge) car c'est le seul mécanisme d'évacuation de cette énergie hors de l'atmosphère terrestre. Le rayonnement détecté par satellite à haute altitude (70 % de l'énergie reçue par la Terre au sommet de l'atmosphère) provient donc essentiellement des couches supérieures de l'atmosphère à des températures beaucoup plus froides que la surface terrestre.

Si on considère la Terre comme un corps noir à 15°C l'équation de Planck (fig. 1 [ici](#)) permet de calculer que 95 % du spectre d'émission sera compris entre 5 et 40 μm et la loi de Wien prévoit que le rayonnement émis devrait présenter un maximum d'intensité à 10 μm . D'après le bilan proposé par la NASA 15 % du rayonnement thermique émis par la Terre sont absorbés par divers constituants atmosphériques. La fig. 2 montre qu'il s'agit principalement de la vapeur d'eau mais aussi du CO_2 .

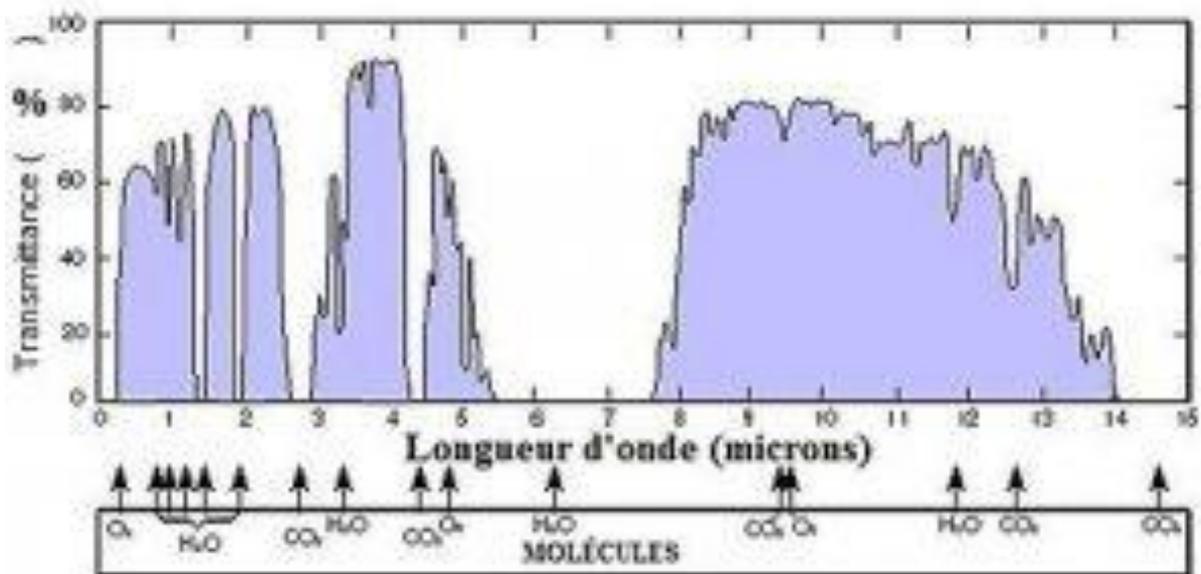


Fig. 2 Transmittance de l'atmosphère

Des zones de transparence atmosphérique apparaissent (en bleu sur la figure), notamment entre 8 à 13 μm . En intégrant l'équation de Planck dans cet intervalle de longueurs d'onde on trouve que 30 % du rayonnement thermique de la Terre est émis dans cette zone de transparence atmosphérique soit env. 6 % de l'énergie totale reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère (30 % de 21 %). Ce résultat est en accord avec le bilan de la NASA (fig. 1) qui fait effectivement état de 6 % d'énergie rayonnée directement vers l'atmosphère.

Le CO₂ présente une bande d'absorption dans le domaine du rayonnement thermique de la Terre. Elle est présentée sur la fig. 3 pour une teneur en CO₂ de 357 ppm (0,0357 %) en présence de 2,6 % en vapeur d'eau, conditions correspondant à la composition atmosphérique en 1993 (date d'enregistrement du spectre).

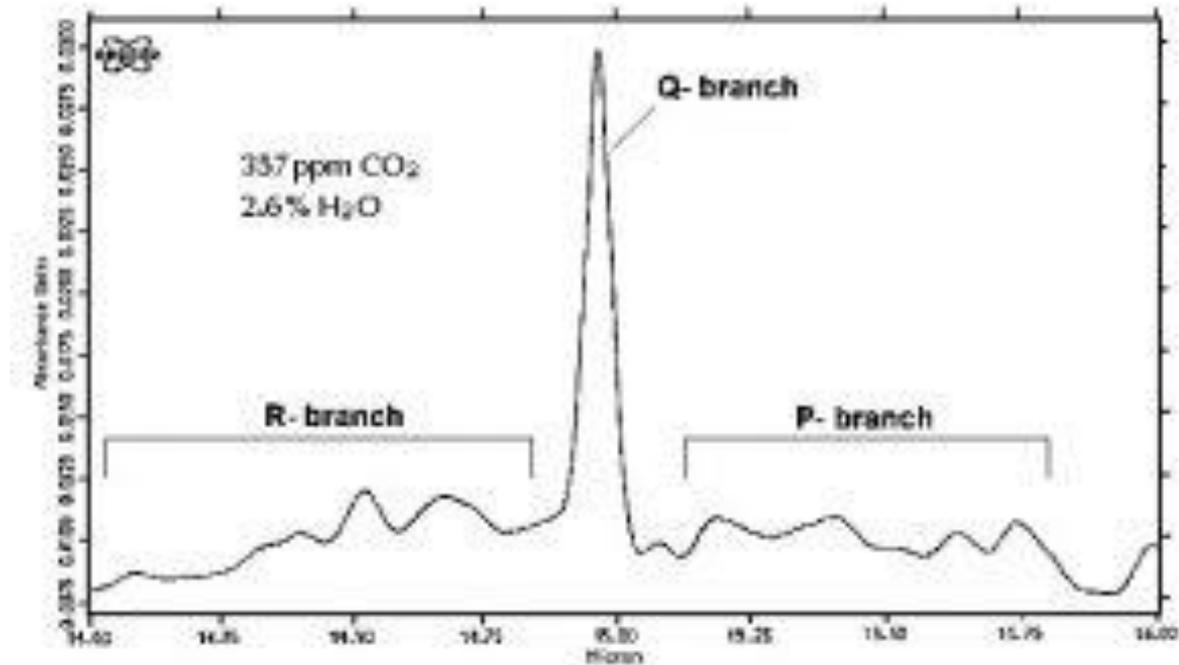
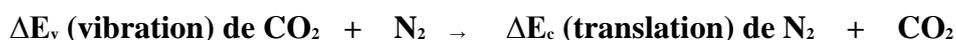


Fig. 3 Spectre d'absorption du CO₂

Cette bande d'absorption centrée à 15 µm (branche Q) permet l'excitation de la molécule à un état de vibration impliquant sa déformation angulaire. Les branches P et R sont dues à l'existence de sous-niveaux de rotation pour chaque niveau de vibration (fondamental et excité). En intégrant l'équation de Planck cette fois dans le domaine de 14 à 16 µm, domaine d'absorption du CO₂, on calcule que 9,3 % du rayonnement thermique de la Terre est émis dans cet intervalle de longueurs d'onde. En fin de compte le CO₂, quel que soit son coefficient d'absorption, ne pourrait absorber au maximum que 9,3 % du rayonnement thermique de la Terre (représentant 21 % de l'énergie totale reçue du Soleil) soit un peu moins de 2 % de l'énergie totale reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère.

Les molécules de CO₂ excitées à l'état de vibration par absorption d'une fraction du rayonnement thermique de la Terre ont une durée de vie limitée. Elles se désactivent endéans quelques microsecondes par collisions avec les molécules environnantes (voir [ici](#)), principalement N₂ et O₂. Dans ces conditions il y a conversion d'une fraction Δ de l'énergie de vibration du CO₂ en énergie cinétique de translation des molécules N₂ (ou O₂) :



Bien que l'absorption du rayonnement thermique de la Terre entre 14 et 16 µm soit sélective par les molécules de CO₂ (fig. 2 et 3) cet excédent d'énergie se répartit sur l'ensemble des molécules environnantes suite aux multiples collisions. Au total 2 % de l'énergie reçue du

Soleil au sommet de l'atmosphère terrestre seront convertis en mouvements de convection au détriment de l'intensité du rayonnement thermique.

En conclusion la présence de CO₂ dans l'atmosphère ne modifie pas le bilan énergétique global de la Terre mais seulement l'importance relative des différents mécanismes de dissipation de l'énergie reçue du Soleil. Ceci ne peut avoir aucune influence sur la température globale moyenne de la surface terrestre.

3. Forçage radiatif, sensibilité climatique et rétroactions positives

Mis en ligne SCE : 10.04.2018

Le forçage radiatif peut être défini comme la différence entre l'énergie radiative reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère et l'énergie radiative émise vers l'espace par le système Terre-atmosphère. A l'équilibre radiatif il est nul car ces deux valeurs sont égales à 240 W m⁻² (voir fig.1 de l'article précédent (n°2 ci-dessous). Le CO₂ dans les basses couches atmosphériques (2/2)).

Ce concept a été repris dans un sens spécifique par les partisans d'un réchauffement climatique d'origine anthropique pour donner une base quantitative à l'hypothèse de l'effet de serre. Ce dernier est défini comme « *un phénomène radiatif causé par des gaz tels la vapeur d'eau ou le CO₂ qui absorbent une fraction du rayonnement infrarouge émis par la Terre et le réémettent ensuite dans toutes les directions et notamment vers la surface terrestre dont la température serait, de ce fait, plus élevée qu'en l'absence de gaz absorbant l'infrarouge* ».

Le forçage radiatif ΔF dû au CO₂ correspondrait donc, selon les partisans d'un réchauffement climatique d'origine anthropique, à la fraction du rayonnement thermique de la Terre qui serait absorbée par ce gaz puis réémise vers la Terre. Cela représenterait au maximum 1 % de l'énergie totale reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère, soit environ 3,5 W m⁻² (voir plus haut 2. Le CO₂ dans les basses couches atmosphériques (2/2)). Il en résulterait une perturbation du bilan énergétique de la Terre dont la température devrait augmenter pour dissiper plus d'énergie par rayonnement thermique afin d'atteindre un nouvel équilibre.

La version la plus récente de la formule semi-empirique utilisée par le GIEC pour lier le forçage radiatif à la teneur en CO₂ dans l'atmosphère provient d'un article de G. Myrhe et coll. paru en 1998 dans Geophysical Research Letters (vol 25, p. 2715) et intitulé « *New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases* » :

$$\Delta F \text{ (W m}^{-2}\text{)} = 5,35 \ln C/C_0 \quad (1)$$

Dans cette formule **C** est la concentration du CO₂ en ppmv (parties par million en volume) à un moment donné et **C₀** la concentration de référence, par exemple avant le début de l'ère industrielle (278 ppmv). Elle est obtenue en introduisant des teneurs en CO₂ extrapolées jusqu'à 1000 ppmv dans plusieurs modèles climatiques globaux sans tenir compte d'un effet de saturation de l'absorption qui interviendra nécessairement avec l'augmentation de la teneur en CO₂. Les résultats sont rassemblés sur la fig. 1 extraite de l'article cité. La relation (1) décrit l'allure de ces courbes.

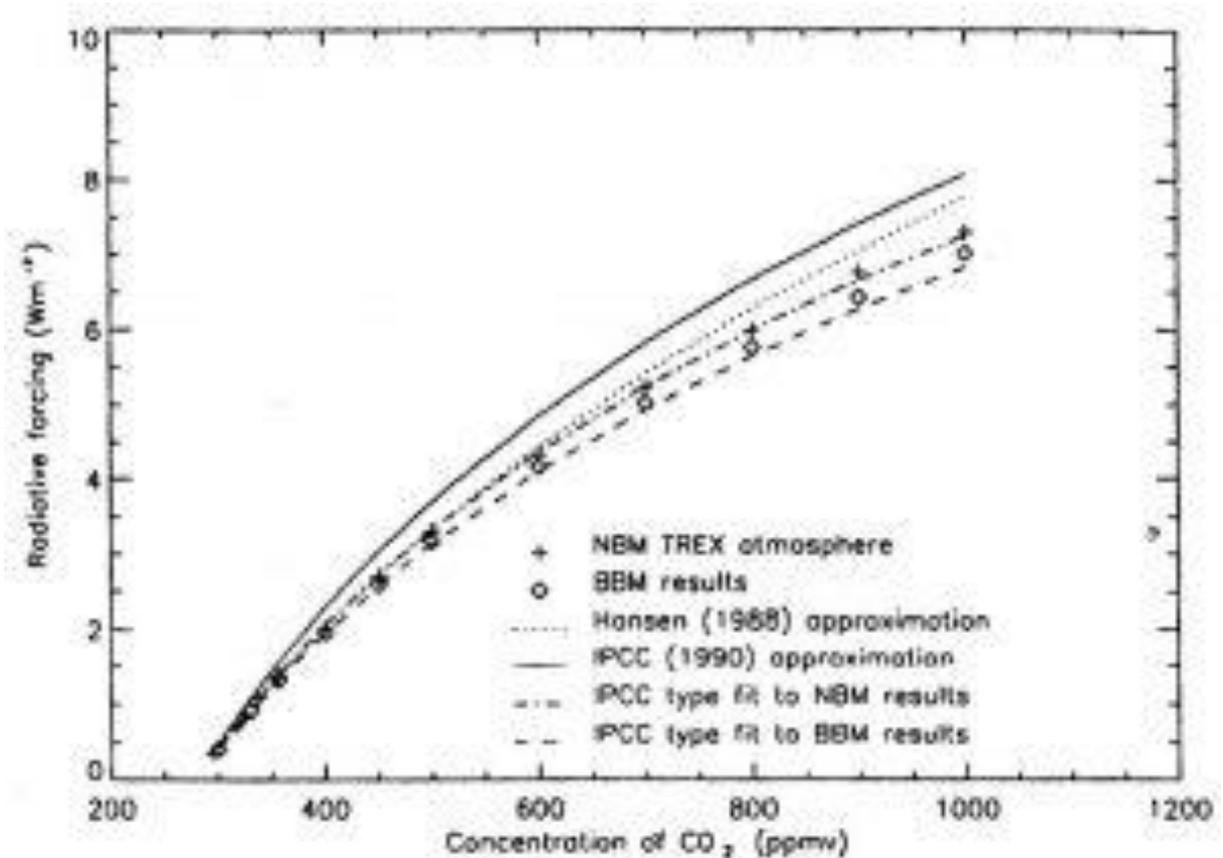


Fig. 1 Forçage radiatif en fonction de la concentration en CO₂ (d'après Myrhe 1998)

En 2005 le forçage radiatif depuis le début de l'ère industrielle était estimé par le GIEC à $1,7 \text{ W m}^{-2}$ mais actuellement avec une teneur en CO₂ dans l'atmosphère de l'ordre de 400 ppmv la valeur déduite de la formule (1) serait de 2 W m^{-2} .

Il faut remarquer que la publication de Myrhe date de 1998 et correspond à une période allant approximativement de 1980 à 2000 pendant laquelle les partisans d'un réchauffement climatique d'origine anthropique ont voulu établir une corrélation entre l'augmentation de température moyenne globale (fig. 2) et l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère.

Cependant depuis près de 20 ans la température ne varie pratiquement plus (fig. 3), bien que la teneur en CO₂ n'ait cessé d'augmenter d'environ 2 ppmv par an.

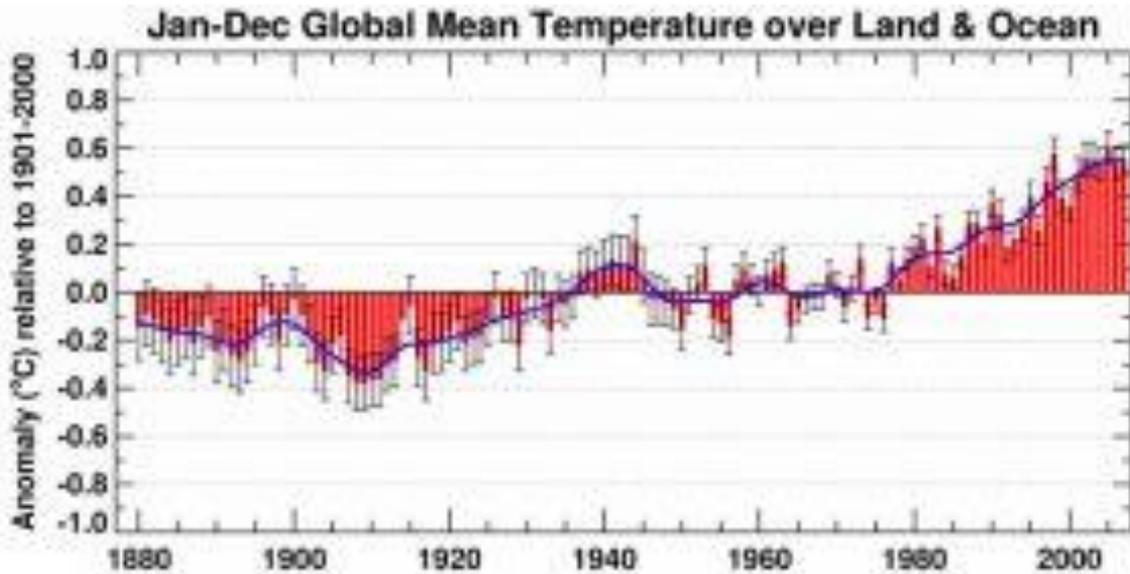


Fig. 2 Ecarts de température pour la période 1880-2015 par rapport à la moyenne pour la période 1901-2000 (en rouge moyennes annuelles, en bleu courbe lissée)

Le problème est d'établir un lien entre le forçage radiatif estimé d'après la formule (1) et l'augmentation de température qui en résulterait selon la théorie de l'effet de serre. A cet effet les climatologues se basent toujours sur la formule de Stefan Boltzmann qui lie la puissance rayonnée par unité de surface F à la température T (en K) à la puissance 4 :

$$F \text{ (W m}^{-2}\text{)} = \sigma T^4 \text{ (}\sigma = \text{constante de Stefan} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\text{)}$$

Si le CO_2 donne lieu à un forçage radiatif estimé à 2 W m^{-2} ils considèrent que la température de la Terre devrait nécessairement augmenter pour dissiper sous forme de rayonnement thermique ce surcroît d'énergie reçue. Or, il est bien établi que deux autres mécanismes contribuent également, et de manière prépondérante, à la dissipation de l'énergie par la Terre : la convection de l'air et l'évaporation de l'eau des océans. La formule de Stefan Boltzmann sous la forme mentionnée ci-dessus n'en tient pas compte.

Certains climatologues écrivent néanmoins sur la base de la formule de Stefan Boltzmann :

$$T^4 \text{ (actuel)} / T^4 \text{ (préindustriel)} = F + \Delta F / F \quad (2)$$

Si la puissance F rayonnée au sommet de l'atmosphère était de 240 W m^{-2} au début de l'ère industrielle et si le forçage radiatif ΔF est aujourd'hui de 2 W m^{-2} le rapport des F vaudrait $242/240 = 1,008$ et le rapport des $T = 1,002$. On en déduit que si la température était 288 K au début de l'ère industrielle elle deviendrait $288,6 \text{ K}$ aujourd'hui soit une augmentation de température de $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Une méthode différente utilisée par d'autres climatologues est basée cette fois sur la dérivée de la formule de Stefan Boltzmann qui pourrait s'écrire :

$$dF/dT = 4 \sigma T^3 \text{ d'où } \Delta F = 4 \sigma T^3 \Delta T \quad (3)$$

Avec un forçage radiatif de 2 W m^{-2} et si la température était 288 K au début de l'ère industrielle on trouve cette fois $\Delta T = 0,37 \text{ }^\circ\text{C}$.

En réalité la fig. 2 montre que l'augmentation globale de température enregistrée depuis 1880 ne suit ni l'une ni l'autre des relations (2) et (3). Elle est globalement de $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ mais passe par un minimum en 1910 suivi d'un petit maximum en 1940, d'un palier de 1950 à 1980 et d'une remontée à partir de 1980 pour se stabiliser depuis l'an 2000 approximativement.

La sensibilité climatique est définie comme l'augmentation de température qui résulterait d'un doublement de la concentration en CO_2 pour atteindre 800 ppmv (en 2200 au taux de croissance actuel). La valeur trouvée serait comprise entre $0,7$ et $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ sur la base des relations (2) ou (3) donc de l'ordre de 1°C par rapport à aujourd'hui. Ce n'est pas très inquiétant mais des rétroactions positives pourraient amplifier cet effet. On peut faire intervenir, par exemple, la vapeur d'eau, autre gaz à « effet de serre », dont la concentration augmenterait suite à l'élévation de température ou la fonte de la banquise et la diminution des surfaces enneigées qui auraient pour effet de diminuer l'albédo de la Terre et donc la fraction d'énergie solaire réfléchi. Pour une revue d'une douzaine de possibilités de rétroactions positives voir [ici](#).

Pour calculer la sensibilité climatique une formule censée tenir compte de différentes rétroactions est proposée [ici](#) :

$$\Delta T = 0,8 \Delta F \quad (4)$$

Avec $\Delta F = 3,7 \text{ W m}^{-2}$ calculé par la formule (1) pour un doublement de la concentration en CO_2 la formule (4) conduit à une augmentation de température de $3 \text{ }^\circ\text{C}$, valeur adoptée par la National Academy of Sciences (Washington) en 1979 avec une marge d'erreur de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ selon l'importance relative attribuée aux diverses rétroactions dans différents modèles climatiques globaux.

Il est évident que l'intervention de divers types de rétroaction permet l'introduction de nombreux paramètres dans différents modèles climatiques globaux. Dès lors tous les ajustements sont possibles entre la réalité climatique et les modèles théoriques comme l'illustre la fig. 3.

NB. Certaines références à Wikipedia.org ne sont plus correctes car les textes ont été modifiés ou supprimés depuis la publication initiale de cet article.

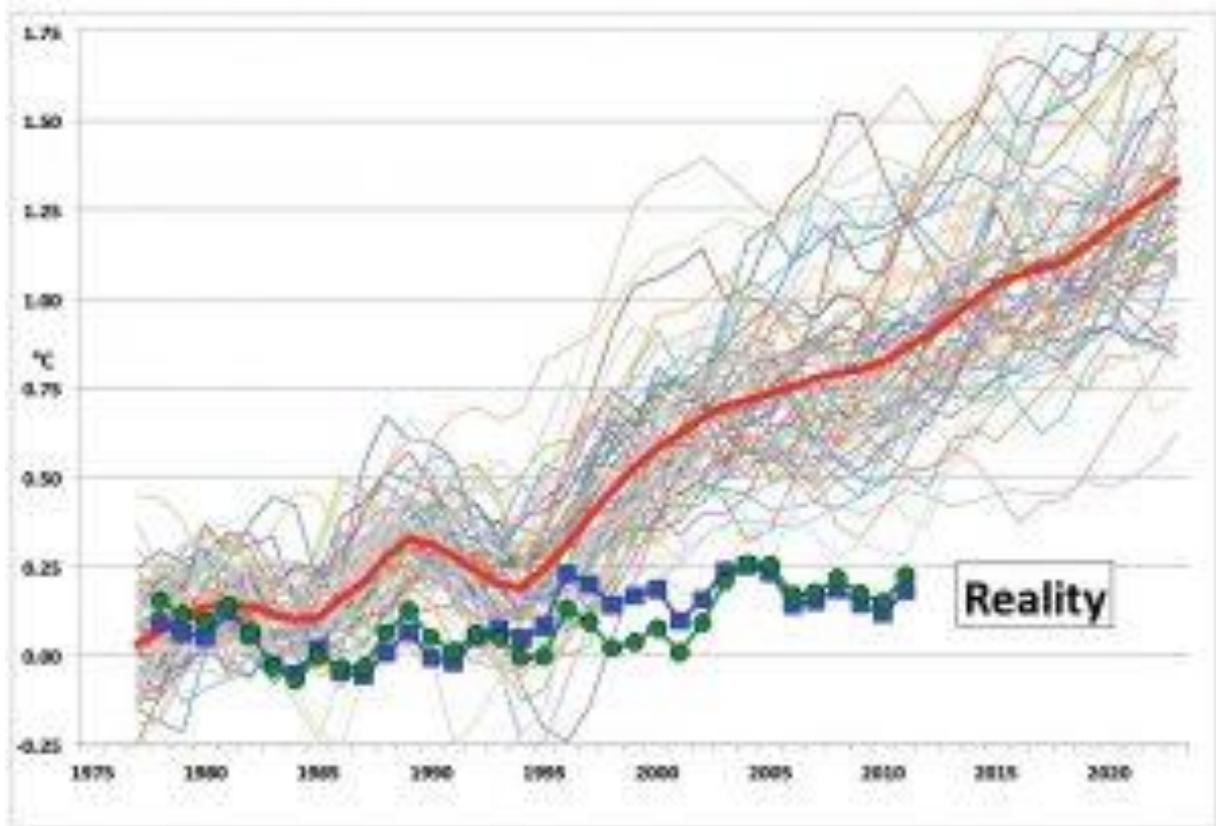


Fig. 3 Ecart de températures par rapport à 1975 (moyenne des mesures par ballons-sondes en vert, par satellites en bleu) et prédictions selon différents modèles climatiques (ligne rouge = moyenne de 102 modèles).

4. Du bon usage de la formule de Stefan-Boltzmann

Mis en ligne SCE : 26.04.2018

La formule de Stefan-Boltzmann est l'outil de travail des climatologues qui veulent prédire des variations de température à partir des flux énergétiques intervenant dans le bilan énergétique de la Terre (voir [ici](#)). Sous la forme utilisée, elle lie le flux unidirectionnel F rayonné (vers la Terre ou vers l'espace) à la température T (en K) à la puissance 4 (σ = constante de Stefan = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) :

$$F (\text{W m}^{-2}) = \sigma T^4 \quad (1)$$

Rappel théorique

La formule de Stefan-Boltzmann est dérivée de la théorie du « corps noir » élaborée par plusieurs physiciens dans la seconde moitié du 19ème siècle pour établir un lien entre le flux de rayonnement émis par tout solide à une température supérieure au zéro absolu et la température de ce solide. La meilleure représentation qu'on puisse se faire du modèle sur lequel est basée cette théorie est celle d'un four sous vide et à l'équilibre thermique dont la paroi interne opaque absorbe, sans aucune

réflexion ni transmission, tout rayonnement électromagnétique quelle que soit sa longueur d'onde. A l'équilibre thermique elle doit également réémettre tout rayonnement absorbé. Ce four parfaitement isolé devrait cependant être percé d'un minuscule orifice permettant d'analyser le rayonnement concentré à l'intérieur. Aucune interprétation quantitative du spectre observé ne fut possible dans le cadre de la théorie électromagnétique classique et c'est finalement Planck qui proposa en 1900 une équation introduisant l'idée, révolutionnaire pour l'époque, qu'à chaque longueur d'onde le rayonnement ne peut être émis que sous forme de « quanta » (c'est-à-dire de petits paquets) dont l'énergie est $h\nu = hc/\lambda$ (où ν et λ sont respectivement la fréquence et la longueur d'onde du rayonnement, c la vitesse de la lumière et h une nouvelle constante de la nature appelée désormais constante de Planck). Ce rayonnement qualifié de « thermique » est dû à l'oscillation de dipôles électriques formés par le noyau et le nuage électronique des atomes qui, en accord avec les lois de l'électromagnétisme, émettent un rayonnement de fréquence égale à la fréquence d'oscillation.

L'équation de Planck (mentionnée sur la fig. 1) permet de calculer à différentes températures l'émittance monochromatique hémisphérique $E(\lambda, T)$ en $W m^{-2}$ c'est-à-dire le flux par unité de surface émis à chaque longueur d'onde dans toutes les directions à partir d'une surface plane. Les courbes obtenues sont présentées sur la fig. 1. Elles sont indépendantes de la nature du corps.

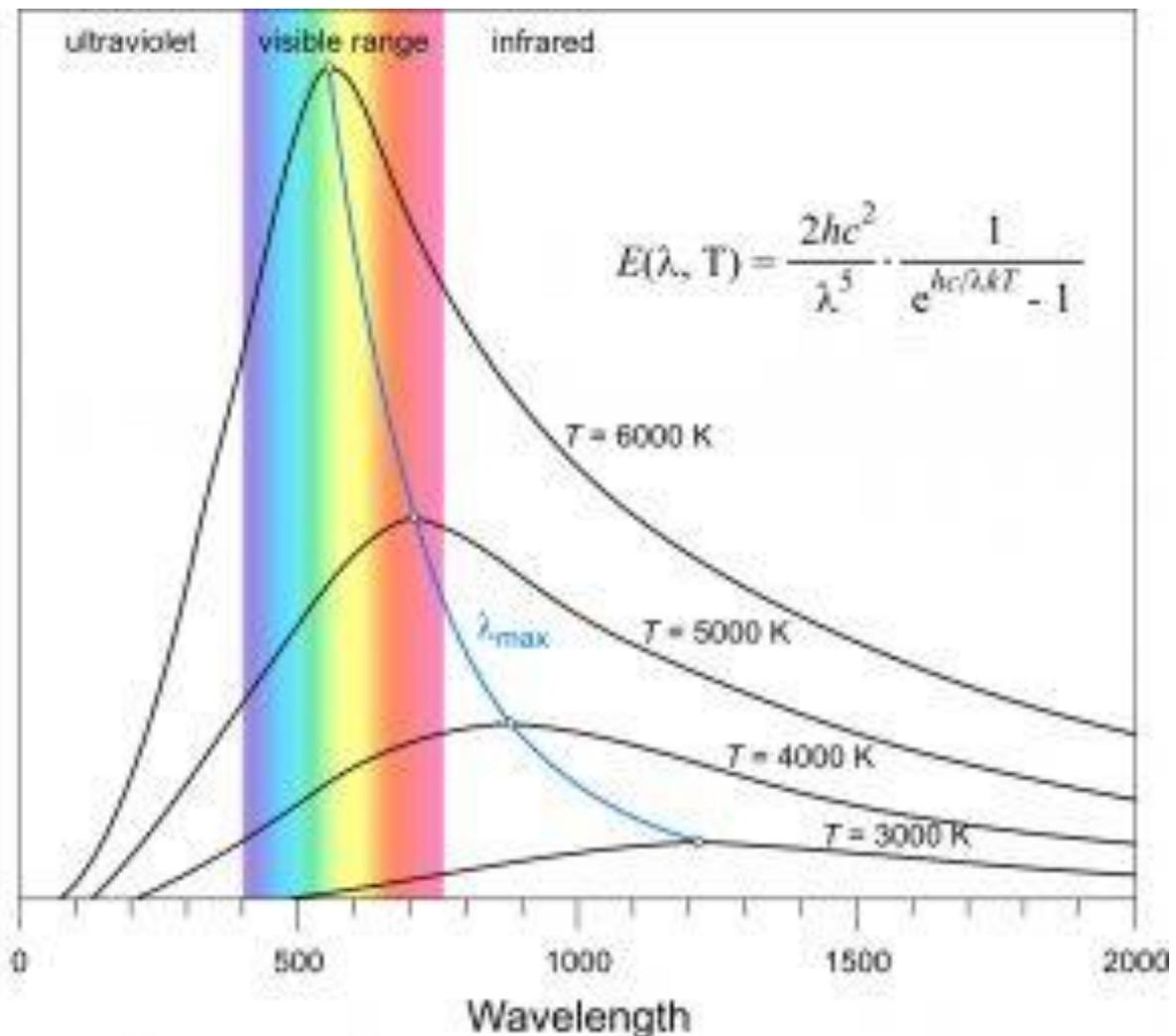


Fig. 1 Equation de Planck donnant $E(\lambda, T)$ en fonction de la longueur d'onde (en nm)

L'intégration de l'équation de Planck sur tout le domaine de longueurs d'onde conduit à la formule de Stefan-Boltzmann qui lie l'émissivité hémisphérique totale $E(T)$ (en $W m^{-2}$) à la température T (en K) à la puissance 4 (σ = constante de Stefan) :

$$E(T)(W m^{-2}) = \sigma T^4 \quad (2)$$

La relation (2) fournit une mesure de l'aire sous les courbes de la fig. 1. Il faut remarquer que l'émissivité énergétique hémisphérique $E(T)$ intervenant dans la relation (2) est physiquement différente du flux unidirectionnel F de la relation (1). Cette dernière, couramment utilisée en climatologie, peut être considérée comme une approximation à usage pratique. La fig. 1 montre aussi que le maximum de la courbe d'émission se déplace avec la température selon la loi de Wien :

$$\lambda_{max} = C / T \quad (C = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}).$$

Limitations pratiques

L'application de l'équation de Planck et de la formule de Stefan-Boltzmann à des substances réelles bien différentes du modèle théorique implique certaines limitations.

1° En présence d'un autre corps à une température supérieure au zéro absolu, émettant donc aussi un rayonnement thermique, l'échange énergétique radiatif obéira à la relation :

$$F (W m^{-2}) = \sigma (T_c^4 - T_f^4)$$

Dans cette formule T_c et T_f sont respectivement les températures des corps chaud et froid impliqués dans l'échange énergétique (le symbole F correspond toujours à un flux unidirectionnel comme il est d'usage en climatologie). Le rayonnement émis par un corps froid ne peut donc pas être absorbé par un corps chaud. A titre d'exemple, on remarque sur la fig. 1 que toutes les longueurs d'onde émises par un corps à 3000 K sont déjà émises par un corps à 4000 K. Elles ne pourront donc être absorbées pour exciter l'oscillation de nouveaux dipôles dans ce corps plus chaud.

2° En toute rigueur l'équation de Planck et la formule de Stefan-Boltzmann ne peuvent être utilisées que si le rayonnement thermique est le seul mécanisme d'échange énergétique. Elle ne peut donc s'appliquer à la Terre où la convection de l'air et l'évaporation de l'eau des océans contribuent de manière prépondérante au bilan énergétique (voir la fig. 1 [ici](#)). Si les satellites détectent au sommet de l'atmosphère l'émission sous forme de rayonnement de $240 W m^{-2}$ on ne peut PAS en déduire, par application de la formule (1), que la surface terrestre devrait être à la température de 255 K (-18°C). De même, le fait que la température « globale moyenne » de la Terre soit 288 K (15°C) ne permet PAS d'en déduire que le flux radiatif émis par la Terre serait de $390 W m^{-2}$

3° Dans la pratique, la surface d'un corps réel ne se comporte pas comme celle d'un corps noir notamment car une partie du flux incident est réfléchi. On définit alors l'émissivité ϵ d'un corps quelconque comme le rapport entre le flux d'énergie radiative émis par ce corps et le flux d'énergie radiative qui serait émis par un corps noir à la même température. Pour un corps noir $\epsilon = 1$ et pour un corps réel $\epsilon < 1$. On qualifie ces corps de « gris » si l'équilibre thermique est néanmoins maintenu à toutes les longueurs d'onde ce qui implique que le flux émis reste égal au flux absorbé. L'absorptivité α d'un corps « gris » (définie de manière analogue à son émissivité) doit donc toujours être égale à son émissivité : $\alpha = \epsilon$ (loi du rayonnement de Kirchhoff). Si $\alpha \neq \epsilon$ le corps n'est ni gris, ni

noir et est hors d'équilibre thermique. Dans le cas d'un corps « gris » la formule de Stefan-Boltzmann devrait s'écrire :

$$F \text{ (W m}^{-2}\text{)} = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

A une même température le flux radiatif émis par un corps gris sera moindre que celui émis par un corps noir. Les courbes de Planck seront semblables à celles de la fig. 1 mais les intensités émises seront plus faibles.

4° D'une manière générale, lorsque la surface d'un corps est soumise à un rayonnement incident, une fraction ρ (réflectivité) de l'énergie incidente est réfléchie, une fraction α (absorptivité) est absorbée et une fraction τ (transmissivité) est transmise (fig. 2). L'importance de ces différentes fractions dépend de la longueur d'onde et de la température mais la conservation de l'énergie implique toujours que : $\rho + \alpha + \tau = 1$. Dans le cas d'un corps noir ou gris $\tau = 0$ d'où $\alpha = 1 - \rho$. De plus, $\alpha = \epsilon$ d'après la loi du rayonnement de Kirchhoff. Dans l'un et l'autre cas la formule de Stefan-Boltzmann peut être utilisée sous la forme (1) ou (3) mais elle n'est pas valable si $\tau \neq 0$.

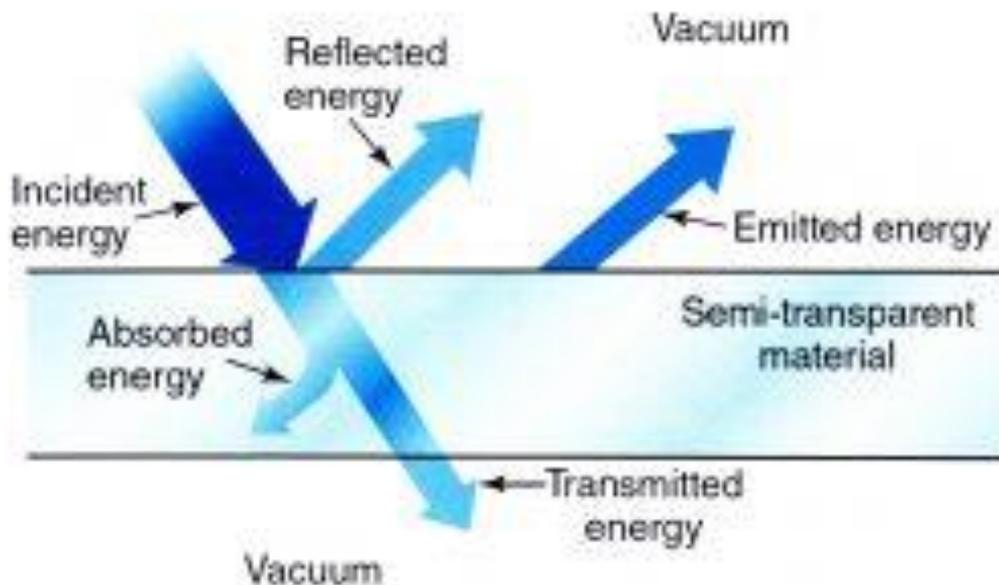


Fig. 2 Interactions d'un rayonnement incident avec une surface

Dans le bilan énergétique de la Terre proposé par la NASA (voir la fig.1 [ici](#)) 4 % du flux radiatif d'origine solaire sont réfléchis par la surface terrestre ($\rho = 0,04$). L'absorptivité moyenne de la Terre serait donc $\alpha = 0,96$. La Terre pourrait être considérée comme un corps gris si ce n'est que 71 % de sa surface sont occupés par des mers ou des océans. Or, l'eau est pratiquement transparente dans le domaine le plus intense du rayonnement solaire (400 nm à 1 μm) où son coefficient d'absorption est très faible (fig. 3). Comme $\tau \neq 0$ dans ce domaine de longueurs d'onde elle ne peut être considérée comme un corps gris et la formule de Stefan-Boltzmann n'est pas applicable.

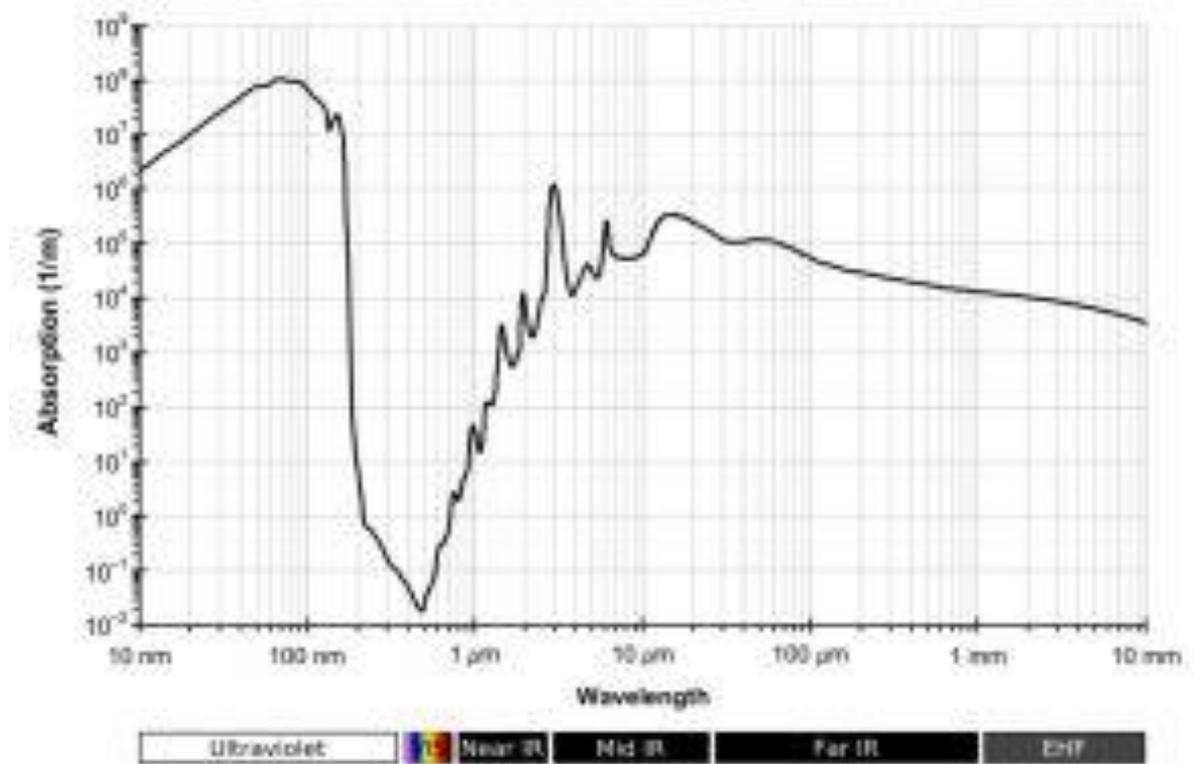


Fig. 3 Spectre d'absorption de l'eau

Néanmoins, pour estimer la température de surface des océans, des mesures du rayonnement émis ont été faites par satellite dans la fenêtre de transparence atmosphérique de 8 à 13 μm (voir la fig. 2 [ici](#)) où le coefficient d'absorption de l'eau est beaucoup plus élevé (fig. 3). Dans cet intervalle de longueurs d'onde la pénétration du rayonnement solaire est limitée à quelques μm de la surface et $\tau = 0$. La formule de Stefan-Boltzmann a alors été utilisée pour déterminer la température de surface de la mer et des océans dans différentes régions du globe. Il ne faut cependant pas oublier (voir rappel théorique) que la formule de Stefan-Boltzmann est obtenue par intégration de l'équation de Planck sur tout le domaine de longueurs d'onde rayonné et que relation en T à la puissance 4 n'est valable que dans ces conditions. L'application à la mesure de la température de surface des océans dans un domaine très limité de longueurs d'onde constitue donc une approximation.

5° Les basses couches atmosphériques ne peuvent jouer le rôle de corps noir car elles n'en présentent aucune des caractéristiques spécifiques. Elles n'ont pas de surface, les transferts énergétiques n'y sont pas exclusivement radiatifs et elles n'absorbent ni émettent toutes les longueurs d'onde puisque les constituants atmosphériques présentent un spectre de raies en absorption comme en émission.

5. Le CO₂ et le climat avec et sans effet de serre

Mis en ligne SCE : 06.08.2018

De tous temps les hommes se sont intéressés au climat et ont tenté de prévoir son évolution. Dès l'Antiquité il était connu que des caractéristiques géographiques comme la latitude mais aussi l'altitude ou le voisinage de vastes étendues d'eau avaient une grande influence sur le climat. Sur cette base les climatologues ont été amenés à distinguer différents types de climats tels que tropical, désertique, tempéré, polaire, etc. Ensuite, il est progressivement apparu que le climat est un système extrêmement complexe qui dépend de l'activité solaire ainsi que de la distance et de l'orientation de la Terre par rapport au Soleil, facteurs qui varient à des échelles de temps très différentes.

Mais depuis quelques dizaines d'années, et plus particulièrement depuis la création du GIEC en 1988 sous l'égide d'organisations internationales, le climat est envisagé globalement à l'échelle de la Terre entière sans tenir compte de particularités géographiques locales. De plus, des événements singuliers tels qu'ouragans, inondations ou sécheresses sont désormais imputés par certains climatologues à un changement climatique dont l'activité humaine serait responsable. Cette théorie du changement climatique d'origine anthropique qui a des conséquences politiques, économiques et sociales très importantes repose cependant sur une seule et fragile hypothèse : le CO₂ renverrait vers la Terre une partie du rayonnement qui devrait s'échapper vers le vide interplanétaire et il en résulterait une élévation de la température « moyenne globale » à la surface de la Terre. Ce phénomène radiatif improprement appelé « effet de serre » a des défenseurs et des adversaires entre lesquels le débat est souvent impossible. Il semble cependant qu'un consensus pourrait se dégager si on pouvait donner une base quantitative à certains phénomènes sur lesquels il y a accord d'un point de vue qualitatif.

5.1. A la recherche d'un consensus

On peut estimer que les scientifiques qui s'intéressent au climat, tant partisans qu'adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique, s'accordent sur les points suivants :

- Le climat peut changer comme il l'a toujours fait et continuera à le faire ;
- Pour maintenir une température approximativement constante la Terre doit dissiper l'énergie reçue du Soleil et le bilan énergétique de la Terre doit tenir compte de différents mécanismes possibles ;
- Une partie de l'énergie est dissipée par la Terre sous forme de rayonnement thermique aussi qualifié de rayonnement du « corps noir » ;
- Certains gaz présents dans l'atmosphère, et notamment le CO₂, peuvent absorber une fraction de ce rayonnement thermique.
- Le CO₂ ayant absorbé une fraction de ce rayonnement pourrait avoir une influence sur la température de la surface terrestre ou des basses couches atmosphériques.

Poser le problème en termes quantitatifs requiert la connaissance de quelques principes de physique et de plusieurs grandeurs qui sont mal connues et ne font l'objet que d'estimations souvent contestées. Pour progresser il est cependant indispensable d'accepter certaines estimations même incertaines. Nous les considérerons alors comme hypothèses de base communes aux partisans et adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique.

a) Quantité d'énergie solaire reçue par la Terre au sommet de l'atmosphère

Au niveau de l'orbite terrestre chaque mètre carré placé perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit, en moyenne sur l'année, une puissance de 1368 W, c'est la « constante solaire ». La valeur de 342 W m⁻² au sommet de l'atmosphère est basée sur l'idée que chaque mètre carré de la surface terrestre reçoit en continu le quart de 1368 W car la Terre n'intercepte le rayonnement solaire que sur une surface égale à celle d'un disque de même rayon. Cette valeur n'est pas mesurée mais calculée en admettant une distribution uniforme de l'énergie sur toute la surface terrestre sans tenir compte ni d'un hémisphère non éclairé, ni d'une variation en fonction de la latitude. De ce fait, elle est certainement surestimée mais une valeur correcte tenant compte de la vitesse de rotation de la Terre et de l'inclinaison de son axe de rotation donnerait lieu à des difficultés de calcul insurmontables. En attribuant à la Terre un albédo de 0,3 impliquant non seulement l'énergie réfléchiée par la surface terrestre et par l'atmosphère mais aussi et principalement par les nuages, le rayonnement effectivement reçu par la surface terrestre serait alors réduit à 70 % de 342 W m⁻² soit environ 240 W m⁻². Acceptons cette valeur comme une première hypothèse de base commune aux partisans et adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique.

b) Fraction d'énergie émise par la Terre sous forme de rayonnement thermique

Pour maintenir une température constante la Terre doit dissiper l'énergie reçue du Soleil par différents mécanismes : convection, évaporation de l'eau des océans et rayonnement thermique. Il subsiste une grande incertitude concernant l'importance relative de ces différents mécanismes mais le modèle le plus généralement admis est celui proposé par la NASA (voir [ici](#)). Selon la NASA 21 % de l'énergie reçue par la Terre au sommet de l'atmosphère seraient dissipés par rayonnement thermique, seul mécanisme susceptible de donner lieu à un « effet de serre ». L'évaporation de l'eau des océans et la convection de l'air interviendraient respectivement pour 23 % et 7 %. Ces proportions ne résultent pas de mesures mais d'estimations et surprennent car la convection est généralement le mécanisme prépondérant pour des objets à température et pression ambiantes tandis que le rayonnement thermique ne devient important qu'à haute température. Acceptons néanmoins le bilan thermique proposé par la NASA comme une deuxième hypothèse de base commune aux partisans et adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique. Notons cependant que pour Sorokhtin et collaborateurs [1] la convection interviendrait pour 34 %, l'évaporation de l'eau des océans pour 13 % et le rayonnement thermique pour 4 % seulement. Finalement toute l'énergie dissipée par la surface terrestre (quel que soit le mécanisme) ou absorbée directement par l'atmosphère et les nuages est convertie en rayonnement dans les couches supérieures de l'atmosphère car c'est le seul mécanisme d'évacuation de cette énergie hors de l'atmosphère terrestre. En haute altitude les satellites détectent effectivement un rayonnement moyen de 240 W m⁻², en accord avec le paragraphe **1a** ci-dessus, mais les valeurs locales peuvent varier de 122 W m⁻² au-dessus de l'Antarctique à 265 W m⁻² au-dessus de la Basse Californie avec une différence de l'ordre de 50 W m⁻² entre pôles et équateur. Ce rayonnement moyen provient essentiellement des couches supérieures de l'atmosphère à des températures beaucoup plus basses que la surface terrestre.

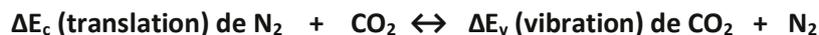
c) Fraction du rayonnement thermique de la Terre absorbée par le CO₂.

En admettant que la Terre se comporte comme un corps noir à la température de 288 K (15 ° C) l'équation de Planck permet de calculer que 95 % du rayonnement thermique seraient compris entre 5 et 40 μm. Le CO₂ présente une bande d'absorption dans l'infrarouge centrée à 15 μm et on trouve, en intégrant l'équation de Planck dans le domaine de 14 à 16 μm, que 9,3 % du rayonnement thermique de la Terre est émis dans cet intervalle de longueurs d'onde. On en déduit que, quel que

soit son coefficient d'absorption, le CO₂ ne pourrait absorber qu'un peu moins de 2 % (9,3 % de 21 %) de l'énergie totale reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère, soit environ 6 W m⁻² (voir [ici](#)). Acceptons cette valeur comme une troisième hypothèse de base commune aux partisans et adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique. Remarquons cependant que les océans occupent 71 % de la surface terrestre et qu'il est difficile de les considérer comme corps noir puisque l'eau n'absorbe (et donc ne peut émettre) toutes les longueurs d'onde avec la même efficacité dans le domaine de 5 à 40 μm (250 à 2000 cm⁻¹) comme l'indique la fig. 1.

d) Equilibre vibrationnel du CO₂ dans les basses couches atmosphériques

A la pression d'une atmosphère et à la température de 15°C les molécules de l'air sont animées de mouvements de translation à des vitesses de l'ordre de 500 m par seconde. Dans ces conditions chacune subit plusieurs milliards de collisions par seconde (voir [ici](#)). Si elles disposent de l'énergie suffisante elles peuvent aussi entrer en vibration avec variation rapide et périodique des longueurs ou des angles de leurs liaisons interatomiques. Les molécules biatomiques N₂ et O₂ sont très rigides et ne vibrent pratiquement pas à 15°C. Par contre, les molécules triatomiques de CO₂, linéaires à l'état fondamental O=C=O, peuvent se déformer facilement et devenir anguleuses en vibrant. L'énergie requise pour atteindre cet état de vibration peut être calculée à partir de la bande d'absorption détectée à 15 μm dans le spectre infrarouge du CO₂ grâce à la relation $E_v = hc/\lambda$ (où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde du rayonnement absorbé, dans ce cas 15 μm). Cette valeur n'est que de 30 % supérieure à l'énergie cinétique moyenne des molécules environnantes N₂ et O₂ qui, d'après la théorie cinétique des gaz, vaut $E_c = 5/2 k T$ (où k est la constante de Boltzmann et T la température en Kelvin). Or, beaucoup de molécules ont une énergie cinétique supérieure à cette valeur moyenne car les énergies cinétiques de translation $E_t = mv^2/2$ présentent une large distribution continue qui suit la statistique de Maxwell-Boltzmann. La fonction mathématique correspondante permet de calculer qu'à 15°C plus de 40 % des molécules N₂ et O₂ ont suffisamment d'énergie cinétique pour amener les molécules de CO₂ à leur plus bas niveau de vibration lors d'une collision inélastique (sans conservation de l'énergie cinétique). On admet généralement que 0,001 % des collisions sont inélastiques (voir [2c](#) ci-dessous) ce qui représente encore plusieurs dizaines de milliers par seconde. Dans ces conditions il y a conversion d'une fraction Δ de l'énergie cinétique de translation des molécules N₂ ou O₂ en énergie de vibration du CO₂ :



Cette conversion est réversible et les molécules de CO₂ excitées se désactivent en quelques microsecondes pour retourner à l'état fondamental lors de nouveaux chocs avec les molécules environnantes qui, de ce fait, acquièrent temporairement un surcroît d'énergie cinétique de translation. Il existe donc un équilibre dynamique résultant des très nombreuses collisions. Il ne dépend que de la température et de la pression (par le biais de la distribution des énergies et du nombre de chocs entre molécules). Quoique ce ne soient pas toujours les mêmes molécules de CO₂ qui vibrent la proportion de molécules en état de vibration reste constante à une température et une pression déterminées (environ 40% à 15°C et à la pression d'une atmosphère). Admettons le transfert d'énergie entre molécules de CO₂ et molécules environnantes comme quatrième hypothèse de base commune aux partisans et adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique.

A ce stade de la discussion si les quatre points ci-dessus font l'objet d'un large consensus entre partisans et adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique leur divergence d'opinion pourrait donner lieu un véritable débat scientifique. Cette divergence d'opinion se manifeste fondamentalement à propos du mécanisme de désactivation des molécules de CO₂ excitées par

absorption d'une fraction du rayonnement thermique de la Terre. Envisageons successivement avec le maximum d'objectivité les arguments scientifiques présentés par les uns et les autres.

5.2. Influence du CO₂ sur le climat

Les partisans de la théorie du changement climatique d'origine anthropique invoquent à l'appui de leur thèse l'existence d'un « effet de serre » alors que leurs adversaires contestent cette hypothèse. Avant toute discussion il est essentiel d'en bien définir le sujet, en l'occurrence l'effet de serre.

a) Définition de l'effet de serre

Il existe un grand nombre de définitions de l'effet de serre. Gerlich et Tschuschner en rappellent plus d'une demi-douzaine (voir paragraphe 3.3 [ici](#)) qui, pour la plupart, résultent d'une mauvaise compréhension du phénomène qui intervient réellement dans une serre agricole. Certains média destinés au grand public font appel à une analogie naïve en prétendant que les gaz à effet de serre entourent la Terre « comme une couverture » et l'empêchent de perdre sa chaleur. La seule définition de l'effet de serre qui décrit clairement le phénomène envisagé et répond, de plus, au critère de réfutabilité énoncé par Popper est la suivante :

« L'effet de serre est un phénomène radiatif causé par des gaz tels la vapeur d'eau ou le CO₂ qui absorbent une fraction du rayonnement infrarouge émis par la Terre et le réémettent ensuite dans toutes les directions et notamment vers la surface terrestre dont la température serait, de ce fait, plus élevée qu'en l'absence de gaz absorbant l'infrarouge. Ces gaz sont dès lors qualifiés de gaz « à effet de serre ».

Considérons cet énoncé comme une définition scientifique acceptable tant par les partisans que par les adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique.

b) Influence du CO₂ sur le climat avec effet de serre.

L'argument le plus souvent avancé par les partisans de la théorie du changement climatique d'origine anthropique est qu'en l'absence de gaz à effet de serre la température « globale moyenne » de la Terre serait de -18°C au lieu de la température généralement admise de 15°C . En réalité cette différence de 33°C , parfois présentée même comme une définition de l'effet de serre, est basée sur un calcul incorrect. En effet, la température de -18°C est obtenue en introduisant dans la formule de Stefan-Boltzmann la valeur de 240 W m^{-2} mesurée par satellite (voir **1b** ci-dessus). Or, la formule de Stefan-Boltzmann n'est valable que si le rayonnement thermique est le seul mécanisme d'échange énergétique (voir [ici](#)). Cette valeur de -18°C correspondrait donc à une Terre sans atmosphère et non sans gaz à effet de serre. Mais sans atmosphère l'albédo de la Terre serait voisin de 0,1 (comme celui de la Lune) et non 0,3 valeur due largement à la présence de nuages (voir **1a** ci-dessus). Avec un albédo de 0,1 la quantité d'énergie reçue par la Terre en provenance du Soleil puis réémise serait 308 W m^{-2} et non 240 W m^{-2} . L'application, justifiée cette fois, de la formule de Stefan-Boltzmann conduirait à une température de 271 K (soit -2°C) pour une Terre sans atmosphère. La différence de 17°C entre cette valeur théorique et la température « moyenne globale » de la Terre est due à la présence d'une atmosphère qui modifie le mécanisme de dissipation de l'énergie par comparaison avec une Terre sans atmosphère.

Dans le cas d'un gaz parfaits à l'équilibre hydrostatique, la thermodynamique de l'atmosphère conduit à la relation :

$$dQ = C_p dT + g dh$$

où C_p est la capacité thermique massique de l'air et g l'accélération due à la pesanteur

En absence d'échange avec l'environnement $dQ = 0$ d'où $dT = -g/C_p \cdot dh$ et en intégrant on trouve :

$$T - T_0 = - (g / C_p) (h - h_0)$$

Dans cette formule h_0 est une altitude de référence où la température vaut T_0 . Le facteur g/C_p est appelé gradient adiabatique (« lapse rate » en anglais). Cette formule indique que la température diminue linéairement lorsque l'altitude augmente. Avec $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$ et $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pour l'air sec on trouve un gradient adiabatique de $9,75 \text{ K/km}$, ordre de grandeur généralement admis en atmosphère sèche. La capacité thermique massique de l'air humide étant plus élevée le gradient adiabatique sera plus faible et dépendra de la température. Une valeur « environnementale moyenne » de $6,5 \text{ K/km}$ est prise en compte par l'International Civil Aviation Organization (ICAO). Sur cette base en prenant la température de 15° C comme référence au niveau de la mer on calcule que la température souvent citée de -18° C serait atteinte à une altitude de 5100 m . La différence de 33° C observée par rapport à 15° C est évidemment due à la différence d'altitude comme l'indique la formule ci-dessus et ne peut être considérée comme la manifestation d'un effet de serre.

La présence d'une atmosphère ne réchauffe évidemment pas la Terre. Ce sont les basses couches atmosphériques qui sont réchauffées au contact du sol chauffé par le Soleil et le gradient adiabatique fait que l'air se refroidit progressivement avec l'altitude donnant lieu à un courant de convection. Cet effet ne dépend en rien de la présence d'un peu de CO_2 dans l'air.

Si les 2 % de l'énergie solaire absorbés par le CO_2 à partir du rayonnement thermique de la Terre (voir **1c** ci-dessus) sont réémis dans toutes les directions il n'y en aurait pas plus de la moitié qui atteindrait la surface terrestre soit environ 3 W m^{-2} . Pour fixer un ordre de grandeur rappelons qu'un être humain au repos dissipe 60 à 100 W sous forme de chaleur. L'augmentation de température due à un éventuel effet de serre serait donc bien inférieure à celle résultant de la présence d'un être humain occupant une surface d'un mètre carré. Encore faudrait-il que la surface terrestre puisse réabsorber spécifiquement le rayonnement de longueur d'onde $15 \mu\text{m}$ d'abord émis par la surface terrestre puis absorbé par le CO_2 et finalement réémis. Ce serait en contradiction avec l'hypothèse que la Terre se comporte comme un corps noir (ou gris) qui, à l'équilibre thermique, ne peut pas absorber plus d'énergie qu'il n'en émet (voir [ici](#)). On pourrait objecter que les océans qui occupent 71 % de la surface terrestre ne se comportent pas comme un corps noir (ou gris). En effet, l'eau liquide présente une large bande d'absorption centrée à $14,8 \mu\text{m}$ (675 cm^{-1}). Connaissant le coefficient d'absorption de cette bande (voir fig. 1) on peut calculer que l'absorption d'un rayonnement de longueur d'onde $15 \mu\text{m}$ serait pratiquement totale sur une épaisseur de 15 microns . L'absorption d'énergie par cette couche très superficielle ne pourrait évidemment contribuer au réchauffement des océans.

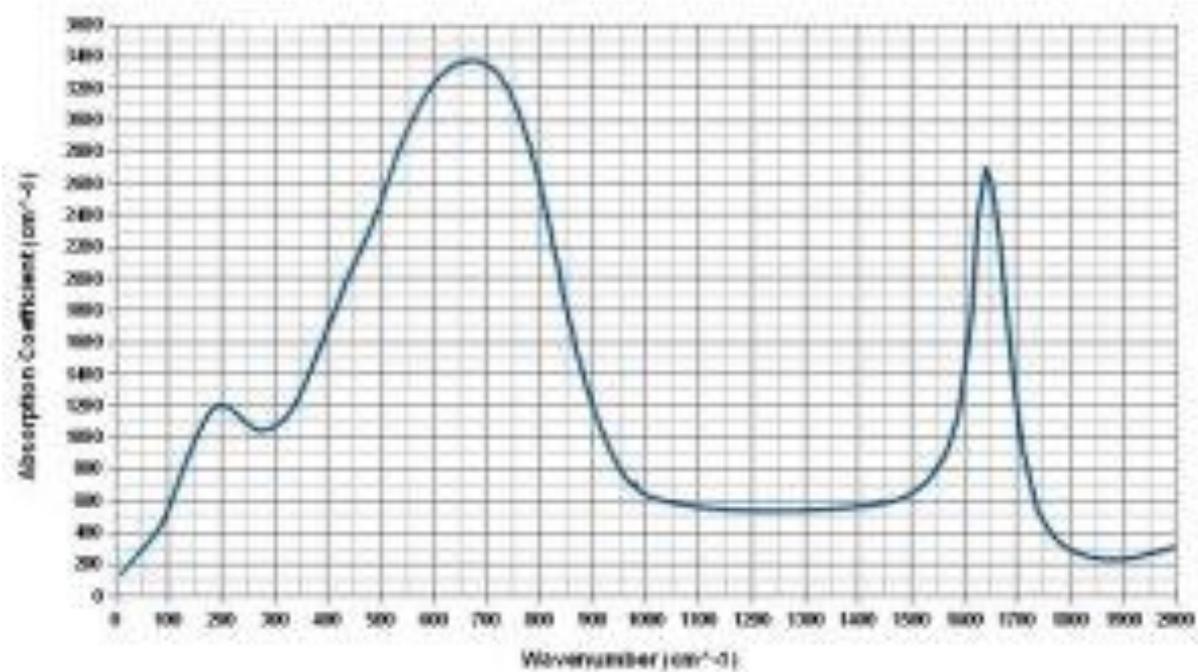


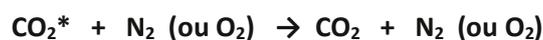
Fig. 1 Spectre d'absorption de l'eau liquide dans le domaine de l'infrarouge thermique

On peut en conclure que l'effet de serre, s'il existait, ne pourrait conduire à un réchauffement de la surface terrestre émergée mais seulement à un léger accroissement du mécanisme de dissipation de l'énergie par évaporation de l'eau des océans au détriment du rayonnement thermique.

c) Influence du CO₂ sur le climat sans effet de serre

Le principal argument qui conduit à réfuter la théorie de l'effet de serre est que la probabilité de désactivation radiative du CO₂ ayant absorbé une fraction du rayonnement thermique de la Terre est pratiquement nulle car l'équilibre vibrationnel mentionné en **1d** ci-dessus ne dépend que de la température et de la pression. La fraction de molécules à l'état de vibration restera donc voisine de 40 % à des pressions voisines d'une atmosphère et à la température de 15 °C, quelle que soit la quantité d'énergie absorbée à partir du rayonnement thermique de la Terre car cet apport d'énergie supplémentaire sera rapidement converti en énergie de translation des molécules environnantes.

La conversion d'énergie de vibration en énergie de translation (**V → T**) est un phénomène bien connu dont l'étude s'est développée grâce aux progrès de la technologie laser permettant d'obtenir sélectivement différents états de vibration [2]. En particulier la désactivation par collisions de molécules de CO₂ à leur plus bas niveau énergétique de vibration (notées CO₂^{*}) a été bien étudiée et les constantes de vitesse de la réaction :

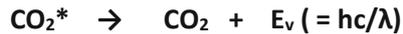


ont été mesurées entre 300 et 140 K [3]. Elles sont de l'ordre de 10⁵ fois inférieures à ce que l'on aurait pu prévoir sur la base du nombre total de collisions (plusieurs milliards par seconde) car elles résultent seulement des collisions inélastiques qui ne représentent, en général, que 0,001 % du nombre total de collisions. D'autre part, la conversion inverse d'énergie de translation en énergie de

vibration ($T \rightarrow V$) a aussi été étudiée dans le cas du CO_2 . A des altitudes de l'ordre de 100 km l'énergie de translation d'atomes d'oxygène peut être transférée à des molécules de CO_2 et convertie en énergie de vibration [4] :



A cette altitude la pression est si faible que le nombre de collisions entre molécules n'est plus que de l'ordre de 1000 par seconde et une fraction des molécules de CO_2^* peut alors se désactiver avec émission d'un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 15 \mu\text{m}$:



On attribue à cette réaction un effet de refroidissement de l'atmosphère par conversion d'énergie cinétique en rayonnement [5].

Ces exemples confirment qu'à 15°C et à des pressions voisines d'une atmosphère les molécules de CO_2 en état de vibration se désactiveront par collisions avec les molécules environnantes comme mentionné au paragraphe **1d** ci-dessus. Dans ces conditions régnant à la surface de la Terre l'effet de serre ne peut avoir lieu. La désactivation radiative d'un état excité ne peut entrer en compétition avec la désactivation par collisions que pour des états excités de très courte durée de vie (10^{-9} à 10^{-7} s) qui peuvent émettre un rayonnement avant qu'une collision inélastique ne se produise. C'est le cas de nombreuses molécules organiques complexes dont la fluorescence est observée en solution. La désactivation radiative est aussi possible si la fréquence des collisions intermoléculaires est très faible (en milieu gazeux à très faible pression comme dans l'exemple ci-dessus ou en milieu vitreux rigide). Ces résultats permettent de conclure que les molécules de CO_2 excitées à l'état de vibration par absorption d'une fraction du rayonnement thermique de la Terre se désactiveront selon le mécanisme mentionné au paragraphe **1d** ci-dessus et l'apport d'énergie supplémentaire sera rapidement converti en énergie de translation des molécules environnantes ce qui aura pour effet d'augmenter les mouvements de convection qui contribuent à dissiper l'énergie solaire absorbée par la surface terrestre.

5.3. Conclusion

De cet exposé on peut conclure que l'effet de serre, tel que défini en **2a** ci-dessus, n'existe pas au niveau des basses couches atmosphériques et que, même s'il existait, l'apport d'énergie résultant de l'absorption d'une fraction du rayonnement thermique de la Terre serait rapidement converti en évaporation de l'eau des océans. Par contre, en l'absence d'effet de serre ce sont les mouvements de convection de l'air qui sont légèrement accentués. Dans l'un et l'autre cas le bilan énergétique global de la Terre ne sera pas modifié puisque finalement toute l'énergie dissipée par la surface terrestre, quel que soit le mécanisme, est convertie en rayonnement dans les couches supérieures de l'atmosphère car c'est le seul mécanisme d'évacuation de cette énergie hors de l'atmosphère terrestre (voir **1b** ci-dessus). L'improbable débat entre partisans et adversaires d'un changement climatique d'origine anthropique pourrait donc être rapidement clôturé puisque le CO_2 ne peut contribuer en aucune manière à un réchauffement de la surface terrestre.

[1] O.G. Sorokhtin, G.V. Chilingar et L.F. Khilyuk « *Global Warming and Global Cooling* » ed. Elsevier Science (2007)

[2] G.W. Flynn, C.S. Parmenter, A.M. Wodtke, *J.Phys.Chem.* **100**, 12817 (1996)

[3] R.M. Siddles, G.J. Wilson, C.J.S.M Simpson, *Chem.Phys.* **189**, 779 (1994)

[4] K.J. Castle, K.M. Kleissas, J.M. Rhinehart, E.S. Hwang, J.A.Dodd, *J.Geophys. Research***111**, A09303 (2006)

[5] K.J. Castle, L.A. Black, M.W. Simione, J.A. Dodd, *J.Geophys. Research* **117**, A04310 (2012)

[6. Encore des observations n'allant pas dans le sens de la théorie!](#)

Mis en ligne SCE : 25.01.2019

En octobre 2017 un article signé Carl Brehmer^[1] et traitant de la théorie de l'effet de serre radiatif était publié sur le site web de l'association anglaise [Principia Scientific International](#)^[2]. Dans cet article, l'auteur utilisait des données fournies par les stations météorologiques SURFRAD et démontrait que la théorie de l'effet de serre ne pouvait pas expliquer les observations. Si l'auteur a raison, il s'agit encore d'un sérieux problème pour la théorie. Dans le présent article nous allons suivre les pas de Carl Brehmer mais nous allons faire nos propres calculs en employant une autre méthodologie. Arriverons-nous aux mêmes conclusions?

6.1. Introduction

Il est presque inutile de le rappeler : la théorie de l'effet de serre radiatif, selon la définition donnée par le GIEC (AR5), prédit une hausse des températures de la basse atmosphère lorsque la concentration en CO₂ augmente. Désormais, tout le monde sait cela et c'est pour cette raison que l'on vous force à abandonner votre voiture et que [les étudiants de 2019 descendent dans la rue pour manifester](#). Selon cette théorie, la température augmenterait car le CO₂ atmosphérique retiendrait beaucoup plus les infra-rouges émis par la Terre, ce qui ralentirait le refroidissement de l'atmosphère et produirait donc un réchauffement. Le GIEC évoque aussi un phénomène qu'il appelle « backradiation » : les infra-rouges venant du ciel nous réchaufferaient beaucoup plus lorsque le taux de CO₂ dans l'atmosphère est élevé. Comme Carl Brehmer, nous allons utiliser les données SURFRAD pour vérifier tout ceci.

6.2. Présentation des stations SURFRAD

Les données qui vont être utilisées dans cet article sont **en accès libre** sur le site de la [NOAA](#) (National Oceanic and Atmospheric Administration). Il est très facile de se les procurer. Parmi ces données nous trouvons des données provenant du [réseau SURFRAD](#). Il s'agit de stations météorologiques localisées aux Etats-Unis. Ces stations ont été établies en 1993 (Figure 1) et sont particulières car elles mesurent en continu divers paramètres radiatifs (ce qui n'est pas le cas des stations météo classiques). Par exemple, les stations SURFRAD mesurent en continu les infra-rouges émis par la Terre (upwelling IR), **les infra-rouges venant du ciel (downwelling IR)**, les UV-B, la lumière solaire diffuse, la lumière solaire totale, etc. Ces mesures sont accompagnées de divers paramètres météorologiques plus classiques tels que température moyenne de la basse atmosphère, vitesse du vent, humidité relative, etc. Les stations météo SURFRAD sont donc très bien équipées et possèdent divers instruments pour mesurer les radiations tels que des pyréliomètres, des [pyrgeomètres](#) et des pyranomètres. Pour une brève présentation de ces stations SURFRAD cliquez [ici](#). Quant aux données pour le CO₂, un autre site de la NOAA nous les donne, voyez par exemple [ici](#) pour la célèbre station de Mauna Loa à Hawaii.

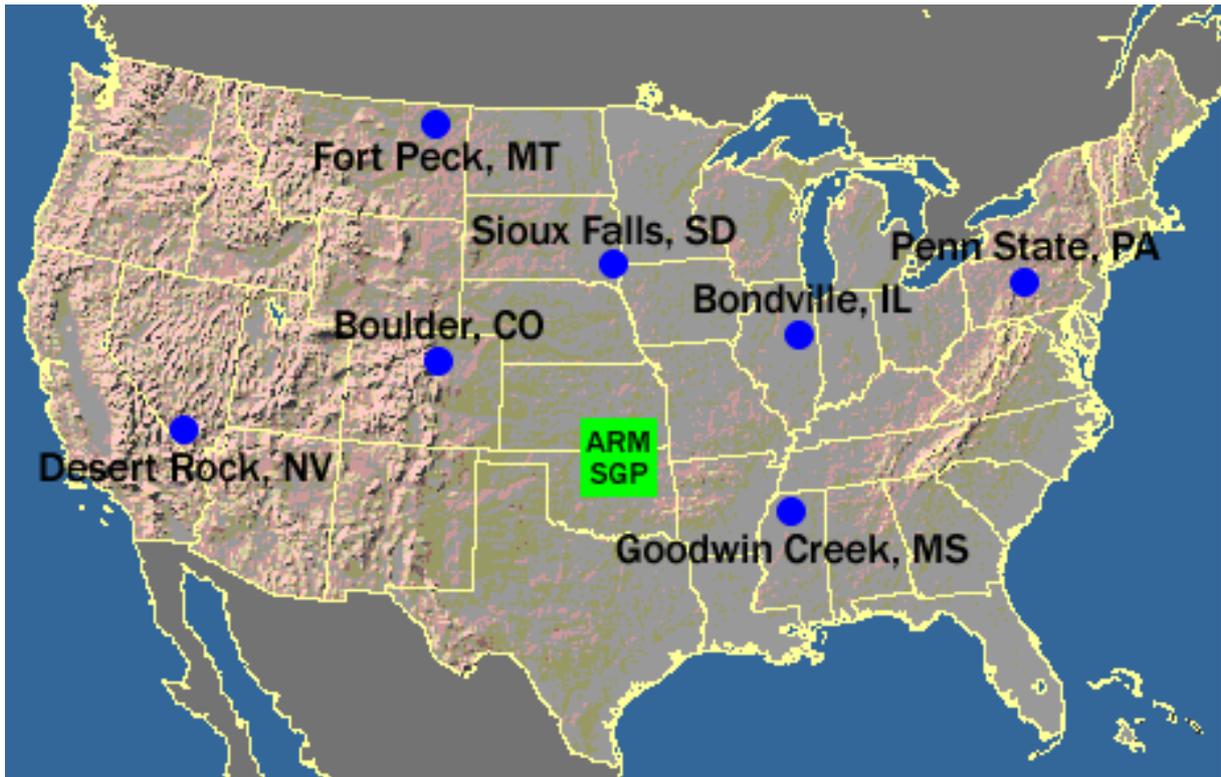


Figure 1. Les stations SURFRAD de la NOAA aux Etats-Unis.

6.3. Les données SURFRAD de Goodwin Creek

Mais revenons à la théorie de l'effet de serre radiatif et **confrontons-la aux observations**. Toute théorie scientifique doit être confrontée aux observations! C'est la base de la science. Voyons ce que nous disent les données des stations SURFRAD. Choisissons par exemple la station météo de **Goodwin Creek, MS** (Figure 1) et prenons deux années espacées de 15 ans: l'année 2000 et l'année 2015. Pour ces deux années, consultons les valeurs moyennes de température, de CO₂ et de radiations infra-rouges venant du ciel (downwelling IR). C'est en effet ces trois paramètres qui sont directement concernés par la théorie de l'effet de serre radiatif (Table 1).

	2000	2015
Température moyenne (°C)	16,72 ± 8,73	16,71 ± 8,09
Downwelling IR (W/m ²)	347,04 ± 45,87	355,25 ± 43,88
Taux moyen de CO ₂ (ppm)	369,55 ± 0,61	400,83 ± 0,91

Table 1. Température moyenne et infra-rouges venant du ciel (downwelling IR) pour la station météo de Goodwin Creek aux USA. Le taux moyen de CO₂ atmosphérique est celui de Mauna Loa. Données issues du réseau SURFRAD (température et IR) et de la [GMD](#) (CO₂) de la NOAA. Les moyennes sont accompagnées de leur écart-type (n=12). Les taux de CO₂ pour 2000 sont significativement différents de ceux de 2015.

En consultant la Table 1 nous voyons que le taux de CO₂ à Mauna Loa a augmenté de manière très significative entre 2000 et 2015 : de 369 ppm nous sommes passés à 400 ppm, soit une augmentation de 31 ppm (les données de la NOAA obtenues à Mauna Loa sont valables pour tout l'hémisphère nord). La théorie de l'effet de serre radiatif prévoit donc un réchauffement de la basse atmosphère. **Cependant, la théorie est en contradiction avec les observations!** En effet, non seulement la température moyenne de Goodwin Creek n'a pas augmenté en 15 ans (de 16,72°C en 2000 on est passé à 16,71°C en 2015) mais la quantité d'infra-rouges venant du ciel est également restée stable : de 347 ± 47 W/m² on est passé à 355 ± 43 W/m². Ces deux dernières valeurs ne sont pas significativement différentes comme l'indiquent les écart-types de ces mesures. Comment expliquer ceci? **La théorie de l'effet de serre radiatif ne fonctionnerait donc pas à Goodwin Creek?**

Une alternative serait que le taux de CO₂ donné dans la Table 1 ne corresponde pas à celui de Goodwin Creek. En effet, ce sont des valeurs obtenues à Hawaii, à la station Mauna Loa. Cependant, il existe une autre station de mesure du CO₂ beaucoup plus proche de Goodwin Creek : la station de [Niwot Ridge](#), dans le Colorado. Les données CO₂ de cette station sont en accès libre [ici](#). Et lorsque l'on consulte ces données on constate que les taux moyens de CO₂ atmosphérique pour 2000 et 2015 à Niwot Ridge sont très proches de ceux de la Table 1. Il ne s'agirait donc pas d'un biais de mesure pour le CO₂. Non, la théorie radiative de l'effet de serre ne fonctionne vraiment pas à Goodwin Creek!

6.3. Les données SURFRAD de Desert Rock comparées à celles de Goodwin Creek

Vous voulez d'autres exemples? En voici un autre. Prenons maintenant deux stations SURFRAD localisées plus ou moins à la même latitude : la station de [Desert Rock, NV](#) et la station de [Goodwin Creek, MS](#) (Figure 1). Ces stations reçoivent donc le même ensoleillement annuel. Consultons les données de 2017 (Table 2). Au cours de cette année le taux de CO₂ était le même pour ces deux stations, soit 406,55 ppm (données NOAA pour Mauna Loa). Mais il n'en va pas de même pour les autres gaz à effet de serre, et surtout pour le principal, l'eau.

	Desert Rock	Goodwin Creek
Température moyenne (°C)	19,37 ± 8,52	17,42 ± 6,47
Downwelling IR (w/m ²)	317,06 ± 45,59	353,83 ± 37,80
Humidité relative moyenne (%)	4,07 ± 1,67	9,95 ± 4,05

Table 2. Température moyenne, infra-rouges issus du ciel (downwelling IR) et humidité relative moyenne pour les stations SURFRAD de Desert Rock et de Goodwin Creek au cours de l'année 2017. Les moyennes sont accompagnées de leur écart-type (n=12).

En effet, l'analyse de la Table 2 nous montre que l'humidité relative est plus de deux fois plus élevée à Goodwin Creek qu'à Desert Rock (4,07% vs 9,95%). Il y a donc beaucoup plus d'eau atmosphérique à Goodwin Creek qu'à Desert Rock. Mais **comme l'eau est un puissant gaz à effet de serre selon le GIEC**, la théorie de l'effet de serre radiatif prévoit donc qu'il doit faire plus chaud à Goodwin Creek par rapport à Desert Rock. Et bien il n'en est rien : la température moyenne annuelle de Goodwin Creek est plus basse (17,42°C) que celle de Desert Rock (19,37°C). Les personnes attentives qui consultent les écarts-types des moyennes diraient même que ces deux sites présentent des températures moyennes annuelles qui ne diffèrent pas significativement. Et pourtant, il y a significativement plus d'eau, un puissant gaz à effet de serre, à Goodwin Creek par rapport à Desert Rock. Encore une fois, la théorie de l'effet de serre est contredite par les observations.

6.4. Quelques faits supplémentaires

Si vous croyez encore à la théorie de l'effet de serre après avoir lu les lignes qui précèdent vous pourriez peut-être vous dire que, comme pour toutes les autres théories scientifiques, la théorie de l'effet de serre radiatif reste valable dans la majorité des cas et souffrirait simplement de quelques exceptions. **Cependant, la théorie de l'effet de serre radiatif comporte tellement d'exceptions que l'on en vient à se demander si elle fonctionne vraiment.** Par exemple, [l'article précédent publié sur SCE](#) vous donne d'autres cas où la théorie ne fonctionne pas. Il s'agit de vastes zones de millions de km² situées en plein centre de tous les continents, aussi bien en Europe, en Asie, en Australie et en Amérique.

Comme nous vous le répétons sur www.science-climat-energie.be depuis longtemps, la théorie de l'effet de serre est également basée sur des concepts théoriques boiteux : transferts de chaleur uniquement radiatifs, phénomène de backradiation, gaz considérés comme des corps noirs, etc. Les problèmes théoriques concernent notamment la loi de Stefan-Boltzmann (voir [ici](#)) et la réémission d'infra-rouges par le CO₂ (voir [ici](#)).

Pour finir, notons qu'**en 2018 plusieurs physiciens et chimistes ont clairement remis en cause la théorie de l'effet de serre dans des publications relues par les pairs. Quelques-unes de ces publications sont listées ci-dessous.** Ces publications n'ont pas été réfutées et nous pouvons parier que le GIEC ne les mentionnera pas.

- Allmendinger T (2018) [The Thermal Radiation of the Atmosphere and Its Role in the So-Called Greenhouse Effect](#). Atmospheric and Climate Sciences, 2018, 8, 212-234.
- Fleming RJ (2018) An updated review about carbon dioxide and climate change. Environmental Earth Sciences, March 2018, 77:262.
- Davis WJ et al (2018) The Antarctic Centennial Oscillation: A Natural Paleoclimate Cycle in the Southern Hemisphere That Influences Global Temperature. Climate 2018, 6(1), 3.
- Holmes RI (2018) Thermal Enhancement on Planetary Bodies and the Relevance of the Molar Mass Version of the Ideal Gas Law to the Null Hypothesis of Climate Change. Earth Sciences 2018; 7(3): 107-123
- Antero Ollila, (2019) « Challenging the scientific basis of the Paris climate agreement », International Journal of Climate Change Strategies and Management, Vol. 11 Issue: 1, pp.18-34.

– Smirnov BM (2018) Collision and radiative processes in emission of atmospheric carbon dioxide. Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 51, Number 21.

6.5. Conclusions

- Tout comme Carl Brehmer, dans son article publié dans PSI, nous avons bel et bien identifié des **incohérences entre des observations de terrain et la théorie de l'effet de serre radiatif**.
- **La théorie de l'effet de serre radiatif n'est donc pas universelle** : elle ne fonctionne pas partout sur la planète. Ce sont les observations de la NOAA qui nous le démontrent. Les autres lois de la physique fonctionnent pourtant partout sur la planète : les corps chutent en suivant les lois de la gravitation universelle aussi bien en Australie qu'en Asie, les lois de la thermodynamique sont partout respectées, en électricité la loi d'ohm est valable en Europe et en Amérique, quant au néodarwinisme il est d'application pour toutes les populations animales de la planète. Il n'y a donc que la théorie de l'effet de serre qui n'est pas universelle... La **méthode scientifique** demande qu'une théorie qui ne rend pas compte de toutes les observations soit invalidée. Qu'attend-on pour passer à autre chose?

Références

[1] Carl Brehmer (2017) [SURFRAD Data Falsifies the "Greenhouse Effect" Hypothesis](https://principia-scientific.org/surfrad-data-falsifies-the-greenhouse-effect-hypothesis/). Publié sur le site web de la Principia Scientific International à l'adresse suivante : <https://principia-scientific.org/surfrad-data-falsifies-the-greenhouse-effect-hypothesis/>

[2] L'organisation anglaise Principia Scientific International est une Community Interest Company (CIC), ce qui peut être traduit par une « compagnie à intérêt communautaire ». Les CIC ont été établies au Royaume-Uni en 2005 et fonctionnent comme les sociétés traditionnelles. Cependant, les CIC sont constituées pour toute fin qui a des retombées sur la collectivité : la poursuite d'un objectif social est alliée à des activités commerciales. La CIC fonctionne avant tout pour le bénéfice de la collectivité plutôt que pour celui de leurs membres. Le but principal de la société PSI, clairement énoncé sur son site web, est de promouvoir une meilleure science épurée de toute influence politique.

7. Le réchauffement climatique d'origine anthropique

Mis en ligne SCE : 25.01.2019

Le climat peut changer, comme il l'a toujours fait et continuera à le faire sous l'action de variables naturelles. Les activités humaines peuvent-elles avoir une influence comme le prétend la théorie du réchauffement climatique d'origine anthropique ? Cette théorie est basée sur l'existence d'un hypothétique effet de serre défini comme un phénomène radiatif causé par des gaz tels la vapeur d'eau ou le CO₂ qui absorbent une fraction du rayonnement infrarouge émis par la Terre et le réémettent ensuite dans toutes les directions et notamment vers la surface terrestre dont la température serait, de ce fait, plus élevée qu'en l'absence de gaz absorbant l'infrarouge. L'effet de serre résulterait donc essentiellement de l'émission par les molécules de CO₂ d'un rayonnement de fluorescence dans le domaine infrarouge [1]. Cette définition est claire et scientifiquement valable car conforme au principe de réfutabilité défini par Karl Popper. Nous l'examinerons à la lumière de théories physiques bien établies et de faits expérimentaux connus.

7.1. Le CO₂ dans les basses couches atmosphériques

Oublions tout d'abord le climat et envisageons une boîte opaque contenant, à l'abri de tout rayonnement extérieur, une certaine quantité d'air sec à 15°C et à la pression d'une atmosphère. Dans cette boîte 78 % des molécules sont des molécules d'azote N₂ et 21 % sont des molécules d'oxygène O₂. Le troisième constituant par ordre d'abondance est l'argon Ar (environ 1 % des

molécules). Les molécules de CO_2 n'interviennent que pour environ 0,04 %. Toutes ces molécules n'ont pratiquement pas d'interaction entre elles, si ce n'est qu'étant en constante agitation elles entrent en collisions les unes avec les autres lors de chocs dont la plupart sont élastiques (avec conservation de l'énergie cinétique).

7.1a) Energie de translation

La théorie cinétique des gaz permet de calculer qu'à la température de 15°C les molécules de l'air sont animées de vitesses de translation de l'ordre de 500 m par seconde et qu'à la pression d'une atmosphère, chacune subit plusieurs milliards de collisions par seconde. Ces molécules présentent une large distribution de vitesses qui est fonction de la température en accord avec la loi de Maxwell-Boltzmann (fig.1). L'énergie cinétique moyenne des molécules biatomiques N_2 et O_2 peut être calculée et vaut $E_m = 5/2 k T$ (où k est la constante de Boltzmann et T la température en Kelvin).

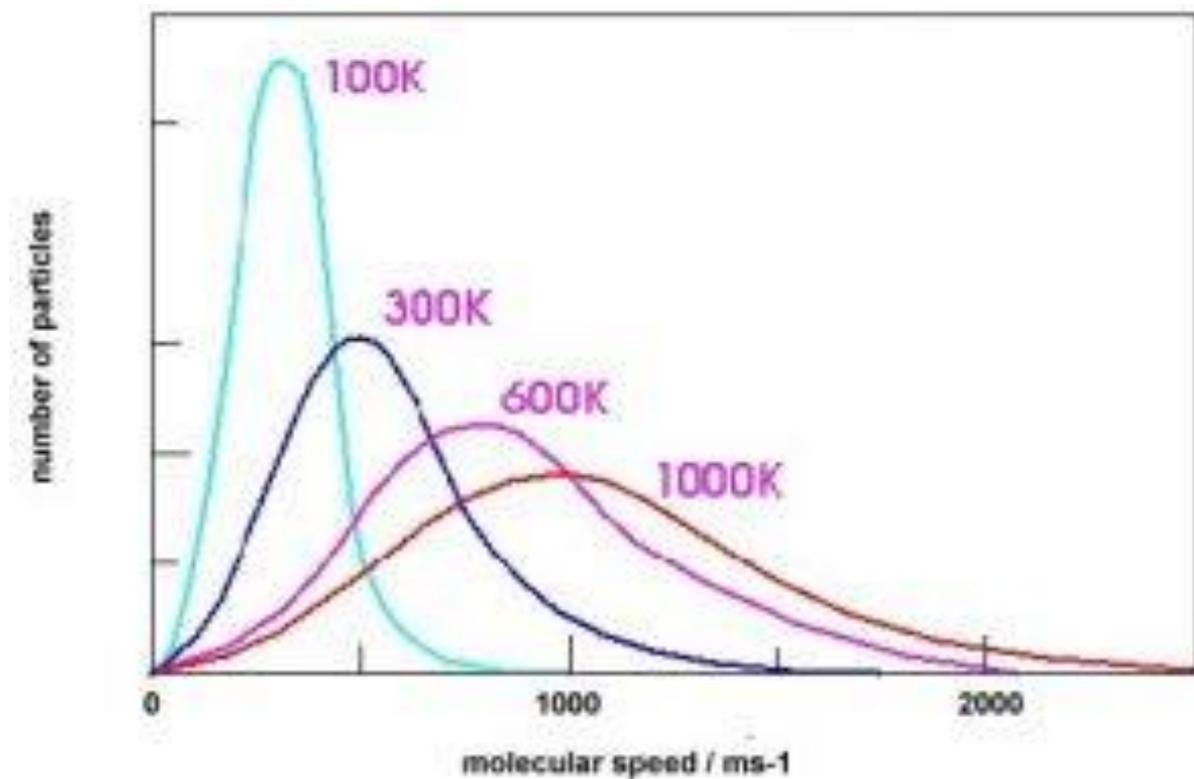


Fig. 1 Loi de distribution des vitesses de Maxwell-Boltzmann

7.1b) Energie de vibration

Les molécules de l'air ne sont pas seulement animées de mouvements de translation. Si elles disposent de l'énergie suffisante elles peuvent aussi entrer en vibration avec variation rapide et périodique des longueurs ou des angles de leurs liaisons interatomiques. Les molécules biatomiques N_2 et O_2 sont très rigides et ne vibrent pratiquement pas à 15°C . Par contre, les molécules triatomiques de CO_2 , linéaires à l'état fondamental $\text{O}=\text{C}=\text{O}$, peuvent se déformer facilement et devenir anguleuses en vibrant. A chaque fréquence de vibration est associée une énergie et la théorie quantique nous enseigne que toutes les fréquences de vibration ne sont pas permises. Seuls certains niveaux énergétiques existent dont l'énergie peut être déterminée expérimentalement par spectroscopie d'absorption dans le domaine infrarouge ou Raman. Ainsi l'énergie associée à la

vibration de déformation du CO₂ peut être calculée à partir de la bande d'absorption détectée à 15 μm dans le spectre infrarouge de la molécule grâce à la relation $E_v = hc / \lambda$ (où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde du rayonnement absorbé, dans ce cas 15 μm). Cette valeur n'est que de 30 % supérieure à E_m l'énergie cinétique moyenne des molécules environnantes N₂ et O₂ mentionnée dans le paragraphe précédent. Or, beaucoup de ces molécules ont une vitesse supérieure à la moyenne comme l'indique la fig. 1 (la vitesse moyenne est très proche du maximum de la courbe de distribution des vitesses) et donc aussi une énergie cinétique E_c supérieure à la moyenne.

7.1c) Conversion d'énergie de translation en énergie de vibration et inversement

En l'absence d'une source extérieure de rayonnement l'énergie nécessaire pour exciter la vibration de CO₂ ne peut provenir que de l'agitation thermique du milieu ambiant. La quantification de l'énergie n'intervient pas au niveau des mouvements de translation et les énergies cinétiques de translation $E_c = mv^2/2$ présentent une large distribution continue semblable à celle illustrée sur la fig. 1. La fonction mathématique correspondant à ces courbes permet de calculer qu'à 15°C plus de 40 % des molécules N₂ et O₂ ont une énergie cinétique E_c supérieure à l'énergie E_v du plus bas niveau de vibration des molécules de CO₂. Elles peuvent donc l'amener à ce niveau lors d'une collision inélastique (sans conservation de l'énergie cinétique). Dans ces conditions il y a conversion d'une fraction Δ de l'énergie cinétique de translation des molécules N₂ ou O₂ en énergie de vibration d'une fraction des molécules de CO₂ :



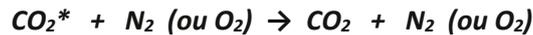
Ce ne sont évidemment pas toujours les mêmes molécules de CO₂ qui sont en état de vibration car cette conversion est réversible et les molécules se désactivent endéans quelques millisecondes pour retourner à l'état fondamental lors de nouveaux chocs avec les molécules environnantes qui, de ce fait, acquièrent temporairement un surcroît d'énergie cinétique de translation :



Il existe donc un équilibre dynamique associé aux réactions (1) et (2) qui sont l'inverse l'une de l'autre. Cet équilibre ne dépend que de la température et de la pression (par le biais de la distribution des énergies et du nombre de chocs entre molécules). Quoique ce ne soient pas toujours les mêmes molécules de CO₂ qui vibrent, la proportion de molécules en état de vibration reste constante à une température et une pression déterminées (environ 40 % à 15°C à la pression d'une atmosphère). Cet équilibre ne sera pas modifié si, en plus, certaines molécules de CO₂ sont excitées par absorption d'une fraction du rayonnement infrarouge émis par la Terre. On peut donc en conclure que la désactivation des molécules de CO₂ ne se fera pas avec émission d'un rayonnement. La raison en est qu'à des pressions voisines d'une atmosphère la fluorescence ne pourrait entrer en compétition avec la désactivation par collisions que pour des états excités de très courte durée de vie (10^{-9} à 10^{-7} s) qui pourraient se désactiver par fluorescence avant qu'un nombre suffisant de collisions avec les molécules environnantes n'intervienne. Or, la durée de vie du plus bas état excité de CO₂ étant 0,64 s [2] des millions de collisions interviendront avant que l'émission d'un rayonnement ne puisse avoir lieu. L'hypothèse de l'effet de serre est donc sans fondement théorique.

Note complémentaire basée sur des résultats expérimentaux_

La conversion d'énergie de vibration en énergie de translation ($V \rightarrow T$) et d'énergie de translation en énergie de vibration ($T \rightarrow V$) comme dans les réactions (1) et (2) est un phénomène bien connu dont l'étude s'est développée grâce aux progrès de la technologie laser permettant d'obtenir sélectivement différents états de vibration [3]. En particulier, la conversion d'énergie de vibration en énergie de translation ($V \rightarrow T$) a été étudiée dans le cas de molécules de CO_2 excitées par laser au plus bas état de vibration. Les constantes de vitesse de la réaction :



ont été mesurées entre 300 et 140 K [4]. Elles sont de l'ordre de 10^5 fois inférieures à celles prévues sur la base du nombre de collisions (plusieurs milliards par seconde) car elles résultent seulement des collisions inélastiques qui ne représentent que 0,001 % du nombre total de collisions. D'autre part, la conversion d'énergie de translation en énergie de vibration ($T \rightarrow V$) a aussi été étudiée dans le cas du CO_2 . A des altitudes de l'ordre de 100 km l'énergie cinétique de translation d'atomes d'oxygène peut être transférée à des molécules de CO_2 et convertie en énergie de vibration [5] :



Le phénomène a été mis en évidence en détectant la fluorescence (désactivation radiative) des molécules de CO_2 avec émission d'un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 15 \mu m$:



A ces altitudes la pression atmosphérique est si faible que le nombre total de collisions entre molécules n'est plus que de l'ordre de 1000 par seconde. Une fraction des molécules de CO_2 excitées peut alors se désactiver avec émission d'un rayonnement avant qu'une collision inélastique ne se produise avec les molécules environnantes. Ce n'est pas le cas dans les basses couches atmosphériques où l'émission d'un rayonnement de fluorescence du CO_2 n'a jamais été observée. L'hypothèse de l'effet de serre invoquée par les partisans d'un réchauffement climatique d'origine anthropique n'a donc aucune justification ni théorique, ni expérimentale.

7.2. Le bilan énergétique de la Terre

Pour estimer la fraction du rayonnement thermique de la Terre qui pourrait être absorbée par le CO_2 il faut envisager le bilan énergétique de la Terre qui est basé sur l'idée que pour maintenir une température constante la Terre doit dissiper par différents mécanismes l'énergie reçue du Soleil. Le modèle le plus souvent cité est celui proposé par la NASA (fig. 2).

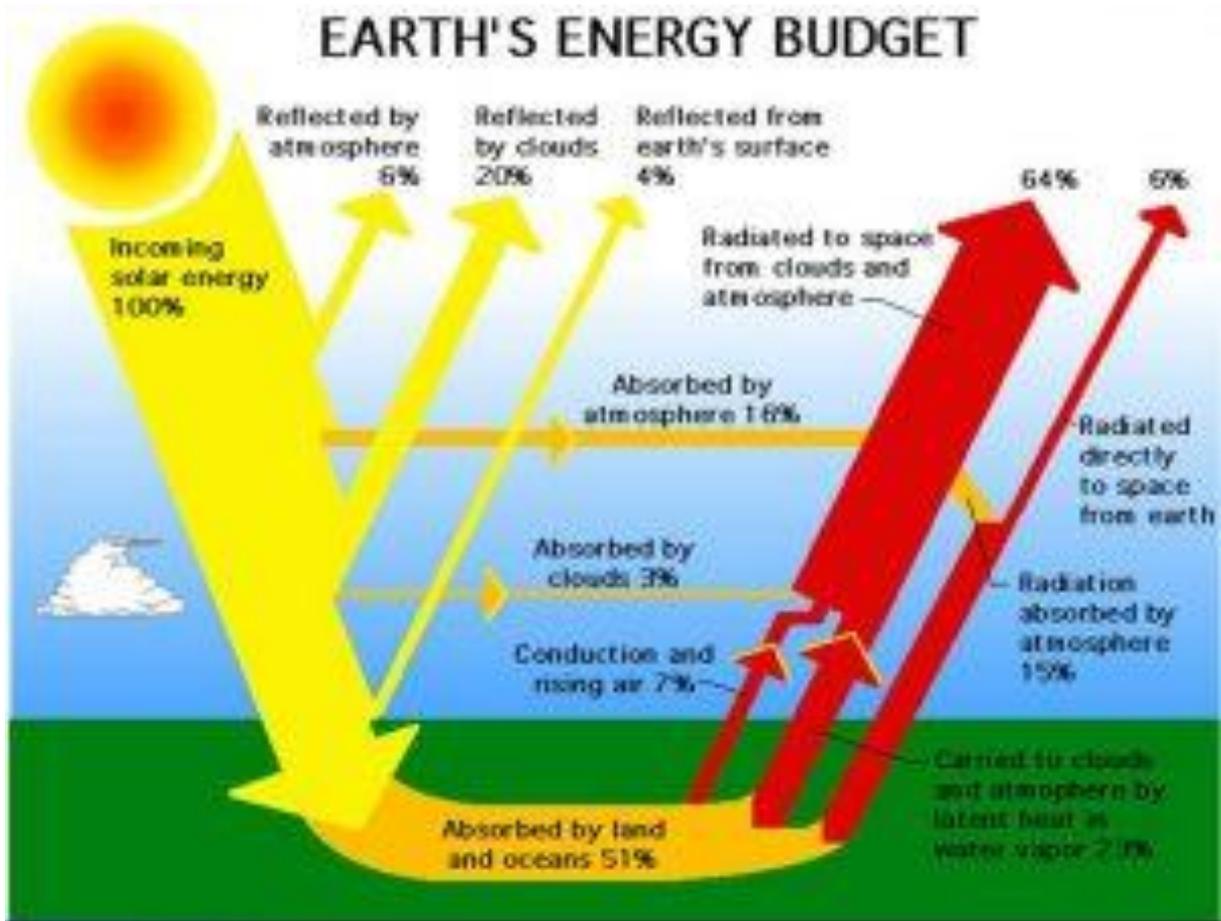


Fig. 2 Bilan énergétique de la Terre selon la NASA

D'après ce bilan 30 % de l'énergie reçue par la Terre au sommet de l'atmosphère seraient réfléchis par les nuages, l'atmosphère et la surface terrestre en accord avec un albédo de 0,3. L'atmosphère et les nuages absorberaient en plus 19 % du rayonnement solaire transmis et finalement 51 % seulement seraient absorbés par les continents et les océans. Cette énergie serait dissipée ensuite par trois mécanismes distincts : évaporation de l'eau des océans (23 %), convection de l'air (7 %) et rayonnement thermique (21 %). Remarquons tout d'abord que le bilan présenté sur la fig.2 ne fait apparaître aucune « back radiation » associée à un éventuel effet de serre. Une petite fraction seulement du rayonnement détecté par satellite provient directement de la surface terrestre (fine flèche rouge à droite sur la fig. 2) car émise dans la zone de transparence atmosphérique entre 8 à 13 μm (fig.3). En intégrant l'équation de Planck pour un corps noir à 15°C dans le domaine de 8 à 13 μm on calcule que 30 % du rayonnement thermique de la Terre est émis dans cette zone de transparence atmosphérique soit env. 6 % de l'énergie totale reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère terrestre. Le reste du rayonnement thermique émis par la Terre est absorbé par divers constituants atmosphériques (fig. 3) principalement la vapeur d'eau mais aussi le CO_2 . Quel que soit le mécanisme de dissipation de l'énergie au niveau de la surface terrestre, en altitude toute cette énergie doit être convertie en rayonnement car c'est le seul mécanisme permettant de l'évacuer hors du système terrestre (large flèche rouge sur la fig.2)

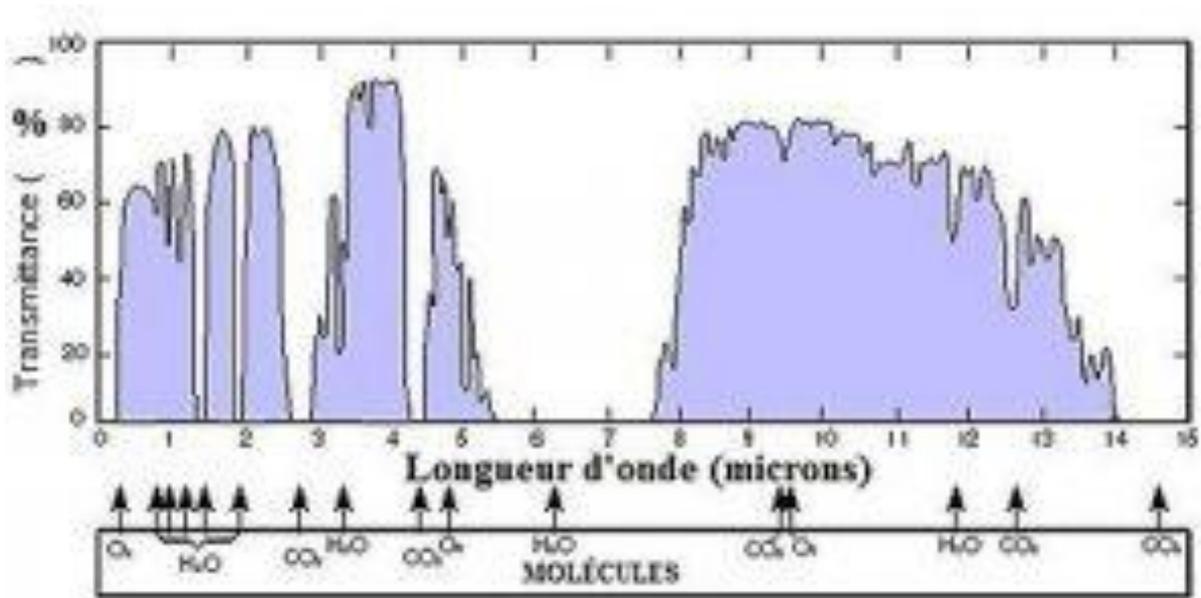


Fig. 3 Transmission du rayonnement infrarouge à travers l'atmosphère terrestre (les zones de transparence apparaissent en bleu, notamment entre 8 à 13 μm)

Les proportions mentionnées dans le bilan énergétique de la NASA ne résultent le plus souvent que d'estimations et il subsiste une grande incertitude concernant l'importance relative des différents mécanismes de dissipation par la Terre de l'énergie reçue du Soleil. Ainsi Sorokhtin et collaborateurs [5] considèrent que la convection serait le mécanisme prépondérant intervenant pour 34 % tandis que le rayonnement thermique interviendrait seulement pour 4 % et l'évaporation de l'eau des océans pour 13 %.

Au niveau de l'orbite terrestre chaque mètre carré placé perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit, en moyenne sur l'année, une puissance de 1368 W, c'est la « constante solaire ». La valeur moyenne de 342 W m^{-2} au sommet de l'atmosphère est basée sur l'idée que chaque mètre carré de la surface terrestre reçoit en continu le quart de 1368 W car la Terre n'intercepte le rayonnement solaire que sur une surface égale à celle d'un disque de même rayon. Cette valeur n'est pas mesurée mais calculée en admettant une uniforme de l'énergie sur toute la surface terrestre sans tenir compte ni d'un hémisphère non éclairé, ni d'une variation en fonction de la latitude. De ce fait, elle est certainement surestimée. De plus, si la distribution de l'énergie était uniforme il n'y aurait ni saisons, ni courants marins ou aériens qui sont cependant des éléments déterminants du climat. Néanmoins, cette valeur approximative est généralement adoptée car une valeur correcte tenant compte de la vitesse de rotation de la Terre et de l'inclinaison de son axe de rotation donnerait lieu à des difficultés de calcul insurmontables. Ensuite, en attribuant à la Terre un albédo de 0,3 impliquant non seulement l'énergie réfléchiée par la surface terrestre et par l'atmosphère mais aussi et principalement par les nuages, le rayonnement effectivement reçu par la surface terrestre serait réduit à 70 % de 342 W m^{-2} soit environ 240 W m^{-2} . En haute altitude les satellites détectent effectivement un rayonnement moyen de 240 W m^{-2} avec une différence de l'ordre de 50 W m^{-2} entre pôles et équateur. Ce rayonnement moyen provient essentiellement des couches supérieures de l'atmosphère à des températures beaucoup plus basses que celle de la surface terrestre et on ne peut en déduire, sur base de la formule de Stefan-Boltzmann, que la surface terrestre devrait avoir la température de -18°C (voir [ici](#)).

Si on considère la Terre comme un corps noir à 15°C l'équation de Planck (voir [ici](#)) permet de calculer que 95 % du spectre d'émission sera compris entre 5 et 40 μm et la loi de Wien prévoit que le rayonnement émis devrait présenter un maximum d'intensité à 10 μm . Le CO_2 présente une bande d'absorption dans le domaine du rayonnement thermique de la Terre. Elle est présentée sur la fig. 4 pour une teneur en CO_2 de 357 ppm (0,0357 %) en présence de 2,6 % en vapeur d'eau, conditions correspondant à la composition atmosphérique en 1993.

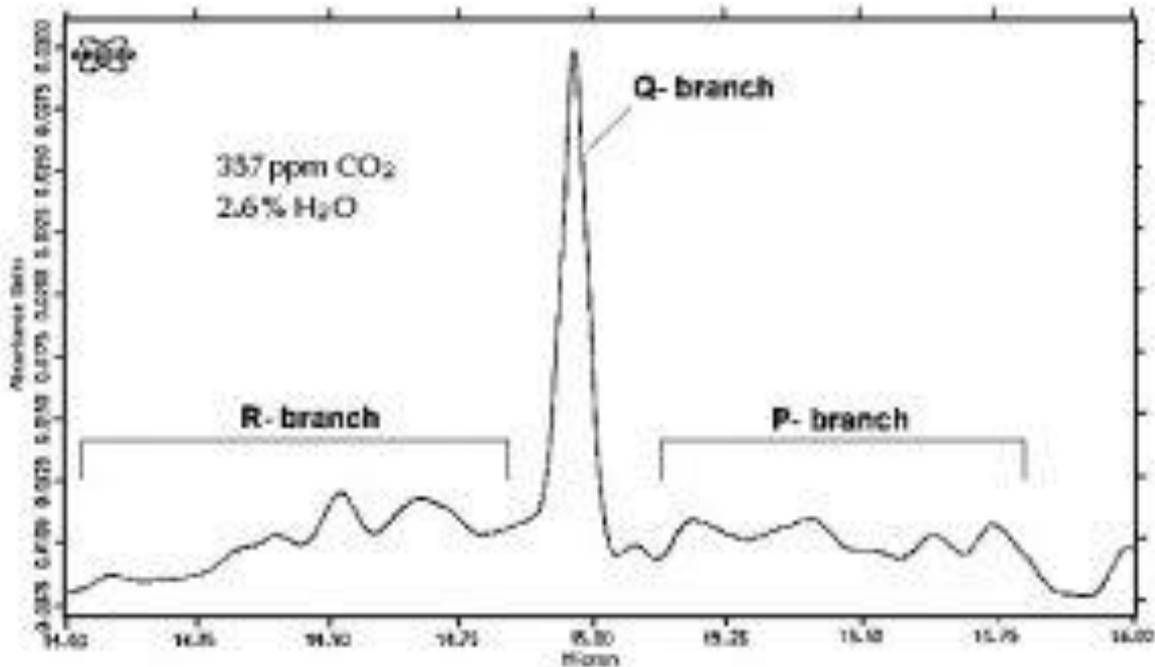


Fig. 4 Spectre d'absorption infrarouge du CO_2

La bande d'absorption centrée à 15 μm permet l'excitation de la molécule à son plus bas niveau de vibration impliquant une déformation angulaire. Les branches P et R sont dues à l'existence de sous-niveaux de rotation pour chaque niveau de vibration (fondamental et excité). En intégrant l'équation de Planck de 14 à 16 μm , domaine d'absorption du CO_2 , on calcule que 9,3 % du rayonnement thermique de la Terre sont émis dans cet intervalle de longueurs d'onde. En fin de compte le CO_2 , quel que soit son coefficient d'absorption, ne pourrait absorber au maximum que 9,3 % du rayonnement thermique de la Terre (représentant, selon la NASA, 21 % de l'énergie totale reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère) soit un peu moins de 2 % de 342 W m^{-2} donc environ 7 W m^{-2} .

Les molécules de CO_2 excitées à l'état de vibration par absorption d'une fraction du rayonnement thermique de la Terre se désactivent endéans quelques microsecondes par collisions avec les molécules environnantes, principalement N_2 et O_2 . Dans ces conditions, il y a conversion de l'énergie de vibration du CO_2 en énergie cinétique de translation des molécules N_2 ou O_2 selon la réaction (2) mentionnée au paragraphe 1c. Bien que l'absorption du rayonnement thermique de la Terre entre 14 et 16 μm soit sélective par les molécules de CO_2 cet excédent d'énergie se répartira sur l'ensemble des molécules environnantes suite aux multiples collisions. Au total, selon les auteurs 0,4 % ou 2 % de l'énergie reçue du Soleil au sommet de l'atmosphère terrestre seront convertis en mouvements de convection au détriment de l'intensité du rayonnement thermique dont une fraction est absorbée par le CO_2 . La présence de CO_2 dans l'atmosphère ne modifie donc pas le bilan énergétique global de la Terre mais seulement l'importance relative des différents mécanismes de

dissipation de l'énergie reçue du Soleil. Cela ne peut avoir aucune influence sur la température « globale moyenne » de la surface terrestre.

7.3. Influence du CO₂

En l'absence d'effet de serre la conversion de l'énergie de vibration du CO₂ en énergie cinétique de translation des molécules de N₂ et O₂ pourrait-elle avoir un effet sur la température des basses couches atmosphériques ? Pour estimer l'importance d'un tel effet il faudrait connaître le volume d'air dans lequel cette énergie sera dissipée. En utilisant la relation de Beer-Lambert avec I_0 = intensité incidente et I = intensité transmise :

$$\log I_0/I = A C L$$

et en y introduisant des valeurs $A = 20,2 \text{ m}^2/\text{mol}$ pour le coefficient d'absorption molaire du CO₂ [7] et $C = 1,78 \cdot 10^{-2} \text{ mol m}^{-3}$ (pour 0,04 % de CO₂ en volume) on trouve que $\log I_0/I$ vaut 3 (99,9 % d'absorption) pour une épaisseur atmosphérique $L = 8 \text{ m}$. Connaissant le nombre de molécules dans une colonne d'air de 8 m de hauteur et de 8 m³ de volume dans lequel seront dissipés 1,3 ou 7 W (selon les auteurs) on trouve que l'énergie cinétique moyenne E_m des molécules N₂ et O₂, calculée au paragraphe 1a, n'augmenterait en une seconde que d'environ 0,0001 %. Cette valeur ne sert qu'à fixer un ordre de grandeur car il n'y a évidemment pas d'accumulation d'énergie cinétique au cours du temps puisqu'un important courant de convection existe déjà. Le gradient de température existant déjà dans les basses couches atmosphériques ne sera donc pas affecté par la présence de CO₂.

Le coefficient d'absorption molaire utilisé correspond seulement à la branche Q, la plus importante du spectre d'absorption (fig.4). Pour les branches P et R qui présentent des coefficients d'absorption environ 10 fois moindres l'absorption de 99,9 % du rayonnement thermique de la Terre nécessiterait une épaisseur atmosphérique environ 10 fois plus importante et le transfert d'énergie se fera sur un nombre de molécules environ 10 fois plus grand avec un effet réduit proportionnellement. Notons encore que ces conclusions s'appliquent à la totalité du CO₂ présent dans l'atmosphère (0,04 %) qu'il soit d'origine naturelle ou humaine. Or, de nombreux travaux récents montrent que la teneur en CO₂ d'origine anthropique ne serait que d'environ 5 % (voir [ici](#))

7.4. Conclusion

De cet exposé on peut conclure que :

1° L'effet de serre, qui résulterait de la désactivation radiative (fluorescence) de molécules ayant absorbé une fraction du rayonnement thermique de la Terre, ne peut exister au niveau des basses couches atmosphériques.

2° Au niveau des basses couches atmosphériques, les molécules ayant absorbé une fraction du rayonnement thermique de la Terre se désactivent par collisions avec les molécules environnantes principalement N₂ et O₂.

3° La conversion d'énergie de vibration des molécules de CO₂ en énergie de translation des molécules environnantes ne modifie pas le bilan énergétique global de la Terre.

4° Le CO₂ ne peut contribuer en aucune manière à un réchauffement ni de la surface terrestre ni des basses couches atmosphériques.

5° La théorie du réchauffement climatique d'origine anthropique basée sur l'existence d'un effet de serre n'a aucune justification ni théorique ni expérimentale.

Références

[1] Le terme de fluorescence est rarement utilisé pour caractériser l'effet de serre et quelques mots d'explication peuvent être utiles. L'énergie interne d'une molécule ne varie pas de manière continue. On distingue des niveaux d'énergie électronique qui sont subdivisés en niveaux d'énergie de vibration, eux-mêmes subdivisés en niveaux d'énergie de rotation. Une molécule peut être excitée, le plus souvent par absorption d'un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde appropriée, et passer d'un niveau énergétique déterminé à un niveau d'énergie supérieure. Le phénomène inverse peut également se produire soit par émission d'un rayonnement électromagnétique appelée fluorescence, soit par transfert d'énergie aux molécules environnantes lors de collisions. En solution, la fluorescence de nombreuses molécules organiques est observée lors de transition entre niveaux d'énergie électronique mais aucun exemple n'est connu dans le cas de transitions entre niveaux d'énergie de vibration. La raison en est la compétition entre les deux mécanismes de désactivation mentionnés ci-dessus. En solution (ou en phase gazeuse à des pressions supérieures à 10 Pa) la désactivation radiative par fluorescence ne sera possible que pour des états excités de très courte durée de vie (10^{-9} à 10^{-7} s) qui peuvent se désactiver avec émission d'un rayonnement avant qu'un nombre suffisant de collisions avec les molécules environnantes n'intervienne. La fluorescence d'états excités de plus longue durée de vie ne peut être observée qu'en milieu rigide ou en phase gazeuse à des pressions si faibles que le nombre de collisions entre molécules devient insignifiant.

[2] B.M.Smirnov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 214004 (2018)

[3] G.W. Flynn, C.S. Parmenter, A.M. Wodtke, *J.Phys.Chem.* **100**, 12817 (1996)

[4] R.M. Siddles, G.J. Wilson, C.J.S.M Simpson, *Chem.Phys.* **189**, 779 (1994)

[5] K.J. Castle, K.M. Kleissas, J.M. Rhinehart, E.S. Hwang, J.A.Dodd, *J.Geophys. Research***111**, A09303 (2006)

[6] O.G. Sorokhtin, G.V. Chilingar et L.F. Khilyuk « *Global Warming and Global Cooling* » ed. Elsevier Science (2007)

[7] <https://www.john-daly.com/artifact.htm>

8. L'effet de serre et le bilan énergétique de la Terre

Mis en ligne SCE : 11.12.2020

Dans presque toutes les sciences, les notions élémentaires sont les plus difficiles et elles sont parfois mal comprises. Par la suite, elles sont souvent négligées car elles ne s'opposent pas à la publication d'articles dans des domaines spécialisés où les auteurs, à la recherche de notoriété ou de subsides, sont jugés par leurs pairs. La climatologie, science récente et pluridisciplinaire par essence, n'échappe pas à cette règle. C'est ainsi que beaucoup de climatologues, réputés tels ou simples amateurs, développent des théories dont les hypothèses sont contraires aux principes fondamentaux de la chimie et de la physique. Néanmoins, sur la base de ces théories mal étayées, des modèles informatiques sont élaborés qui conduisent, avec une précision rassurante, à des prévisions alarmantes. Dans cette note nous rappellerons d'abord quelques notions élémentaires concernant l'émission et l'absorption de rayonnements par la Terre et par les gaz atmosphériques avant de revoir d'un point de vue critique les notions généralement admises à propos de l'effet de serre et du bilan énergétique de la Terre.

8.1. Deux types de rayonnement à ne pas confondre.

8.1.1. Émission de rayonnement thermique

Tout corps solide à une température supérieure au zéro absolu émet un rayonnement qui apparaît dans le domaine visible pour des températures supérieures à 3000 K mais se limite principalement au domaine infrarouge pour des températures inférieures (fig. 1). Ce rayonnement qualifié de « thermique » se présente toujours sous forme d'un spectre continu avec une forte variation d'intensité du côté des courtes longueurs d'onde (hautes énergies), passage par un maximum à la longueur d'onde λ_{\max} qui se déplace en fonction de la température (comme indiqué sur la fig. 1) et perte progressive d'intensité du côté des grandes longueurs d'onde (faibles énergies). Il est dû à l'oscillation de dipôles électriques formés par le noyau et le nuage électronique des atomes qui, en accord avec les lois de l'électromagnétisme, émettent un rayonnement de fréquence égale à la fréquence d'oscillation.

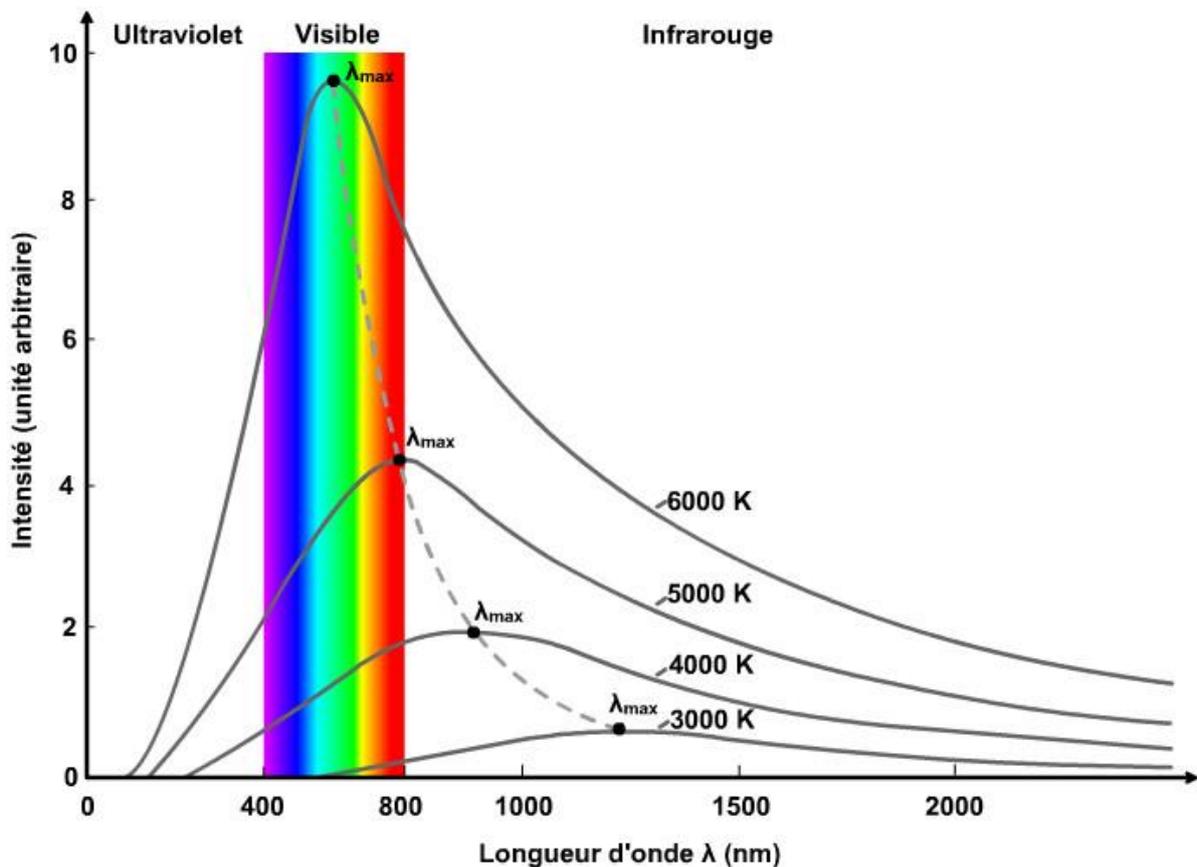


Fig. 1 Rayonnement thermique d'un corps solide à différentes températures

Dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle plusieurs physiciens ont tenté d'élaborer une théorie du « corps noir », objet idéal qui, à l'équilibre thermique, absorbe et émet toutes les longueurs d'onde d'où la qualification de « noir ». Ce n'est qu'en 1900 que Planck proposa une équation introduisant l'idée, révolutionnaire pour l'époque, qu'à chaque longueur d'onde le rayonnement ne peut être émis que sous forme de « quanta » (c'est-à-dire de petits paquets) dont l'énergie est $h\nu = hc/\lambda$ (où ν et λ sont respectivement la fréquence et la longueur d'onde du rayonnement émis, c la vitesse de la lumière et h une nouvelle constante de la nature appelée désormais constante de Planck). Cette formule, ainsi que quelques limitations à son usage, est rappelée dans un article précédent (4. Du bon usage de la formule de Stefan-Boltzmann). L'intégration de l'équation de

Planck sur tout le domaine de longueurs d'onde conduit à la formule de Stefan-Boltzmann qui lie l'émittance hémisphérique (à 180° dans toutes les directions à partir d'une surface) $E(T)$ (en $W m^{-2}$) à la température T (en K) à la puissance 4 :

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (\sigma = \text{constante de Stefan} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}) \quad (1)$$

La relation (1) fournit une mesure de l'aire sous les courbes de la fig. 1. Il faut remarquer que l'émittance hémisphérique intervenant dans la relation (1) est fondamentalement différente du flux « unidirectionnel » (ascendant ou descendant) $F(T)$ de la relation (2) qui est l'outil de travail par excellence des climatologues :

$$F(T) = \sigma T^4 \quad (2)$$

Cette dernière relation, bien que couramment utilisée, doit donc être considérée comme une approximation. La fig. 1 montre aussi que le maximum de la courbe d'émission se déplace avec la température selon la loi de Wien :

$$\lambda_{\max} = C / T \quad (C = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}) \quad (3)$$

L'intégration de l'équation de Planck permet de calculer que 95 % de l'émission thermique d'un corps noir se situe dans le domaine de longueurs d'onde s'étendant de $0,5 \cdot \lambda_{\max}$ à $4 \cdot \lambda_{\max}$

Les caractéristiques essentielles d'un rayonnement thermique sont que :

– **le spectre d'émission est continu, son intensité dépend fortement de la température mais est indépendant de la nature de l'émetteur.**

– **le rayonnement thermique d'un corps chaud peut être absorbé par un corps froid mais PAS l'inverse.**

8.1.2. Émission de rayonnement de fluorescence.

En accord avec les principes de la mécanique quantique l'énergie interne d'atomes et molécules ne peut varier d'une manière continue. Les niveaux énergétiques sont discrets : on dit qu'ils sont « quantifiés ». Un atome ou une molécule peut être excitée d'un niveau d'énergie bas à un niveau plus élevé par différents mécanismes dont l'absorption d'un rayonnement de longueur correspondant précisément à la différence d'énergie entre les niveaux concernés. Un atome ou une molécule excitée, toujours de durée de vie limitée, peut se désactiver par différents mécanismes dont l'émission d'un rayonnement de fluorescence. Il va sans dire que la loi du rayonnement de Kirchhoff ne s'applique PAS au rayonnement de fluorescence. Cette loi, spécifique des corps noirs, précise qu'à l'équilibre thermique leur absorptivité doit être égale à leur émissivité.

Les caractéristiques essentielles d'un rayonnement de fluorescence sont que :

– **le spectre d'émission est discontinu, constitué de raies ou de bandes. Si la fluorescence est le seul mécanisme de désactivation, son intensité ne dépend PAS de la température et la relation de**

Stefan-Boltzmann (1) n'est PAS d'application. Le spectre de fluorescence dépend fortement de la nature de l'atome ou de la molécule et peut même servir à l'identifier.

– le rayonnement de fluorescence d'un corps froid peut être absorbé par un corps chaud sans violer le second principe de la thermodynamique car un rayonnement n'est PAS de la chaleur.

8.1.3. Absorption de rayonnement thermique.

Le rayonnement thermique d'un corps noir, par exemple le Soleil, peut être absorbé par un autre corps noir plus froid comme la Terre mais l'inverse n'est PAS possible. Par contre, certaines longueurs d'onde du rayonnement thermique d'un corps noir peuvent être absorbées sélectivement par des molécules individuelles à n'importe quelle température si une transition vers un niveau d'énergie plus élevée est possible. C'est le cas, par exemple, pour le rayonnement thermique du Soleil. La fig. 2 montre qu'au sommet de l'atmosphère le rayonnement thermique du Soleil correspond assez bien à celui calculé par l'équation de Planck pour un corps noir à 5250 °C avec un maximum à 500 nm. Comme mentionné ci-dessus, 95 % de l'émission se situe dans le domaine de longueurs d'onde s'étendant de 250 nm à 2000 nm (2 µm). Au niveau de la mer l'intensité du rayonnement est réduite de **20 %** car une fraction est absorbée par les gaz atmosphériques (essentiellement par la vapeur d'eau) dans les longueurs d'onde de 800 à 3000 nm (de 0,8 à 3 µm, modes de vibration de H₂O apparaissant sur la fig. 6).

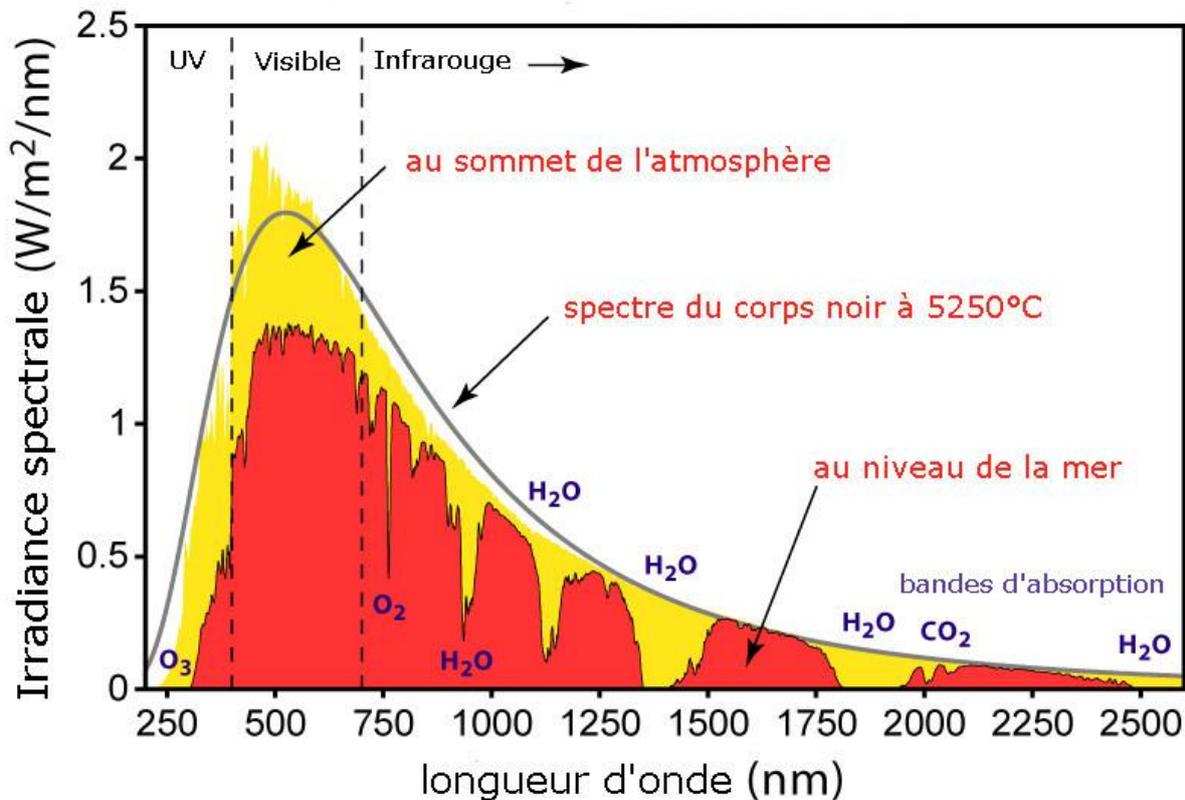


Fig. 2 Rayonnement thermique du Soleil

Le même type de phénomène intervient si on considère la Terre comme un corps noir à 288 K (15° C). La loi de Wien prévoit que le rayonnement émis devrait présenter un maximum d'intensité à 10 µm et l'équation de Planck permet de calculer que 95 % du spectre d'émission sera compris entre 5

et 40 μm . Une fraction de ce rayonnement thermique peut être absorbée principalement par la vapeur d'eau et, dans une moindre mesure, par le CO_2 (voir paragraphes 2.2 et 2.3 ci-dessous).

8.2. Absorption et émission de rayonnement par les gaz atmosphériques.

8.2.1. Niveaux d'énergie.

Dans l'atmosphère terrestre 78 % des molécules sont des molécules d'azote N_2 et 21 % sont des molécules d'oxygène O_2 . Le troisième constituant par ordre d'abondance est l'argon Ar (environ 1 % des molécules). Les molécules de CO_2 n'interviennent que pour environ 0,04 %. L'énergie totale de ces molécules est la somme de leur énergie de translation d'une part et de leurs énergies électronique, de vibration et de rotation d'autre part. L'énergie de translation n'est PAS quantifiée. Elle peut donc varier de manière continue dans une gamme de valeurs qui dépend de la température et qui obéit à la fonction de distribution des vitesses de Maxwell-Boltzmann (voir fig.3).

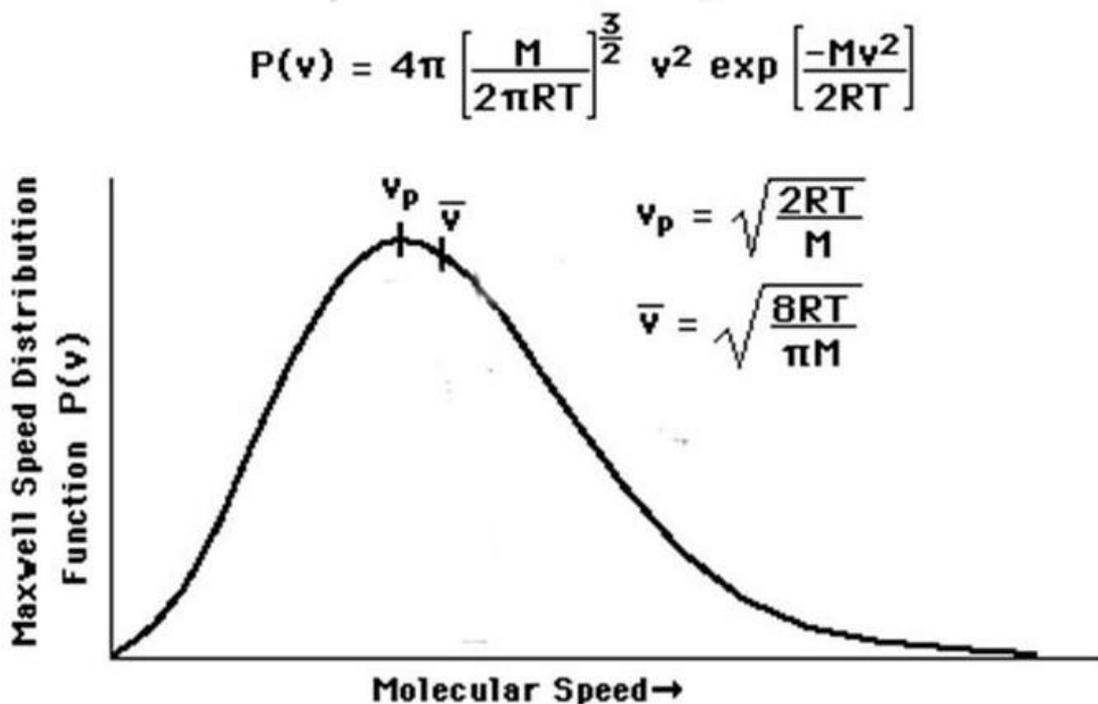


Fig.3 Distribution des vitesses de Maxwell-Boltzmann (Probabilité de trouver une molécule de vitesse V à une température T , v_p = vitesse la plus probable, \bar{v} = vitesse moyenne).

La théorie cinétique des gaz permet de calculer qu'à la température de 15°C les molécules de l'air sont animées de vitesses de l'ordre de 500 m par seconde et qu'à cette température et à la pression d'une atmosphère, chacune subit plusieurs milliards de collisions par seconde.

Les niveaux d'énergie électronique, de vibration et de rotation sont quantifiés. Les transitions entre niveaux électroniques se manifestent dans le domaine spectral de l'ultra-violet et du visible et nous n'en discuterons pas ici. En plus des mouvements de translation, toutes les molécules polyatomiques, si elles disposent de l'énergie suffisante, peuvent aussi entrer en vibration avec

variation rapide et périodique des longueurs ou des angles de leurs liaisons interatomiques. Cependant, certaines transitions seulement entre niveaux de vibration apparaissent dans l'infrarouge car, pour qu'un mouvement de vibration s'y manifeste (en émission ou absorption) il faut que la vibration implique une variation de moment dipolaire. C'est le cas pour certains modes de vibration de CO₂ et H₂O mais PAS pour N₂ et O₂ (ce qui ne les empêche pas de vibrer même si il n'y a pas de variation de moment dipolaire). Pour qu'un mouvement de rotation pure se manifeste (en émission ou absorption) dans l'infrarouge il faut que la molécule possède un moment dipolaire permanent. C'est le cas pour H₂O mais PAS pour CO₂, N₂ ou O₂ (ce qui ne les empêche pas d'avoir des mouvements de rotation même si elles n'ont pas de moment dipolaire permanent). Néanmoins, lors d'une vibration, des molécules comme CO₂ et H₂O peuvent se trouver dans différents états (sous-niveaux) de rotation. Des mouvements de rotation sont alors associés aux mouvements de vibration et les spectres sont qualifiés de spectres de vibration-rotation. Nous ne nous intéresserons ici qu'au CO₂ et à la vapeur d'eau car ce sont les principaux gaz atmosphériques susceptibles d'absorber une fraction des rayonnements thermiques du Soleil ainsi que de la Terre.

8.2.2. Le CO₂.

Les molécules de CO₂ possèdent trois modes de vibrations distincts notés :

v1 (étirement symétrique) à 7,5 μm,

v2 (déformation angulaire) à 15 μm

v3 (étirement asymétrique) à 4,3 μm

Les deux derniers sont actifs dans l'infrarouge mais seul **v2** se situe dans le domaine du rayonnement thermique de la Terre (de 5 à 40 μm). La fig. 4 met en évidence, en plus des niveaux de vibration correspondant à la transition **v2**, la présence de sous-niveaux de rotation caractérisés par diverses valeurs du nombre quantique **J**. Les transitions possibles d'après la mécanique quantique correspondent à des transitions entre niveaux de rotation telles $\Delta J = -1$, $\Delta J = 0$ et $\Delta J = +1$.

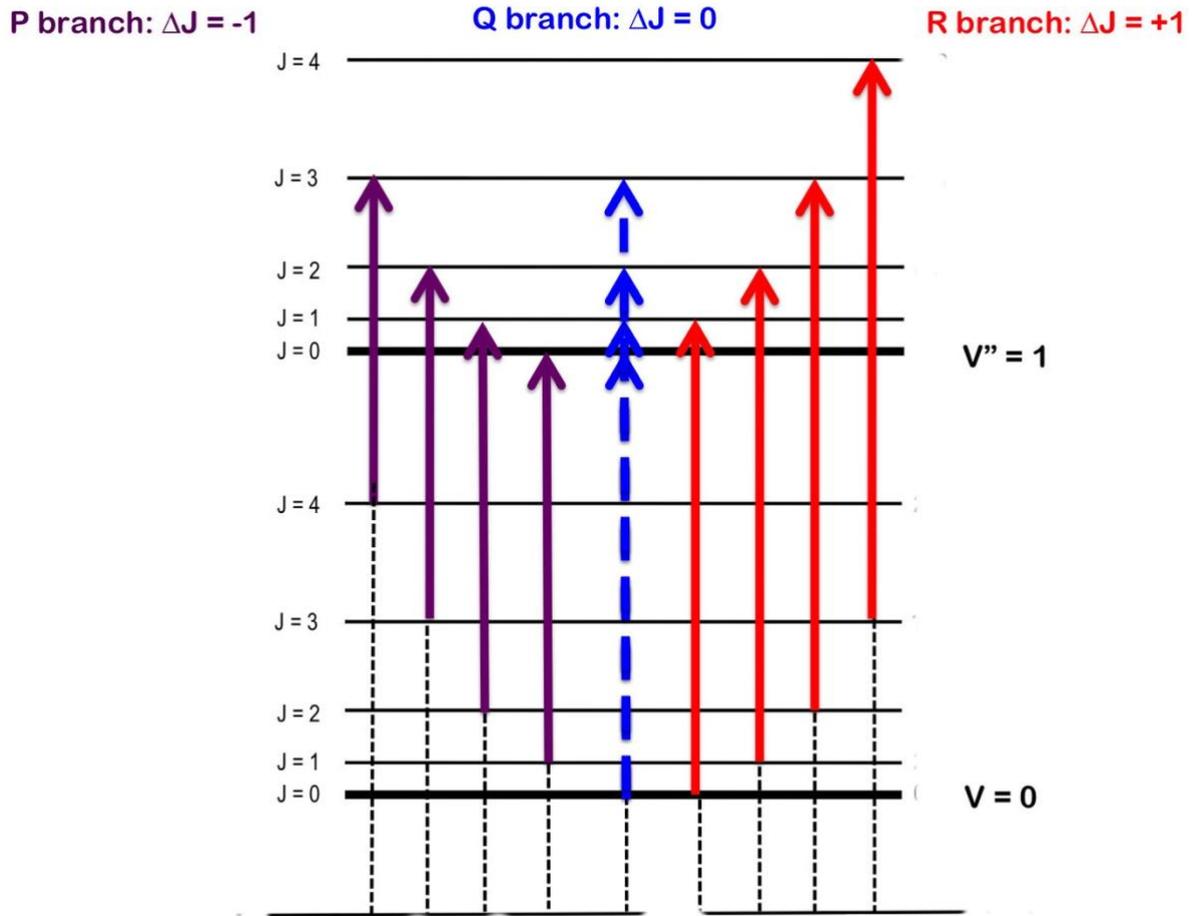


Fig. 4 Niveaux de vibration de CO₂ et transitions entre sous-niveaux de rotation conduisant aux branches P, Q et R du spectre infrarouge présenté sur la fig. 5. La combinaison de toutes les transitions possibles se manifeste dans le spectre de vibration-rotation, reproduit à faible résolution sur la fig. 5, par l'apparition de branches P, Q et R par ordre d'énergie croissante.

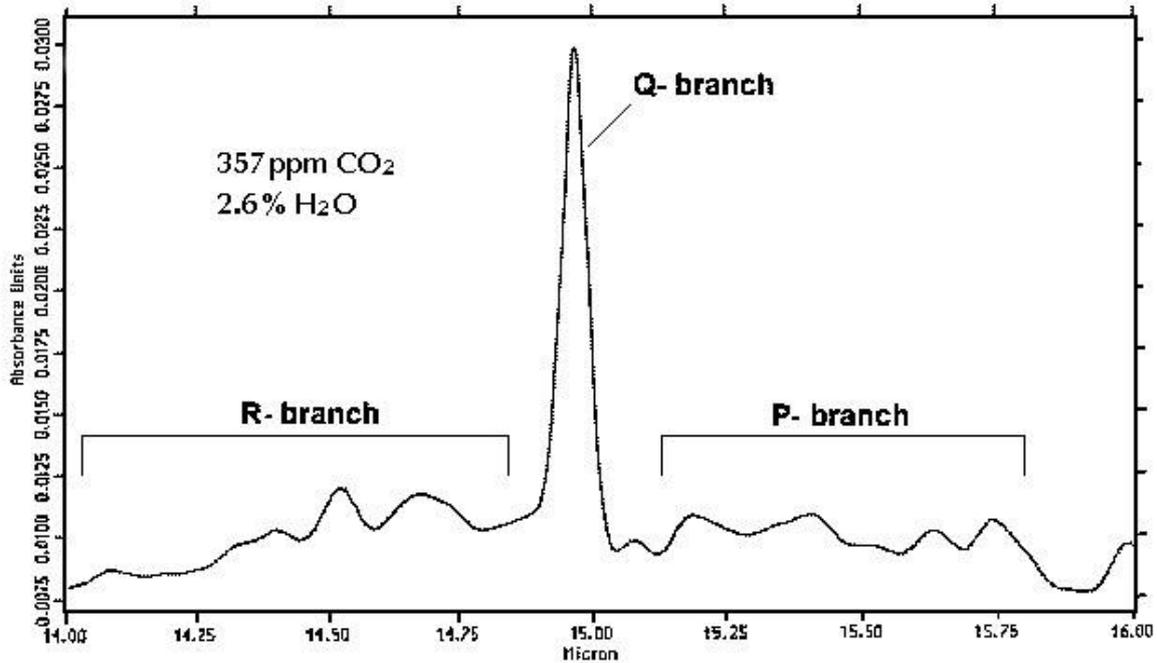


Fig.5 Spectre d'absorption infrarouge du CO₂

En admettant que la Terre se comporte comme un corps noir à la température de 288 K (15 ° C) et en intégrant l'équation de Planck dans le domaine d'absorption du CO₂ de 14 à 16 μm (voir fig. 5) on trouve que **10 %** seulement de l'énergie du rayonnement thermique de la Terre est émis dans cet intervalle de longueurs d'onde. **Le CO₂, quelle que soit son abondance, ne pourrait donc absorber plus que cette fraction.**

8.2.3. La vapeur d'eau.

De tous les gaz atmosphériques susceptibles d'absorber une fraction du rayonnement thermique de la Terre la vapeur d'eau est le plus efficace parce que c'est le plus abondant (en moyenne 2 % en volume) et aussi parce que son spectre infrarouge est le plus étendu. Les molécules d'eau possèdent trois modes de vibration notés :

v1 (étirement symétrique) à 2,7 μm,

v2 (déformation angulaire) à 6,3 μm

v3 (étirement asymétrique) à 2,7 μm

Les deux derniers seulement sont actifs dans l'infrarouge mais seul **v2** se situe dans le domaine du rayonnement thermique de la Terre (de 5 à 40 μm). Des combinaisons de **v1**, **v2** et **v3** peuvent aussi être actives dans l'infrarouge comme le montre la fig. 6 (courbe verte). Elles sont hors du rayonnement thermique de la Terre mais PAS hors du rayonnement thermique du Soleil au sommet de l'atmosphère dont elles absorbent une fraction (voir fig.2). En admettant que la Terre se comporte comme un corps noir à la température de 288 K (15 ° C) l'intégration de l'équation de Planck de 5 à 8 μm, domaine de la large bande de vibration-rotation **v2** (fig.6) permet de calculer que **12 %** de l'énergie du rayonnement thermique de la Terre pourraient être absorbés par la vapeur d'eau dans cet intervalle de longueurs d'onde. A cela s'ajoute l'absorption associée à la rotation pure

des molécules d'eau qui, cas particulier parmi les gaz atmosphériques, possèdent un moment dipolaire permanent. Les transitions entre niveaux de rotation pure, notées **R** sur la fig. 6, s'étendent de 20 μm à 300 μm et même au-delà (en dehors de l'échelle du graphique). L'intégration de l'équation de Planck dans le domaine de 20 à 300 μm permet de calculer que **48 %** de l'énergie du rayonnement thermique de la Terre pourraient être absorbés par la vapeur d'eau dans cet intervalle de longueurs d'onde. Au total, la vapeur d'eau pourrait absorber **60 %** du rayonnement thermique de la Terre et, s'ajoutant aux **10 %** du CO₂ (voir 8.2.2 ci-dessus) il ne resterait au rayonnement thermique de la Terre qu'une zone de transparence (fenêtre optique) de 8 à 13 μm (voir fig.10) permettant le passage de **30 %** environ de ce rayonnement. Cette dernière valeur est confirmée en intégrant l'équation de Planck dans ce domaine de longueurs d'onde. Toutes ces valeurs seront utilisées pour établir le bilan énergétique de la Terre (voir paragraphe 4 ci-dessous).

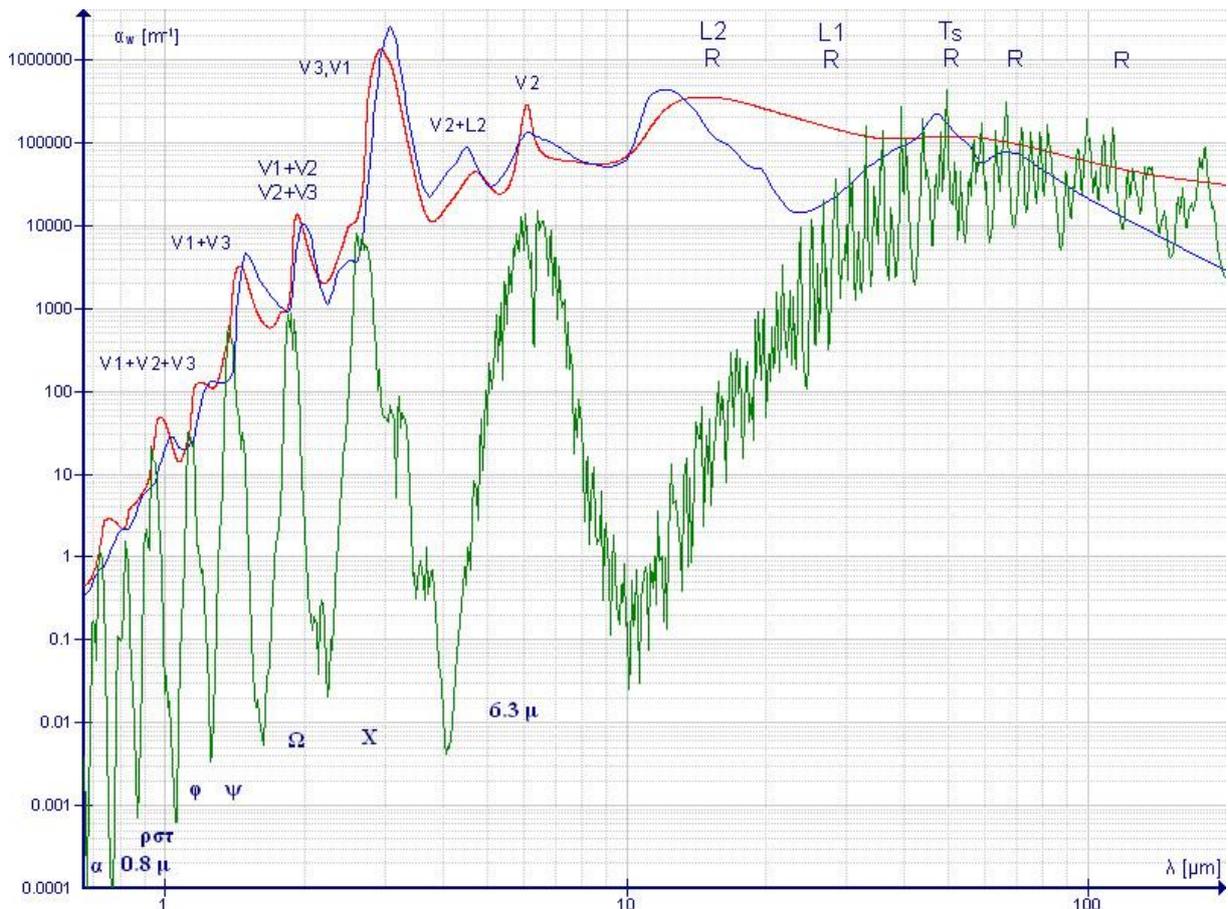


Fig. 6 Spectre d'absorption infrarouge de l'eau à l'état solide (bleu), liquide (rouge) et gazeux (vert).

8.2.4. Vibration et rotation de CO₂ et H₂O dans les basses couches atmosphériques.

L'importance des mouvements de translation des molécules atmosphériques dépend de la température comme indiqué plus haut (fig. 3). Il en est de même pour leurs mouvements de vibration et de rotation. Toutes ces molécules peuvent subir, à des degrés divers, des mouvements de vibration et de rotation si elles disposent de l'énergie suffisante. En l'absence de rayonnement extérieur, par exemple dans une boîte opaque, cette énergie provient du milieu ambiant sous l'action des nombreuses collisions qui sont un moyen d'échange énergétique. On peut calculer grâce à la relation $E_v = hc/\lambda$ (où **h** est la constante de Planck, **c** la vitesse de la lumière et **λ** la longueur d'onde du rayonnement absorbé) les énergies requises pour provoquer les transitions de vibration de CO₂ à 15 μm et de H₂O à 6,3 μm ainsi que de rotation de H₂O entre 20 et 300 μm. D'autre part, on peut calculer par la relation $E_t = mv^2/2$ quelles devraient être les vitesses

des molécules N₂ à 15° C pour atteindre ces énergies c'est-à-dire pour que E_t = E_v. On trouve respectivement environ 700 m/s pour exciter la vibration de CO₂ et 1100 m/s pour exciter la vibration de H₂O. L'intégration de la fonction de distribution des vitesses de Maxwell-Boltzmann (fig. 3) montre qu'à 15 °C 20 % des molécules N₂ ont une vitesse supérieure à 700 m/s et 1 % une vitesse supérieure à 1100 m/s. En fonction du principe d'équipartition des énergies on en déduit qu'à 15° C statistiquement 20 % des molécules CO₂ seraient en état de vibration mais seulement 1 % des molécules H₂O. Par contre, pratiquement toutes les molécules H₂O seraient en état de rotation. Ce passage des molécules CO₂ et H₂O à leur plus bas niveau de vibration résulte seulement des collisions inélastiques (sans conservation de l'énergie cinétique) qui ne représentent que 0,001 % des collisions mais encore plusieurs dizaines de milliers par seconde. Dans ces conditions il y a conversion d'une fraction Δ de l'énergie cinétique de translation des molécules N₂ (ou O₂) en énergie de vibration des molécules CO₂ ou H₂O



Cette conversion est réversible et les molécules se désactivent endéans quelques millisecondes pour retourner à l'état fondamental lors de nouveaux chocs avec les molécules environnantes. Il existe donc un équilibre dynamique résultant des très nombreuses collisions. Il ne dépend que de la température et de la pression (par le biais de la distribution des énergies et du nombre de chocs entre molécules). Quoique ce ne soient pas toujours les mêmes molécules qui sont en état de vibration la proportion de molécules CO₂ ou H₂O dans ces états reste constante à une température et une pression déterminées. Cet équilibre ne sera PAS modifié si, en plus, certaines molécules sont excitées par absorption d'une fraction du rayonnement infrarouge émis par la Terre. Dans ces conditions, les molécules excitées supplémentaires de CO₂ et H₂O joueront, en se désactivant par collisions, le rôle de **convertisseur de ce rayonnement absorbé en énergie de translation des molécules environnantes principalement N₂ et O₂**.

8.3. Effet de serre radiatif.

La théorie du réchauffement climatique d'origine anthropique est basée sur une seule et fragile hypothèse : l'existence d'un effet de serre qui n'a jamais été mis en évidence expérimentalement. Il existe un grand nombre de définitions parfois fantaisistes de l'effet de serre. Dans un article paru en 2009⁽¹⁾ G.Gerlich et R.D.Tscheuschner en relèvent 14 différentes provenant de sources aussi variées que l'Organisation Météorologique Mondiale ou l'Encyclopedia Britannica. La plupart de ces définitions résultent d'une mauvaise compréhension du phénomène qui intervient réellement dans une serre agricole mais souvent aussi d'une méconnaissance des lois fondamentales de la physique. Plus récemment M. Hertzberg, A. Siddons et H. Schreuder⁽²⁾ ont examiné six définitions parmi les plus souvent citées et démontré qu'aucune ne résiste à un examen scientifique critique. Sans revenir sur ces énumérations mentionnons seulement l'affirmation de certains climatologues selon laquelle une preuve, si pas une définition, de l'effet de serre serait qu'en l'absence de gaz dits « à effet de serre » la température « moyenne globale » de la Terre ne serait pas + 15° C mais – 18° C. Cette dernière température (parfois qualifiée de température « effective ») est calculée en appliquant la formule de Stefan-Boltzmann (voir 1.1 ci-dessus) au flux énergétique moyen de 240 W m⁻² mesuré par satellites à 800 km d'altitude. Ce type de calcul n'aurait de sens que pour une Terre sans atmosphère car la formule de Stefan-Boltzmann ne peut s'appliquer dans ce sens qu'en l'absence d'autres mécanismes de dissipation de l'énergie que le rayonnement thermique (voir article précédent 4. Du bon usage de la formule de Stefan-Boltzmann). Ce calcul serait quand même erroné car, en l'absence d'atmosphère, une partie de l'énergie reçue du Soleil ne serait pas réfléchiée par les nuages. Les satellites devraient alors mesurer un flux supérieur à 240 W m⁻². La différence, souvent mentionnée, de 33° C entre +15 °C et – 18° C n'a donc aucun sens physique et ne peut PAS être considérée

comme la manifestation d'un effet de serre. La température de -18°C , mesurée à une altitude de 5100 m environ, n'a aucun intérêt particulier et résulte simplement de l'existence d'un gradient thermique dans l'atmosphère. Ajoutons encore que l'introduction dans des modèles informatiques de rétroactions positives ou négatives a permis de qualifier le **réchauffement** climatique de **changement** climatique car l'introduction de paramètres supplémentaires dans les modèles informatiques permet de justifier n'importe quelle variation du climat (voir article précédent 3. Forçage radiatif, sensibilité climatique et rétroactions positives). Finalement les médias ont contribué à la propagation de l'expression plus alarmante encore de **dérèglement** climatique laissant entendre que le climat aurait toujours été prévisible avant qu'il ne soit perturbé par l'action de l'homme.

La seule définition de l'effet de serre décrivant clairement le phénomène envisagé par le GIEC (IPCC 2012, Glossary of terms) et répondant, de plus, au critère de réfutabilité énoncé par l'épistémologue Karl Popper est la suivante :

« L'effet de serre est un phénomène radiatif causé par des gaz tels la vapeur d'eau ou le CO_2 qui absorbent une fraction du rayonnement infrarouge émis par la Terre et le réémettent ensuite dans toutes les directions et notamment vers la surface terrestre dont la température serait, de ce fait, plus élevée qu'en l'absence de gaz absorbant l'infrarouge. Ces gaz sont dès lors qualifiés de gaz « à effet de serre ».

Sans reprendre en détails les arguments déjà présentés pour réfuter l'hypothèse de l'effet de serre radiatif (voir paragraphe **8.2.4** ci-dessus et article précédent 7. Le réchauffement climatique d'origine anthropique) nous rappellerons simplement que dans les basses couches atmosphériques le CO_2 ayant absorbé une fraction du rayonnement thermique de la Terre se désactive par collisions (plusieurs milliards par seconde) avec les molécules environnantes et PAS par émission d'un rayonnement de fluorescence. On peut en conclure que l'effet de serre radiatif n'existe PAS et que les rétroactions imaginées pour amplifier son effet n'ont aucune justification. La désactivation radiative du CO_2 ne peut être observée qu'à des altitudes de l'ordre de 80 – 100 km lorsque la pression atmosphérique est suffisamment faible pour que le nombre de collisions soit réduit à environ 1000/s. Le rayonnement émis dans toutes les directions à cette distance de la surface terrestre ne peut évidemment avoir d'influence sur la température de la Terre ou des basses couches atmosphériques.

8.4. Le bilan énergétique de la Terre

Le bilan énergétique envisagé est celui du système Terre-atmosphère et PAS celui du globe terrestre isolé. Il est basé sur l'idée que pour maintenir une température constante ce dernier doit dissiper par différents mécanismes l'énergie reçue du Soleil (évaporation de l'eau des océans, convection de l'air et rayonnement thermique) et qu'ensuite l'énergie sera évacuée hors du système Terre-atmosphère sous forme de rayonnement. Nous essayerons ci-dessous d'établir un bilan critique en distinguant ce qui peut être mesuré ou calculé et ce qui résulte seulement d'estimations ou d'hypothèses.

8.4.1. Énergie absorbée par la Terre

Au niveau de l'orbite terrestre chaque mètre carré placé perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit, en moyenne sur l'année, une puissance de 1368 W. La valeur de 342 W m^{-2} au sommet de l'atmosphère est basée sur l'idée que chaque mètre carré de la surface terrestre reçoit en continu le quart de 1368 W car la Terre n'intercepte le rayonnement solaire que sur une surface égale à celle d'un disque de même rayon. Cette valeur n'est PAS mesurée mais estimée en admettant

une distribution uniforme de l'énergie sur toute la surface terrestre sans tenir compte d'une variation en fonction de la latitude. En réalité la distribution de l'énergie est loin d'être uniforme comme le montrent les valeurs mesurées par les satellites CERES (Cloud and Earth Radiant Energy System) à des altitudes de l'ordre de 800 km. Elles varient entre 20 et 440 $W m^{-2}$ en fonction de la latitude (fig.7 en haut). La valeur de 342 $W m^{-2}$ mesurée aux environs des latitudes 37°N et 37°S est généralement acceptée comme valeur moyenne pour des raisons explicitées au paragraphe suivant.

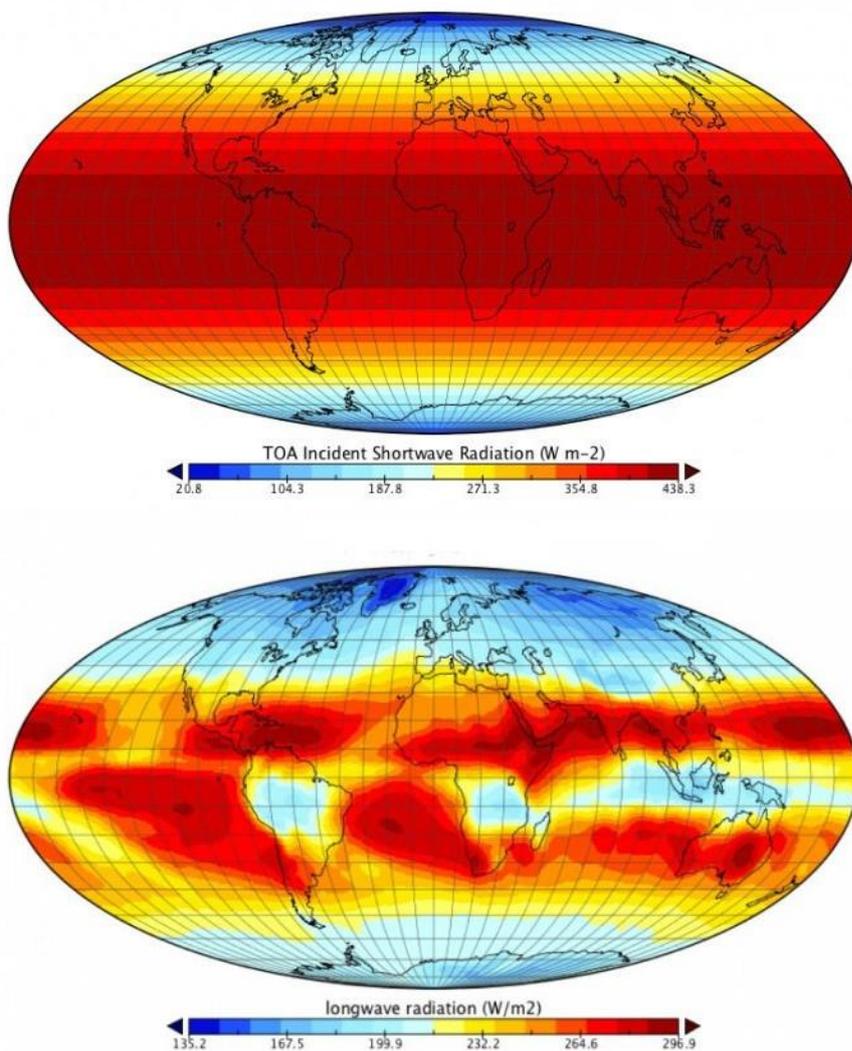


Fig.7 En haut : énergie solaire incidente au sommet de l'atmosphère (mesurée par satellites CERES). En bas : énergie émise par la Terre sous forme de rayonnement infrarouge (mesurée par satellites ERBE).

La bonne compréhension de la discussion qui suit implique d'examiner simultanément la fig. 8 qui en résume les conclusions.

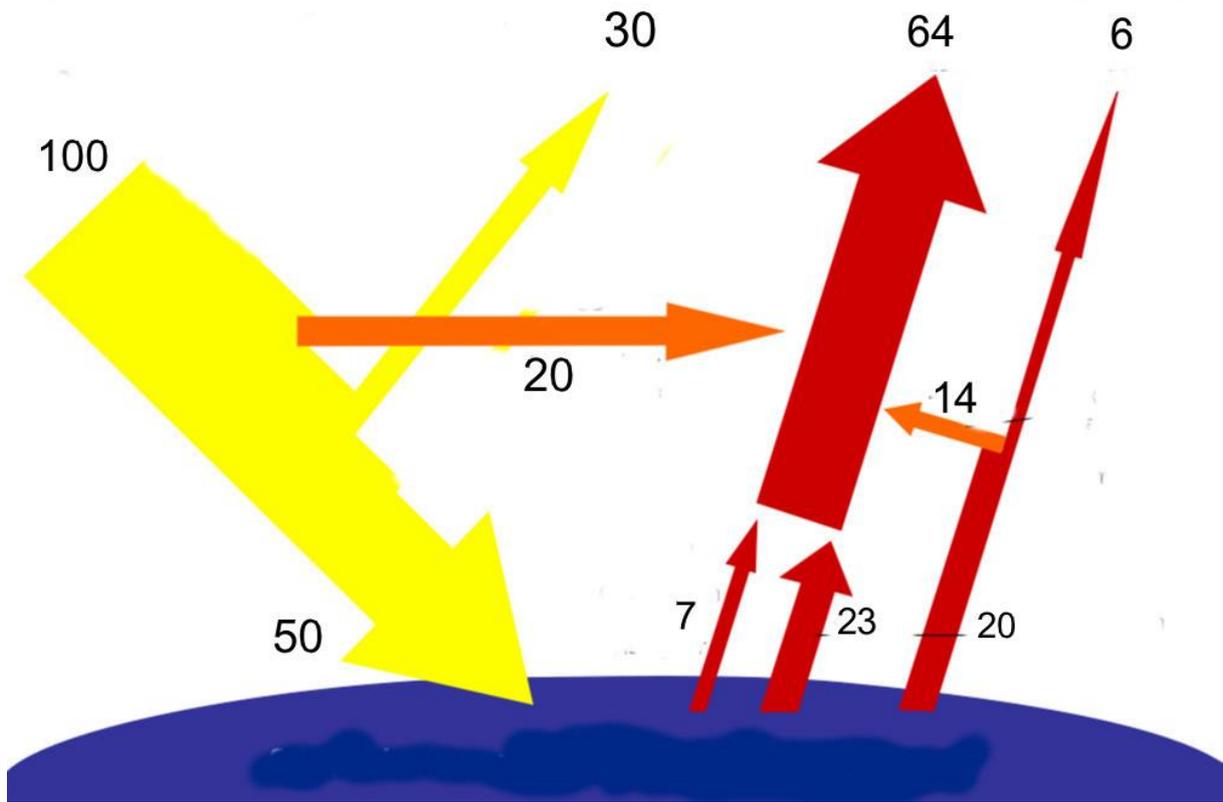


Fig. 8 Bilan énergétique de la Terre (énergie solaire au sommet de l'atmosphère $100 = 342 \text{ W m}^{-2}$).

En attribuant à la Terre un albédo moyen de 0,3 impliquant **30 %** d'énergie réfléchie ou diffusée par la surface terrestre, l'atmosphère et les nuages (valeur mentionnée sur la fig.8 et flèche jaune ascendante) le rayonnement effectivement absorbé par le système Terre-atmosphère serait alors réduit à 70 % de 342 W m^{-2} , soit 240 W m^{-2} . L'atmosphère (principalement la vapeur d'eau) absorberait **20 %** de 342 W m^{-2} (voir fig. 2 ci-dessus et grande flèche orange sur la fig. 8). Finalement n'arriveraient à la surface terrestre que **50 %** de 342 W m^{-2} (large flèche jaune descendante sur la fig. 8)

8.4.2. Énergie dissipée par la surface terrestre.

Au niveau de la surface terrestre trois mécanismes permettent la dissipation de l'énergie reçue du Soleil : évaporation de l'eau des océans, convection de l'air et rayonnement thermique. Je remercie un lecteur d'une de mes précédentes notes d'avoir attiré mon attention sur le fait que la Terre reçoit chaque année sous forme de précipitations $5,05 \cdot 10^5 \text{ km}^3$ d'eau qui se répartissent sur la surface totale de $5,1 \cdot 10^8 \text{ km}^2$. Tenant compte de la chaleur de vaporisation de l'eau (2454 kJ/kg) et du nombre de secondes dans une année on peut calculer que 78 W m^{-2} seraient requis en continu pour évaporer cette quantité d'eau, ce qui représente environ **23 %** de l'énergie reçue par la Terre au sommet de l'atmosphère (valeur notée sur la fig. 8).

La convection ascendante est généralement estimée à **7 %** de l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère (valeur notée sur la fig. 8). Le couplage de la convection et de l'évaporation de l'eau des océans (parfois qualifiée de convection humide) constituerait donc, à raison de 30 %, le principal mécanisme de dissipation de l'énergie absorbée par la surface terrestre. Ces 7 % ne sont qu'une

estimation mais, si on accepte cette valeur, on en déduit qu'environ **20 %** de l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère, resteraient à éliminer par rayonnement thermique (valeur notée sur la fig. 8). On peut calculer (voir 8.2.3) que 30 % de ce rayonnement pourraient être éliminés directement via la fenêtre optique (30 % de 20 % = **6 %** de l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère, mince flèche rouge en haut à droite sur la fig. 8) mais le reste serait absorbé principalement par la vapeur d'eau (à raison de 60 % voir 8.2.3) et aussi par le CO₂ (à raison de 10 % voir 8.2.2) totalisant ainsi 70 % de 20 % et donc environ **14 %** de l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère (petite flèche orange à droite sur la fig. 8). L'ensemble de tous les pourcentages mentionnés en **caractères gras** ci-dessus est présenté sur la fig. 8.

Des mesures du rayonnement infrarouge émis par la Terre effectuées par les satellites ERBE (Earth Radiation Budget Experiments) à des altitudes de l'ordre de 800 km s'échelonnent entre 135 et 300 W m⁻² selon la latitude (fig.7 en bas) et la valeur de 240 W m⁻² est mesurée aux environs des latitudes 37°N et 37°S. La comparaison des deux cartes reproduites sur la fig. 7 est intéressante car elle indique que :

Fig.7 en haut : aux latitudes de 37 °N et 37 °S la Terre reçoit du Soleil au sommet de l'atmosphère 342 W m⁻² (mesurés par les satellites CERES) mais l'albédo en réfléchit 30 % (fig. 8) et donc seulement **240 W m⁻²** sont absorbés au niveau de la surface terrestre.

Fig.7 en bas : aux latitudes de 37 °N et 37 °S la Terre émet sous forme de rayonnement infrarouge **240 W m⁻²** (mesurés par les satellites ERBE).

Au niveau des latitudes 37 °N et 37 °S il y aurait donc équilibre entre les flux radiatifs entrant et sortant du système Terre-atmosphère. Cela est explicité schématiquement sur la fig. 8 bis. Pour cette raison la valeur de 240 W m⁻² mesurée à ces latitudes est généralement acceptée comme valeur moyenne des flux radiatifs entrant et sortant. Dans les régions proches de l'équateur la Terre reçoit du Soleil un excédent d'énergie par rapport à cette moyenne et dans les régions proches des pôles l'apport d'énergie est déficitaire par rapport à cette moyenne (fig.7 en haut). Lors de la dissipation radiative de l'énergie absorbée par la Terre, l'émission n'est PAS uniforme (fig.7 en bas) mais le déséquilibre est partiellement compensé par les **transferts de chaleur** dus aux courants marins et aériens (fig.8bis). La correspondance des 240 W m⁻² mesurés par les satellites ERBE avec l'énergie absorbée par le système Terre-atmosphère (70 % de 342 W m⁻² = 240 W m⁻²) implique que, **quel que soit le mécanisme initial de dissipation, l'énergie est finalement évacuée vers l'espace sous forme de rayonnement** (large et mince flèches rouges en haut de la fig. 8).

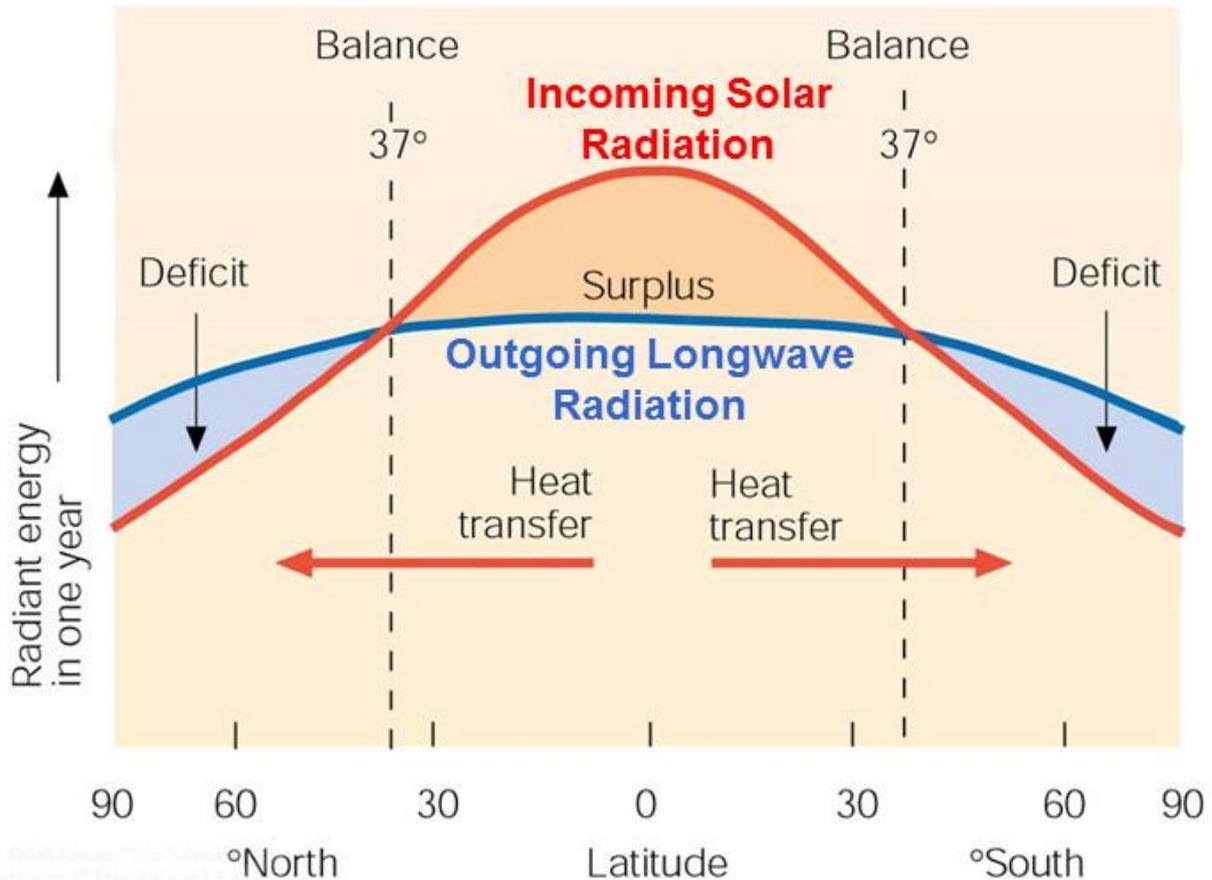


Fig.8bis Déséquilibres radiatifs locaux dans le système Terre-atmosphère.

Ce bilan global est basé sur le modèle d'un système Terre-atmosphère en équilibre radiatif constant (sans accumulation ou libération temporaires d'énergie). Peu de grandeurs ont été réellement mesurées mais l'ensemble est cohérent et compatible avec les calculs rappelés dans les paragraphes **8.2.2** et **8.2.3**. Son principal mérite est de mettre en évidence l'importance de la vapeur d'eau dans l'absorption d'une fraction des rayonnements thermiques du Soleil et de la Terre (flèches orange sur la fig. 8). Par voie de conséquence, la vapeur d'eau doit donc aussi avoir un rôle important dans la dissipation de cette énergie. Or, le bilan présenté ci-dessus n'apporte pas de réponse au problème posé par la conversion finale en rayonnement de l'énergie dissipée initialement par différents mécanismes (large flèche rouge ascendante sur la fig. 8). C'est à ce dernier aspect qu'est consacré le paragraphe suivant.

8.4.3. Origine du rayonnement détecté par satellites.

Les principales sources d'information dont nous disposons proviennent des satellites NIMBUS 3 ⁽¹⁾ et NIMBUS 4 ⁽²⁾. Mis en orbite à une altitude de l'ordre de 1100 km, ils étaient équipés d'un interféromètre IRIS (InfraRed Interferometer Spectrometer) permettant d'enregistrer les spectres infrarouges par transformée de Fourier. Un exemple de spectre enregistré par NIMBUS 4 près de l'équateur au-dessus de l'océan Pacifique occidental est reproduit sur la fig.9.

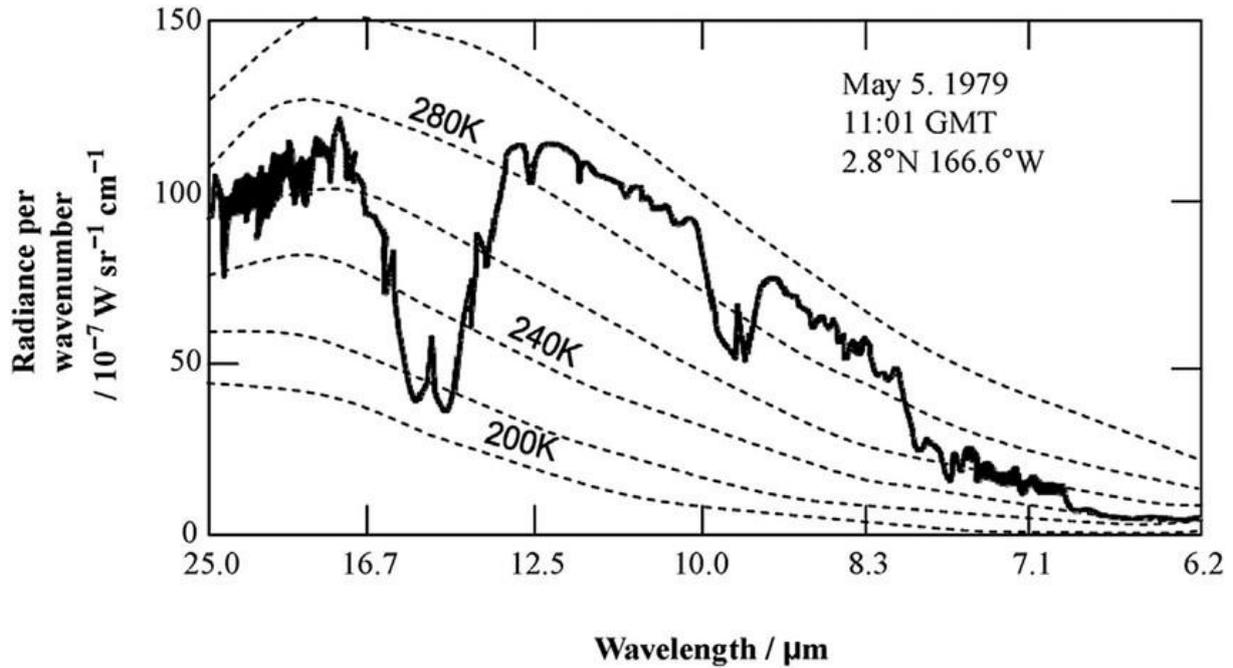


Fig.9 Spectre infrarouge du rayonnement de la Terre détecté par le satellite NIMBUS 4.

La totalité de ce spectre ne peut PAS provenir directement de la surface terrestre car seule la fenêtre optique de 8 à 13 μm permettrait au rayonnement thermique d'être évacué vers l'espace sans être absorbé dans les basses couches atmosphériques (principalement par la vapeur d'eau). Cela apparaît clairement sur la fig.10 qui superpose au spectre de transmission des basses couches atmosphériques la courbe d'émission théorique d'un corps noir à 288 K (15° C) comme le serait la Terre (en rouge).

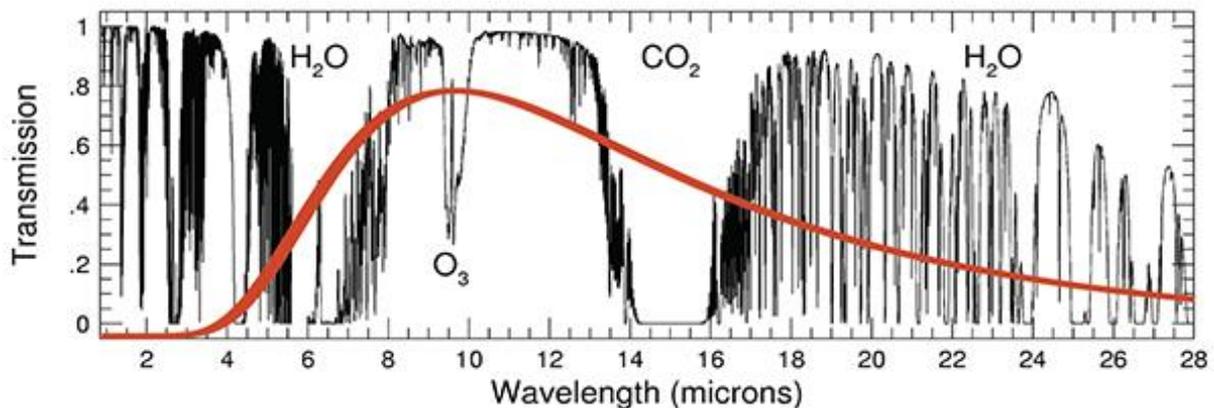


Fig. 10 Transmission de l'atmosphère (fenêtre optique de 8 à 13 μm) et spectre d'émission d'un corps noir à 288 K (15° C) (en rouge).

Sur la fig.9 apparaissent aussi en traits discontinus des courbes correspondant au rayonnement d'un corps noir aux températures mentionnées. Il semble qu'il y ait une tentative de faire correspondre chaque partie du spectre expérimental à une courbe d'émission « théorique » censée préciser la température à laquelle elle aurait été émise si elle provenait d'un corps noir. Cela pourrait éventuellement se justifier pour la partie du spectre de 8 à 13 μm si ce rayonnement provenait exclusivement de la surface terrestre à la température de 288 K (15° C) ce qui ne semble PAS le cas (voir ci-dessous). Pour le reste de la courbe expérimentale une telle hypothèse est injustifiée car aucun constituant atmosphérique, quelle que soit l'altitude d'où proviendrait le

rayonnement, ne peut être assimilé à un corps noir dont l'intensité d'émission varierait en T^4 (voir paragraphe 1 : deux types de rayonnement à ne pas confondre).

L'aire sous chaque partie du spectre de la fig.9 est proportionnelle au flux énergétique mesuré dans le domaine de longueur d'onde considéré. La portion la plus importante du spectre s'étend de 8 à 13 μm (correspondant à la fenêtre optique) mais elle n'a PAS l'allure attendue pour le rayonnement thermique de la Terre qui devrait présenter un maximum à 10 μm comme la courbe rouge de la fig. 10. De plus, la fig. 8 montre (fine flèche rouge à droite) que le rayonnement provenant directement de la surface terrestre à travers cette fenêtre optique ne représente que 6 % de l'énergie reçue par la Terre au sommet de l'atmosphère soit 21 W m^{-2} . On peut en déduire que les satellites NIMBUS ont enregistré plus de rayonnement que celui provenant directement de la surface terrestre mais beaucoup moins que les 240 W m^{-2} mesurés par les satellites ERBE (fig.7 en bas). La majeure partie du rayonnement pris en compte dans ces 240 W m^{-2} n'apparaît donc PAS sur le spectre de la fig. 9 car hors du domaine de mesure de l'appareillage utilisé. La fig.9 montre aussi que l'ozone, dont la concentration est la plus élevée vers 30 km d'altitude, absorbe à 9,6 μm une fraction du rayonnement thermique provenant de la Terre avant qu'il n'atteigne les satellites, en accord avec la fig. 10. Quant au CO_2 on voit sur la fig. 9 qu'il absorbe entre 14 et 16 μm une fraction d'un rayonnement qui ne provient PAS directement de la surface terrestre et dont l'origine est discutée ci-dessous.

Quels constituants atmosphériques sont susceptibles d'apporter sous forme de rayonnement l'appoint énergétique pour atteindre les 240 W m^{-2} mesurés par les satellites ERBE ?

L'hypothèse la plus probable est que ce soit la vapeur d'eau car

1° de tous les constituants atmosphériques c'est le plus abondant de ceux qui sont susceptibles d'émettre un rayonnement infrarouge et c'est celui dont le spectre de vibration-rotation est le plus étendu (fig. 6).

2° de tous les constituants atmosphériques c'est le seul qui, dans la troposphère, peut s'y trouver sous les états solide, liquide et gazeux et donc y subir des changements d'état.

3° les parties du spectre de la fig. 9 situées de part et d'autre de la fenêtre optique soit de 6 à 8 μm d'une part et de 13 à 25 μm d'autre part correspondent précisément aux domaines d'absorption (et donc aussi d'émission) de la vapeur d'eau apparaissant sur la fig. 10. La fig. 6 permet de préciser que dans le premier cas il s'agit de transitions de vibration et dans le second de transitions de rotation.

Par quel mécanisme la vapeur d'eau pourrait-elle évacuer sous forme de rayonnement l'énergie absorbée par le système Terre-atmosphère ?

Les molécules H_2O de l'atmosphère, excitées par absorption d'une fraction de l'énergie provenant du Soleil et de la surface terrestre (flèches orange sur la fig.8), ne peuvent PAS émettre de fluorescence, à quelque niveau que ce soit, car même à 12 km d'altitude, quand la vapeur d'eau est entièrement condensée (température et pression de l'ordre de -60°C et 200 hPa), la fréquence des collisions entre molécules (proportionnelle à $P.T^{-1/2}$) n'est réduite que d'un facteur 4 par rapport aux basses couches atmosphériques et est encore de l'ordre de $10^9/\text{s}$. Quelle que soit l'altitude, les molécules H_2O individuelles se désactivent donc toujours par collisions avec les molécules environnantes N_2 et O_2 mais lors d'un changement d'état impliquant un grand nombre de molécules voisines la situation pourrait être différente.

La vapeur d'eau, entraînée par convection, se refroidit progressivement en s'élevant et se transforme en gouttelettes liquides qui, en présence de germes, peuvent partiellement cristalliser vers 4 km d'altitude à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lors de ces changements d'état les chaleurs latentes de vaporisation et de fusion sont libérées et cédées au milieu ambiant par collisions avec les molécules environnantes. Par suite de ce transfert de chaleur la température de l'air humide est toujours supérieure à celle de l'air sec à une altitude donnée. Cependant, la troposphère n'étant PAS à l'équilibre thermodynamique à cause des courants de convection ascendants et descendants, l'eau peut rester partiellement à l'état surfondu (c'est-à-dire liquide) à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ alors qu'à l'équilibre elle devrait être solide. La vapeur d'eau peut aussi rester sursaturée jusqu'à des altitudes voisines de 10 km et ne se condenser en cristaux qu'à des températures de l'ordre de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les états de liquide surfondu et de vapeur sursaturée sont des états métastables qui peuvent revenir brusquement à des états liquide ou solide stables conformes au diagramme des phases.

Lors du brusque passage d'un état métastable à un état stable les interactions entre un grand nombre de molécules H_2O voisines deviennent prépondérantes, réduisant les collisions avec les molécules environnantes et favorisant la libération sous forme de rayonnement. La condensation de la vapeur d'eau sursaturée en solide permettrait la libération de la chaleur latente de sublimation (47 kJ/mol) sous forme de fluorescence vibrationnelle à $\lambda = 6,3\text{ }\mu\text{m}$ par exemple (niveau d'énergie 19 kJ/mol) en n'impliquant la désactivation radiative que de quelques molécules d'eau (2,5 en moyenne). De la fluorescence rotationnelle pourrait aussi être émise de $\lambda = 20$ à $300\text{ }\mu\text{m}$ (niveaux d'énergie de 0,4 à 6 kJ/mol) mais un plus grand nombre de molécules d'eau devraient intervenir pour atteindre 47 kJ/mol.

Quelques auteurs ont étudié l'émission de rayonnement infrarouge lors d'un changement de phase au départ d'un état métastable. Ce phénomène a été qualifié de « infrared characteristic radiation » (IRCR). Dans une brève revue⁽⁶⁾ il est précisé que les mesures à partir d'états métastables sont délicates et que la caractérisation précise du rayonnement émis est difficile. Référence est faite cependant à des chercheurs russes qui auraient décelé l'émission d'un rayonnement infrarouge de 4 à $8\text{ }\mu\text{m}$ lors de la condensation de vapeur d'eau sursaturée et d'un rayonnement de 28 à $40\text{ }\mu\text{m}$ lors de la cristallisation de gouttelettes d'eau à l'état surfondu. Ces domaines de longueurs d'onde correspondent respectivement aux transitions de vibration et de rotation des molécules H_2O (fig. 6). D'autres auteurs⁽⁵⁾ ont mis en doute la validité des mesures de 28 à $40\text{ }\mu\text{m}$ et n'ont enregistré, lors de la condensation de vapeur d'eau sursaturée, qu'une large émission s'étendant de 4 à $22\text{ }\mu\text{m}$ avec un maximum d'intensité à $13\text{ }\mu\text{m}$ qui coïncide avec celui de la fig. 9. En dehors des expériences de laboratoire l'émission IRCC provenant d'états métastables a aussi été mise en relation avec des phénomènes atmosphériques⁽⁷⁾. L'émission d'un rayonnement infrarouge de 8 à $14\text{ }\mu\text{m}$ aurait été observée lors du contact de vapeur d'eau sursaturée, entraînée par un courant ascendant, avec la base de nuages cumulus à la température de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le satellite GOES 8 (Geostationary Operational Environmental Satellite) aurait aussi détecté au-dessus des océans dans le canal de $6,7\text{ }\mu\text{m}$ l'émission de rayonnement infrarouge correspondant à la fluorescence vibrationnelle de l'eau. Par contraste des taches sombres apparaissent au-dessus des zones arides. Signalons encore que l'émission d'un rayonnement infrarouge de longueur d'onde non précisée a été mise en évidence lors de la cristallisation d'une goutte d'eau observée sous microscope⁽⁸⁾.

Dans quelles conditions la vapeur d'eau pourrait-elle émettre de la fluorescence lors d'un changement d'état ?

La discussion et les résultats des paragraphes précédents montrent que, lors d'un changement d'état, la première condition pour que la libération des chaleurs latentes de vaporisation et/ou de fusion soit possible sous forme de rayonnement est qu'interviennent des états métastables (vapeur

d'eau sursaturée ou eau liquide à l'état surfondu). Encore faut-il que la concentration locale en vapeur d'eau soit suffisamment faible pour que le rayonnement émis ne soit pas réabsorbé par les molécules d'eau individuelles puis converti en chaleur par collisions avec les molécules environnantes N_2 et O_2 . Cette deuxième condition suggère que le phénomène ne pourrait se produire qu'à des altitudes voisines de 10 km où la teneur en vapeur d'eau n'est plus que de 0.01 % (fig. 11). A ce niveau, au sommet de la troposphère, la convection ascendante de la vapeur d'eau sursaturée s'arrête puisque le gradient thermique s'annule. Comme il n'y a plus des gouttelettes d'eau à l'état métastable seule la condensation de la vapeur d'eau sursaturée en microcristaux de glace peut être envisagée. Ce phénomène, inverse de la sublimation, est parfois qualifié en anglais de « desublimation » mais le terme correct en français est « condensation ».

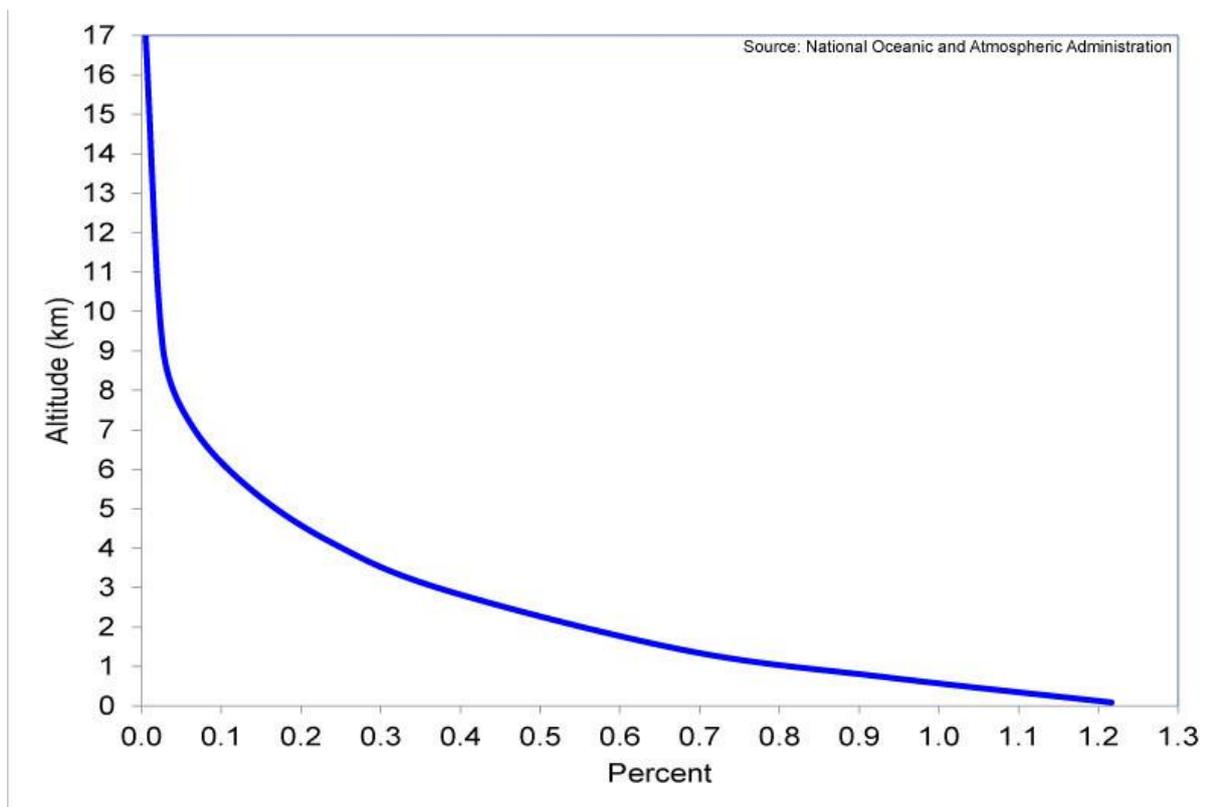


Fig. 11 Teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère en fonction de l'altitude.

Ce changement d'état permettrait-il l'évacuation radiative de l'énergie provenant de la surface terrestre ?

Nous avons vu au paragraphe 8.4.2 et sur la fig. 8 que l'énergie absorbée par le système Terre-atmosphère **ne peut être évacuée que sous forme de rayonnement** : 6 % directement par le rayonnement thermique de la Terre (21 W m^{-2}) et 64 % (219 W m^{-2}) après conversion en rayonnement de l'énergie résultant initialement de tous les autres mécanismes. La condensation de vapeur d'eau sursaturée en microcristaux de glace entre 9 et 10 km d'altitude rend-elle cette conversion possible ? Un calcul simple pourrait nous en convaincre.

La dissipation en continu de 219 W m^{-2} par toute la surface du globe terrestre (dont la valeur est mentionnée au paragraphe 4.2) représente au total $1,12 \cdot 10^{17} \text{ J/s}$. Envisageons ensuite une couche

atmosphérique s'étendant de 9 à 10 km d'altitude autour du globe terrestre (température et pression moyennes 230 K et 275 hPa). L'équation des gaz parfait permet de calculer le nombre total de molécules qu'elle contient d'où le nombre de molécule H₂O à l'état de vapeur sursaturée qui n'en représentent que 0,01 % soit $7,36 \cdot 10^{14}$ mol. Lors de la condensation à l'état solide, ces molécules H₂O pourraient dissiper sous forme de rayonnement 47 kJ/mol soit au total **3,46 10¹⁹ J**. Cette énergie émise quasi instantanément sous forme de rayonnement est **310** fois supérieure à l'énergie à évacuer par seconde. Comparant les valeurs soulignées on voit que, même si le rendement de conversion en rayonnement n'était que de 0,3 %, il permettrait encore d'évacuer l'énergie dissipée chaque seconde par la surface terrestre.

Nous pouvons donc conclure que, sur les 240 W m⁻² mesurés par les satellites ERBE, 9 % (21 W m⁻²) proviennent directement de la surface terrestre sous forme de rayonnement thermique et 91 % (219 W m⁻²) de l'émission de fluorescence associée à la condensation de la vapeur d'eau sursaturée au sommet de la troposphère.

Cette hypothèse nous permet de considérer la fig. 9 comme la superposition du rayonnement thermique de la Terre transmis directement à travers la fenêtre optique de 8 à 13 μm et d'un large spectre de fluorescence vibrationnelle et rotationnelle des molécules H₂O qui pourrait s'étendre de 4 μm à plus de 100 μm (fig. 6) et donc bien au-delà des 25 μm qui constituent la limite de la fig.9. Cela explique pourquoi les 240 W m⁻² mesurés par satellites ERBE n'apparaissent que très partiellement sur la fig. 9. On comprend aussi qu'une fraction de la fluorescence rotationnelle puisse être absorbée par le CO₂ entre 14 et 16 μm comme le montre la même figure.

Références

- (1) G. Gerlich, R.D. Tscheuschner, *International J. Modern Phys.B*, **23**, 275 (2009).
- (2) M. Hertzberg, A. Siddons, H. Schreuder, *Energy & Environment* **28**, 530-539 (2017).
- (3) B.J. Conrath, R.A. Hanel, V.G.Kunde, C.Prabhakara, *J. Geophys. Res.* **75**, 5831 (1970).
- (4) R.A. Hanel, B.J. Conrath, V.G.Kunde, C.Prabhakara, I.Revah, V.V.Salomonson, G.Wolford, *J. Geophys. Res.* **77**, 69, (1972).
- (5) V.A. Tatarchenko, P.V. Smirnov, Y. Wu, *Optics and Photonics J.* **3**, 1-12 (2012).
- (6) H. Xie, M. Shu, B. Zhang, X. Guan, *Energy Procedia*, **16**, 997-1002 (2012).
- (7) V.A. Tatarchenko, P.V. Smirnov, *Earth Science Review* **101**, 24-28 (2010); (8) R. Stahlberg, H. Yoo, GH. Pollack, *Indian.J. Phys.* **93**, 221 (2019).

9. Pourquoi l'effet du CO₂ sur le climat est exclu par la physique

Mis en ligne SCE : Décembre 2020

Je voudrais remercier le Professeur G. Geuskens pour son remarquable article intitulé: L'effet de serre et le bilan énergétique de la Terre, paru sur le site web Science, climat et énergie ce 11 décembre 2020.

Cet article aurait pu être intitulé « Les dessous méconnus de l'effet de serre », dans la mesure où il examine de manière détaillée la physique qui détermine cet effet qui a fait couler tellement d'encre: cette physique est totalement absente des volumineux rapports du GIEC, élaborés pourtant par des milliers de scientifiques.

Comme les médias le répètent sans relâche, le réchauffement climatique observé est attribué par les climatologues à l'effet de serre causé par le CO₂ d'origine anthropique. Nous devrions donc changer de civilisation, au point que l'Echo du 5 décembre dernier a attribué à quelqu'un de respectable et de respecté comme « Monsieur Mestrallet des propos dignes d'un émir des années septante: » L'électricité verte est en passe de devenir le nouveau pétrole ». De tels propos appellent une réaction et l'article du Professeur Geuskens tombe à point nommé.

Cet article faisant appel à différentes notions de physique qui rendent parfois sa lecture difficile pour un non spécialiste, je souhaiterais le résumer pour un public aussi large que possible en le ramenant à trois points de physique:

1. Dans un corps solide ou liquide, l'agitation thermique des molécules se traduit principalement par des vibrations, comme le montre d'ailleurs la chaleur spécifique. Les corps solides et liquides sont donc de bons émetteurs et absorbeurs de rayonnement électromagnétique: en d'autres termes, le sol, la banquise et l'océan émettent et absorbent du rayonnement infrarouge.
2. Par contre, la chaleur spécifique d'un gaz montre que l'agitation moléculaire se traduit par des mouvements de translation et de collisions qui ne produisent aucune émission de rayonnement. Pour qu'un gaz atmosphérique puisse émettre du rayonnement, il faut que ses molécules puissent être excitées, comme celles des gaz à effet de serre. Dans ce cas, une fois qu'une molécule est excitée, l'émission de rayonnement devient possible par désexcitation radiative, on parle de fluorescence. Or, cette désexcitation est relativement lente par comparaison avec la fréquence élevée des collisions inélastiques dans la troposphère: la désexcitation radiative y est donc négligeable. Il faut monter beaucoup plus haut, vers 100 km d'altitude là où il y a beaucoup moins de collisions, pour que le CO₂ puisse émettre du rayonnement infrarouge.
3. Outre la petite quantité de chaleur rayonnée de manière directe par la fenêtre infrarouge atmosphérique, ce qui refroidit la troposphère ne peut donc être que la turbulence et le mélange induits par la convection atmosphérique. Dans la partie supérieure de la troposphère, au voisinage de la tropopause, le rayonnement émis par les gouttes d'eau ou les particules de glace qui y subsistent transforme la chaleur en rayonnement qui s'échappe dans la stratosphère puis dans l'espace. Ce phénomène est visualisé par la face supérieure des nuages d'orage de type cumulonimbus, reconnaissables à leur forme d'enclume. Ce mécanisme est basé sur la seule humidité et exclut donc toute influence du CO₂ sur ce refroidissement.

Nous sommes donc conduits à constater que les climatologues, qui constituent la sous-espèce politisée des climatologues, parient depuis trente ans sur un mauvais cheval en parlant d'effet de serre causé par le CO₂ anthropique: les lois de la physique sont sans appel et rendent cet effet impossible.

Le climat continuera donc sa marche inexorable vers le réchauffement ou le refroidissement sous l'influence du Soleil et des mouvements de notre planète sur son orbite. Même si ces propos paraîtront blasphématoires à certains, notre Planète ne doit pas être sauvée du CO₂, quelles que

soient les prophéties catastrophistes des augures de l'ONU ou du GIEC ou les mesures de la soi-disant dernière chance de l'Accord de Paris.

Avec un CO₂ sans effet sur le climat, tout comme l'énergie nucléaire dans les années 1950, l'électricité verte n'a en 2020 que l'enthousiasme suscité par sa nouveauté comme argument pour devenir le nouveau pétrole.

Dans un monde libre, non subsidié et rationnel cette électricité ne sera qu'une mode que l'avenir ramènera à sa juste proportion, comme cela s'est déjà passé pour l'électricité nucléaire^[1].

^[1] Les firmes pétrolières « majors » investissent aujourd'hui massivement dans les énergies renouvelables. Mais il faut rappeler que, dans les années 1970, les firmes pétrolières Gulf et Exxon ont investi massivement dans le nucléaire. Ne subsiste aujourd'hui que l'usine Exxon Nuclear Fuel de Richland (USA) intégrée aujourd'hui dans le groupe français Framatome. L'histoire est un perpétuel recommencement.

[10. Puissances en jeu dans le système Terre/atmosphère \(1/3\)](#)

Mis en ligne : 18.06.2019

Equilibre des flux, Flux solaire

Depuis 40 ans, des instruments sur satellites mesurent les divers flux énergétiques entrant et sortant du système Terre/ atmosphère. Les flux sortants (solaire réfléchi et infrarouge) équilibrent-ils, **en moyenne**, le flux solaire entrant ? A partir des **observations depuis 1980**, l'article présente les différents ordres de grandeur, en adoptant le point de vue des puissances **globales** pour le système Terre/atmosphère.

10.1. Introduction

10.1.1. Remarques préliminaires

La surface d'un **disque** de rayon r est $S_d = \pi r^2$; la surface d'une **sphère** de rayon r est $S_s = 4 S_d = 4 \pi r^2$. Pour la Terre, $S_s \approx 5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 = 0,51 \text{ Pm}^2$ ($P = \text{Péta} = 10^{15}$).

Cette valeur de $0,51 \text{ Pm}^2$ permet (pour les flux sortants) la conversion d'une puissance surfacique (W/m^2) en une puissance globale (PW) sur la **sphère** terrestre. Pour le **disque** qui intercepte le flux solaire entrant, on utilise $S_d = S_s/4 \approx 0,128 \text{ Pm}^2$.

10.1.2 Mesure des flux

La pression dans l'atmosphère diminue avec l'altitude, et il **n'existe pas** de limite nette séparant l'atmosphère du vide spatial. Par convention ([voir ici](#)), on considère une limite (altitude $\approx 100 \text{ km}$ \rightarrow $0,04 \text{ Pa}$ [ici](#)) désignée par **TOA = Top Of Atmosphère**. Au sommet de l'atmosphère terrestre, on distingue 3 flux de puissance (rayonnement électromagnétique) :

- rayonnement solaire à ondes courtes entrant : TSI = **Total Solar Irradiance**
- rayonnement à ondes courtes réfléchi : RSF = **Reflected Solar Flux**
- rayonnement à ondes longues sortant : OLR = **Outgoing Longwave Radiation**

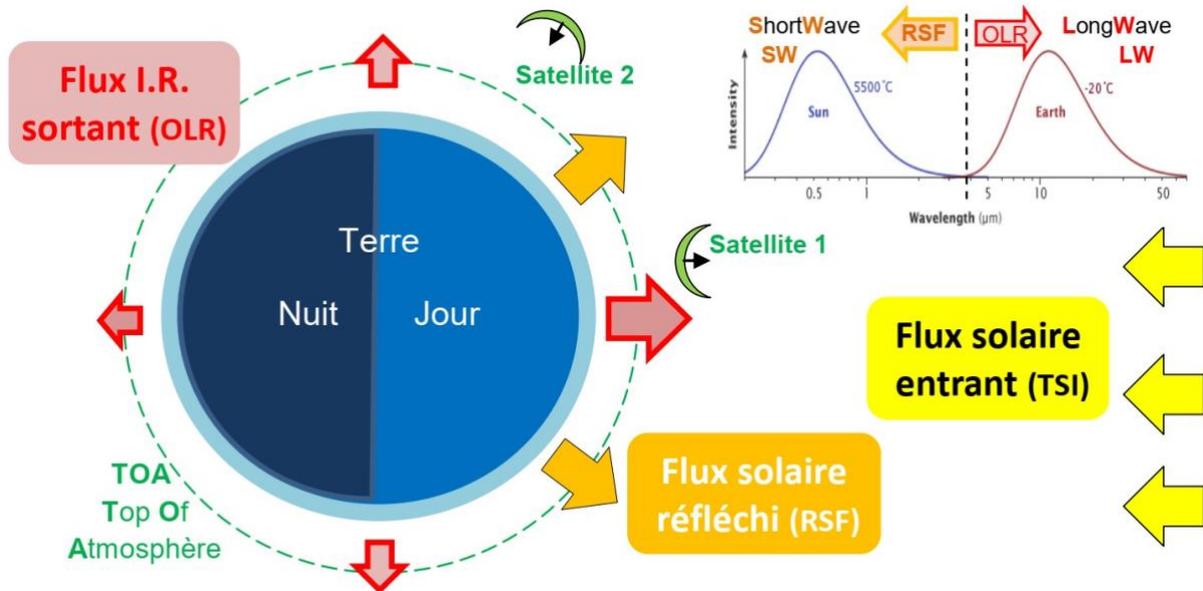


Figure 1a. Les flux énergétiques **au-dessus** de l'atmosphère. [1] Les flux sortants sont usuellement séparés suivant leur longueur d'onde: flux solaire réfléchi (RSF) pour $\lambda < 4 \mu\text{m}$ (SW = ShortWave), flux IR émis par le système Terre/atmosphère (OLR) pour $\lambda > 4 \mu\text{m}$ (LW = LongWave). Les flux sortants sont plus élevés côté jour. La somme des flux sortants est maximale dans la zone 30S-30N. Pour un flux moyen IR émis = 239 W/m^2 , mesuré depuis le satellite 2, la puissance **totale** correspondante sera $239 \times S_s$, mais pour un flux solaire de 1361 W/m^2 mesuré depuis le satellite 1, la puissance **totale** correspondante sera $1361 \times S_d$.

Sur la Figure 1a, le flux solaire **entrant** est mesuré par le satellite 1 : son antenne vise le centre du Soleil et la mesure (W/m^2) va dépendre de l'état du Soleil et de la distance satellite-Soleil.

Les flux **sortants** (Flux IR sortant + Flux solaire réfléchi soit OLR+RSF) sont mesurés par le satellite 2 : son antenne vise une zone de la surface terrestre. La mesure dépend de la **zone visée** (les flux sont supérieurs aux basses latitudes), de l'**angle de visée**, mais surtout de l'**heure d'observation** (les flux sont maximaux à midi local).

Ainsi, l'incertitude pour le flux solaire entrant dépend surtout des défauts des instruments, alors que pour les flux sortants, l'incertitude dépend **aussi** des **modélisations** utilisées ([voir ici](#)) pour les corrections (empreinte au sol, angle de visée, **heure d'observation**) et pour les raccordements (satellites / altitudes / longueurs d'onde).

Un **très faible** déséquilibre entre flux entrant et sortant est difficilement mesurable à la TOA : le paragraphe suivant propose une estimation **indirecte** du déséquilibre.

10.1.3 Les flux sont-ils en équilibre global ?

Selon Levitus 2000 ([ici fig. 3](#)) ou Hansen 2011 ([ici fig. 10a](#)), un éventuel déséquilibre des flux se traduirait surtout dans la température océanique et accessoirement dans la fonte de la cryosphère [2].

Océans : Selon la NOAA ([ici](#)), le GOHT = **Global Ocean Heat Content** croît de $2,4 \cdot 10^{23} \text{ J}$ de 1980 à 2020 (entre 0 et 2000 m). **La fonte des glaces** entre 1991 et 2012 (selon AR5 Fig 4.25) serait proche de $10\,000 \text{ Gt} = 10^{16} \text{ kg}$. Une estimation haute ($\approx 4 \cdot 10^{16} \text{ kg}$ pour 40 ans), correspond [5] à l'énergie de fonte $\approx 0,15 \cdot 10^{23} \text{ J}$. Océan et cryosphère auraient donc absorbé une énergie de $2,4 \cdot 10^{23} + 0,15 \cdot 10^{23} = 2,55$

10²³ J. Ceci correspond au **déséquilibre sur 40 ans**.

Correspondance avec l'atmosphère:

La masse de l'atmosphère est $\approx 5,1 \cdot 10^{18}$ kg et la capacité thermique pour cette masse d'air est $\approx 5 \cdot 10^{21}$ J/K. En affectant 1% du déséquilibre (**2,55 10²³ J**) à l'atmosphère, le réchauffement serait $\approx 0,01^*$ $2,55 \cdot 10^{23} / 5 \cdot 10^{21} = 0,51$ K. Ceci est comparable à 0,6 K, qui est la hausse en 40 ans des indicateurs de température UAH ou RSS.

L'estimation du déséquilibre repose sur des bases fragiles:

Le [système Argo](#) [2] a permis une nette amélioration de la connaissance des températures de l'océan depuis 2005. Les 4000 balises Argo sont réparties sur l'océan ($3,6 \cdot 10^{14}$ m²) : leur distance moyenne est donc $\approx \sqrt{3,6 \cdot 10^{14} / 4000} \approx 300$ km. Selon la NOAA ([ici](#)), de 2005 à 2020, entre **0 et 700 m**, GOHT = **Global Ocean Heat Content** augmente de $9 \cdot 10^{22}$ J, ce qui correspond (capacité thermique 700 m océan $\approx 10^{24}$ J/K) à une hausse de température $\approx 9 \cdot 10^{22} / 10^{24} = \mathbf{0,09}$ K.

Une évolution inférieure à 0,1 degré [5] dans un volume aussi grand que celui de l'océan ($1,37 \cdot 10^{18}$ m³) semble difficile à mettre en évidence : même avec 1370 milliards de capteurs, fonctionnant simultanément, on a seulement une mesure par million de m³. Si on affecte l'intégralité de l'augmentation de GOHT = $9 \cdot 10^{22}$ J à 300 m d'océan, la hausse de température est $\approx 0,23$ K.

La **meilleure** estimation du déséquilibre des flux est donc basée sur une variation de l'ordre de **0,1 à 0,2 degré en 15 ans**, mesurée par des instruments **distants de 300 km**.

On peut s'interroger sur la possibilité de mesurer des variations aussi faibles : voir [ici](#) la **dispersion** des mesures, et [là](#) une comparaison Argo versus navires qui rapporte un écart de 0,6 K).

Conclusion provisoire : Pour 40 ans ($1,26 \cdot 10^9$ s), l'énergie $\approx \mathbf{2,55 \cdot 10^{23}}$ J correspond à la puissance **moyenne** $P = 2,55 \cdot 10^{23} / 1,26 \cdot 10^9 = 2,02 \cdot 10^{14}$ W. Le flux solaire entrant serait donc supérieur aux flux sortants de $\approx \mathbf{0,2}$ PW : les flux sortants à la TOA équilibreraient le flux solaire $\approx \mathbf{174}$ PW à $0,2/174 \approx \mathbf{0,1\%}$ près.

10.1.4 Les flux ne sont pas équilibrés localement.

Si un quasi-équilibre existe au-dessus de l'atmosphère pour **la globalité** du système Terre/atmosphère, en revanche, **il n'y a pas équilibre local** à toutes les latitudes du globe, comme l'illustre la figure ci-dessous.

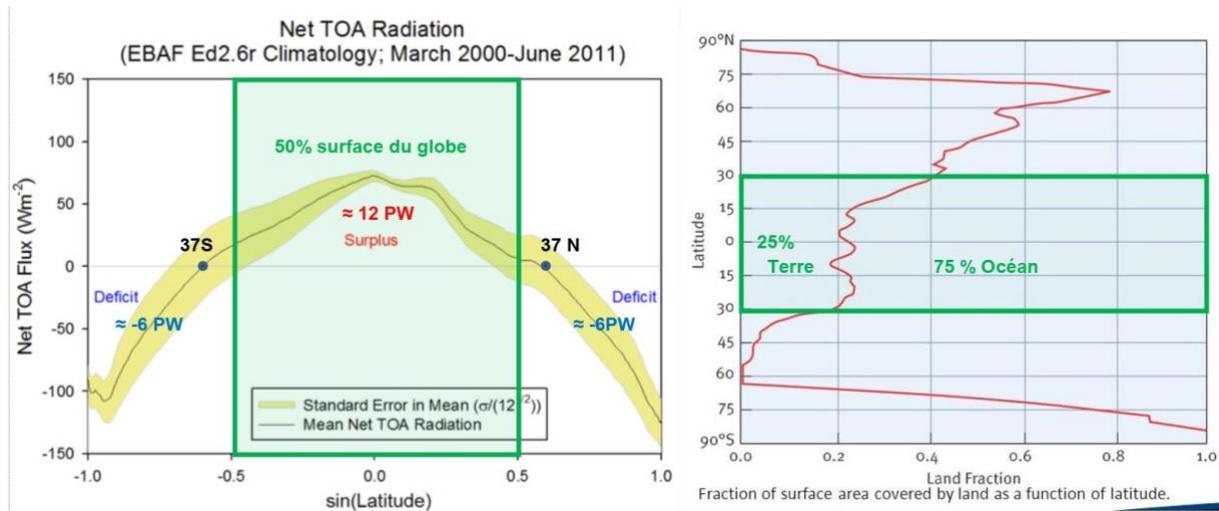


Figure 1b. A gauche : Bilan des flux entrants et sortants suivant la latitude (*ici*). Le trait horizontal à 0 indique le parfait équilibre. Le bilan des flux présenterait un surplus (entre 37S et 37N) moyen sur 1 an $\approx 12 \cdot 10^{15}$ W soit 12 PW (*voir ici*). Ce surplus/déficit est l'une des causes des circulations océanique et atmosphérique. **A droite :** Répartition Land / Océan suivant la latitude (*ici*). Entre 30S et 30N (zone en vert), on trouve 50% de la surface du globe, cette moitié du globe qui est au **trois quart océanique** reçoit un surplus énergétique.

10.2. Flux entrant en provenance du Soleil.

10.2.1. Définitions et variabilités [3]

Les satellites permettent, depuis 1978, la mesure du rayonnement électromagnétique en provenance du Soleil. Ce flux varie de $\pm 3,3$ % en cours d'année à cause de la **distance variable** Terre-Soleil. La TSI (Total Solar Irradiance) est la puissance totale, en provenance du Soleil, traversant 1 m^2 lorsqu'on est situé à la distance de **1 UA** (distance moyenne Terre-Soleil = 1 UA = $1,496 \cdot 10^{11}$ m). Le spectre solaire s'étend principalement entre $0,1 \mu\text{m}$ et $4 \mu\text{m}$ (98% de la puissance est comprise entre $0,16 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$ *ici*).

Il existe également un flux de diverses particules (proton, alpha, électron, neutron, rayon cosmique), dont la puissance surfacique est **négligeable** (*ici*) devant la TSI, mais dont **l'action sur la transparence** de l'atmosphère n'est pas nulle. Lors du cycle solaire ≈ 11 ans, l'activité solaire présente des variations qui peuvent atteindre $\approx 0,2\%$ pour la TSI. Mais, pour les courtes longueurs d'ondes, la **variation dépasse largement 0,2%**, ce qui peut avoir (voir *ici* ou *là*) une **influence sur le flux solaire réfléchi**.

Les mesures de la TSI depuis 1978 correspondent à **plusieurs** satellites /instruments et il existe des désaccords (Fig. 2a) entre instruments (*ici*) mais aussi entre reconstructions (Fig. 2b).

Il est probable qu'il existe une **variation séculaire** de la TSI: celle-ci expliquerait le Petit Age de Glace, synchrone avec le minimum de Maunder, vers 1700, où l'on observe très peu de taches solaires (le nombre de Wolf = taches solaires/sunspot number est supposé être un indicateur de la TSI).

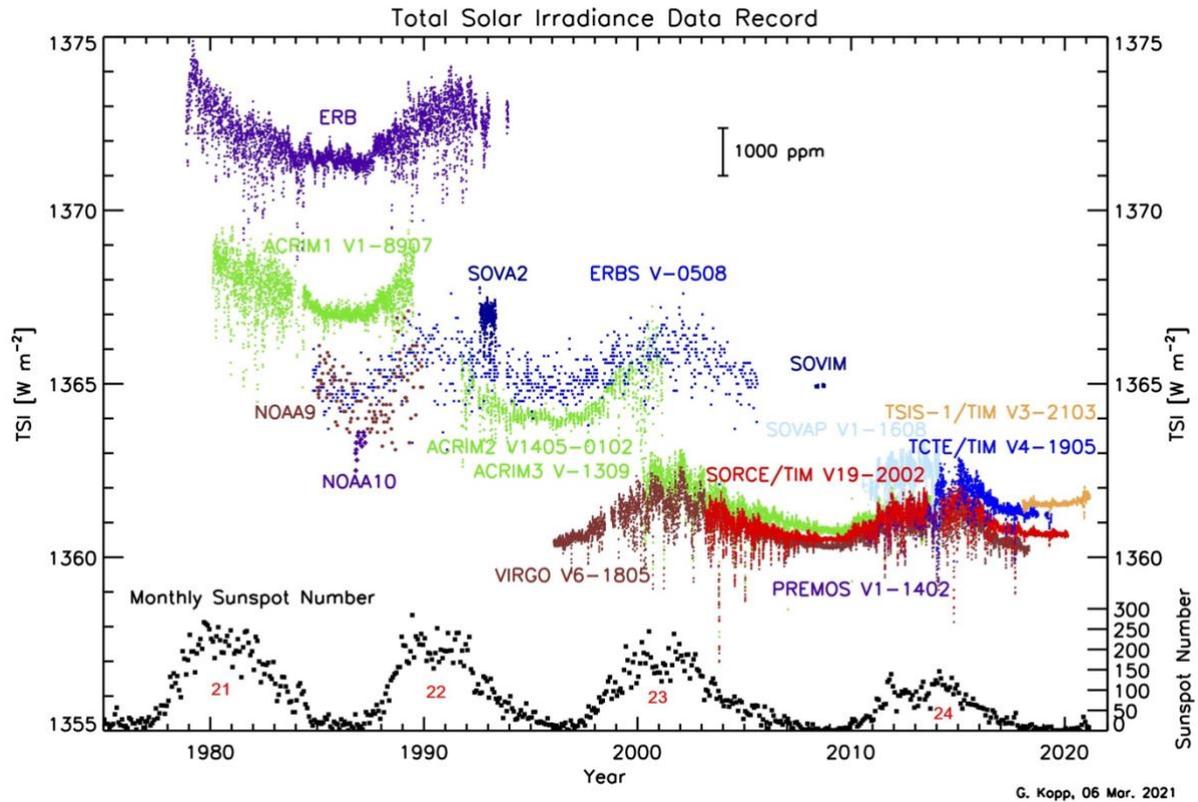


Figure 2a : Mesures de la TSI entre 1978 et 2020 (flux mesuré avec correction de distance satellite-Soleil) (*ici*). L'écart entre différents satellites atteint 12 W/m^2 soit $12/1361 \approx 1\%$. Dans la durée du cycle solaire de 11 ans, l'écart atteint au maximum 3 W/m^2 soit $3/1361 = 0,2\%$. La partie basse de la figure rapporte le 'Sunspot Number' supposé être un indicateur de la TSI.

10.2.2. Biais, reconstructions, variation séculaire, prévision. [4]

Biais de mesures :

La précision est limitée par l'étalonnage des instruments et surtout par la dégradation causée par les UV et rayons X (durée de vie des instruments < 15 ans, précision $\approx 0,25\%$ /siècle ; voir [ici](#) ou [là](#)).

Reconstructions des cycles solaires 21 à 24 :

Les reconstructions tentent de mélanger les observations des différents satellites pour obtenir un ensemble cohérent. Les reconstructions (Fig. 2b) indiquent une TSI $\approx 1361 \text{ W/m}^2$ pour ACRIM contre $\approx 1366 \text{ W/m}^2$ pour PMOD et IRMB.

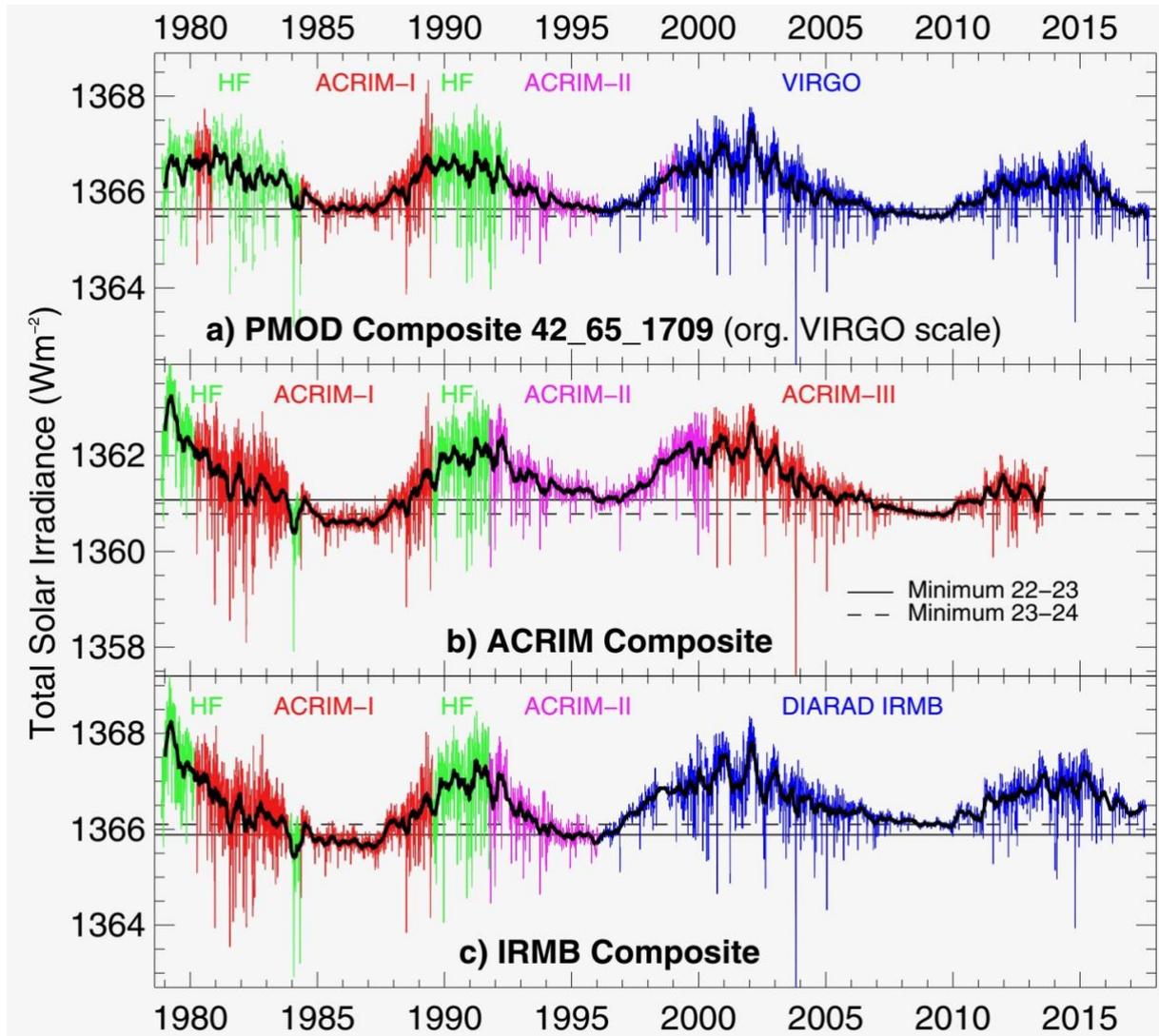


Figure 2b : Trois reconstructions de la TSI (*ici fig.2*) selon PMOD (Physikalisch Meteorologisches Observatorium Davos), ACRIM (Active Radiometer Irradiance Monitor) et IRMB (Institut Royal Météorologique de Belgique).

L'écart de 5 W/m^2 entre reconstructions correspond à une différence de puissance globale $\approx 0,7 \cdot 10^{15} \text{ W} = \mathbf{0,7 \text{ PW}}$. Les reconstructions sont aussi en désaccord (*ici*) sur l'évolution (hausse/baisse) de la TSI lors des cycles 21 à 24.

Hausse ou baisse, l'évolution serait faible : pour $0,037\%$ par décennie (*ici*), la puissance globale en 40 ans varie de moins de $\mathbf{0,2 \text{ PW}}$.

Variation séculaire:

Lors du minimum de Maunder, la TSI est estimée, suivant les auteurs, entre 1354 W/m^2 et 1360 W/m^2 (*ici fig.2*).

La croissance de la TSI depuis 1700 pourrait donc aller jusqu'à $(1366-1354) = 12 \text{ W/m}^2$, soit une hausse de la puissance globale $\approx \mathbf{+ 1,5 \text{ PW}}$. D'autres publications estiment la croissance depuis 1700 à 2 W/m^2 , correspondant à une hausse de la puissance globale $\approx 0,25 \text{ PW}$. La dernière partie de l'article reviendra sur un débat important : la variation **séculaire** du flux solaire est-elle négligeable par rapport à l'hypothèse du GIEC d'un « forçage radiatif » correspondant à $\approx \mathbf{1 \text{ PW}}$? Notons que le

déséquilibre des flux ($\approx 0,2$ PW au § 1.3) est **largement inférieur** à l'hypothèse d'un « forçage radiatif » ≈ 1 PW.

Prévision des cycles solaires:

Le cycle solaire 24, peu intense, n'a pas vraiment été anticipé, ce qui doit inciter à la prudence pour la prévision à long terme du flux solaire. Certains modèles ([Zharkova](#)) semblent prometteurs mais demandent à être confirmés.

10.2.3. Estimation de la puissance solaire moyenne 1980-2020 [5]

Les mesures les plus anciennes rapportent, pour la TSI, des valeurs de l'ordre de 1365 à 1374 W/m². Les mesures **récentes**, utilisant des [radiomètres actifs](#) à cavités, indiquent une TSI entre 1359 et 1363 W/m². En retenant, pour les 40 ans d'observation, une TSI **moyenne** de **1361** W/m² et un **disque** de rayon 6371 km + **12** km (atmosphère) qui intercepte le flux solaire, on obtient (moyenne pluriannuelle) la puissance globale $\approx 174 \cdot 10^{15}$ W soit 174 Pétaawatts = **174 PW**.

A la TOA (rayon 6371 km + **100** km), on intercepte théoriquement $P = 179$ PW.

Suivant le moment de l'année **et** du cycle solaire de 11 ans, la puissance **instantanée** est comprise entre **168 PW et 180 PW**. En retenant une incertitude sur la TSI de ± 2 W/m² (sur plusieurs cycles solaires) et une incertitude sur le disque intercepteur de ± 12 km, on obtient l'estimation **P = 174 PW ± 1 PW**.

Conclusions

- A cause de la distance Terre-Soleil et du cycle solaire de 11 ans, la puissance globale **instantanée** reçue par le système Terre/atmosphère en provenance du soleil **varie** entre 168 PW et 180 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$).
- Suivant le rayon du disque qui **intercepte** le flux solaire, la puissance globale (**moyenne annuelle**) passe de 173 PW (altitude 0km) à 179 PW (altitude 100 km). L'article propose d'adopter une puissance globale entrante de **174 PW ± 1 PW** (moyenne sur 40 ans).
- Lors des cycles solaires 21 à 24, la variation à long terme de la TSI (Total Solar Irradiance) correspond à **$\pm 0,2$ PW**, et le sens de variation (hausse /baisse/stabilité) reste incertain en raison de la courte durée de vie des instruments satellitaires.
- Les variations de température dans les océans semblent montrer, qu'au-dessus de l'atmosphère, les flux sortants équilibrent quasiment (à **0,1%** près soit **0,2 PW**) le flux solaire entrant. On peut toutefois s'interroger sur la [précision](#) des mesures dans l'océan.
- L'absence de modèle **confirmé** sur l'évolution du flux solaire devrait inciter à la prudence concernant les prévisions climatiques.

La suite de l'article présentera les ordres de grandeur pour les flux sortants au-dessus de l'atmosphère, à savoir la part réfléchie du flux solaire (RSF) et le flux infrarouge (OLR).

Références

[1] Bilan à la TOA

Measurement of the Earth Radiation Budget at the Top of the Atmosphere [Dewitte et Clerbaux 2017](#)
 CERES <https://ceres.larc.nasa.gov/science/>
 Terra/Aqua https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ_summaries/CERES_EBAF_Ed2.6_DQS.pdf
 Defining TOA Flux Reference Level [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C3301:DTOTAF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C3301:DTOTAF%3E2.0.CO;2)

[2] Ocean heat content

Système Argo <http://www.argo.net/>
Argo <https://argo.ucsd.edu/>
Océan OPS <https://www.ocean-ops.org/board?t=argo>
Données Argo <http://apdrc.soest.hawaii.edu/projects/Argo/data/profiles/?F=2>
Levitus et al 2000 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2004GL021592>
Levitus et al 2012 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012GL051106>
Carton Santorelli 2008 <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/21/22/2008jcli2489.1.xml>
Argo floats versus cruise CTD <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2006JC003825>

[3] TSI

Fröhlich 2012 Total Solar Irradiance Observations <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-011-9168-5>
Measuring absolute Total Solar Irradiance https://www.bipm.org/cc/CCPR/Allowed/23/CCPR16_49_PMODWRC-CCPR_23.9.16.pdf
Magnitudes and timescales of total solar irradiance variability G. Kopp 2016 <https://doi.org/10.1051/swsc/2016025>
TSI data <https://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/>
TSI Daily Average TIM https://lasp.colorado.edu/lisird/data/tsis_tsi_24hr/
Long-term TSI variability trends <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/78199.pdf>
NCAR UCAR TSI <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/total-solar-irradiance-tsi-datasets-overview>
Dr G. Kopp <https://spot.colorado.edu/~koppg/TSI/>
UARS/ACRIM TSI <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/uars.html>

[4] Reconstructions TSI

Scafetta et Willson 2019 <https://www.hindawi.com/journals/aa/2019/1214896/>
Methodology to create a new TSI record <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL071866>
Revised historical solar irradiance forcing <https://arxiv.org/pdf/1804.00287.pdf>
Millennium scale reconstruction TSI <https://www.issibern.ch/teams/solforceinput/wp-content/uploads/2017/07/ERozanov-Chrons.pdf>
ACRIM TSI satellite composite validation vs TSI proxy models <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10509-013-1775-9>
<https://www.pmodwrc.ch/forschung-entwicklung/sonnenphysik/tsi-composite/>
<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2011/07/aa15843-10.pdf>
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2020.0077#RSPA20200077F2>

[5] La feuille de calcul [Puissances en jeu 1.xls](#) met en forme les données d'observation.

[11. Puissances en jeu dans le système Terre/atmosphère \(2/3\)](#)

Mis en ligne : 06.08.2021

Flux sortants de l'atmosphère

La première partie de l'article ([ici](#)) a exploré le bilan énergétique entre flux entrants et flux sortants, ainsi que les caractéristiques du flux solaire entrant. Cette deuxième partie présente les ordres de grandeur pour les **rayonnements qui sortent** de l'atmosphère : à savoir le flux infrarouge émis par le système Terre/atmosphère et la **partie réfléchie** du flux solaire. Ces 2 flux ont-ils varié depuis 1980?

11.1. Introduction

Depuis 1980, on mesure, au-dessus de l'atmosphère (TOA = Top of Atmosphère), les flux énergétiques [1] du système Terre/atmosphère.

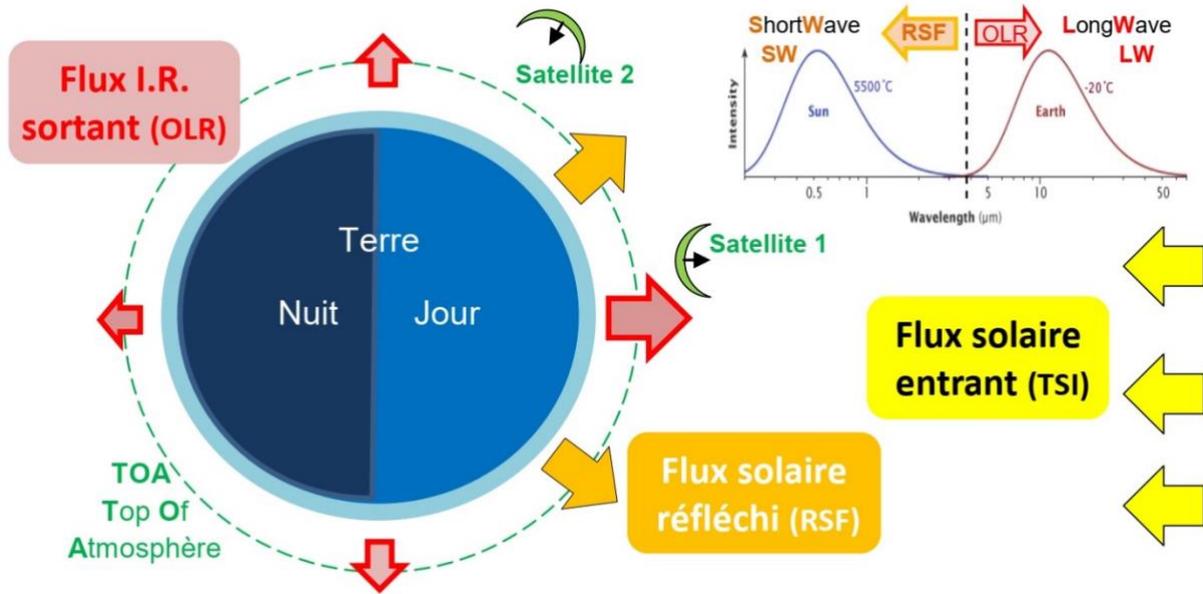


Figure 1. Les flux énergétiques **au-dessus** de l'atmosphère (TOA = Top of Atmosphère ≈ 100 km). Le flux sortant est séparé en 2 composantes suivant la longueur d'onde: flux IR [2] émis par le système Terre/atmosphère (OLR) pour $\lambda > 4 \mu\text{m}$ (LW = LongWave) et flux solaire réfléchi (RSF) [3] pour $\lambda < 4 \mu\text{m}$ (SW = ShortWave), flux lié à la couverture nuageuse [4]. Les flux **instantanés** sont les plus élevés côté jour, dans la zone 30S-30N.

11.2. Rayonnement IR

Le flux infrarouge (OLR = Outgoing Longwave Radiation) est mesuré depuis 1979 à l'aide de satellites équipés de radiomètres [2]. Par exemple, CERES/ERBE ([ici](#)) utilise un radiomètre à trois canaux : 0,3-5 μm (SW), 0,3-200 μm (TOT) et 8-12 μm (WN, désormais remplacé par un canal LW 5-35 μm). On peut ainsi séparer, **suivant la longueur d'onde**, le flux sortant IR (OLR) et le flux ondes courtes = SW, interprété comme solaire réfléchi (RSF). L'incertitude ([ici](#)) proprement instrumentale doit être majorée à cause **des nombreuses corrections/modélisations** ([ici](#) ou [là](#)).

11.2.1. Le rayonnement IR sortant est surtout émis dans l'atmosphère tropicale.

Le rayonnement IR sortant dépend de la position géographique, du moment de la journée et de la saison. La figure ci-dessous illustre la **moyenne** des observations + modélisations/ corrections sur **plusieurs années**.

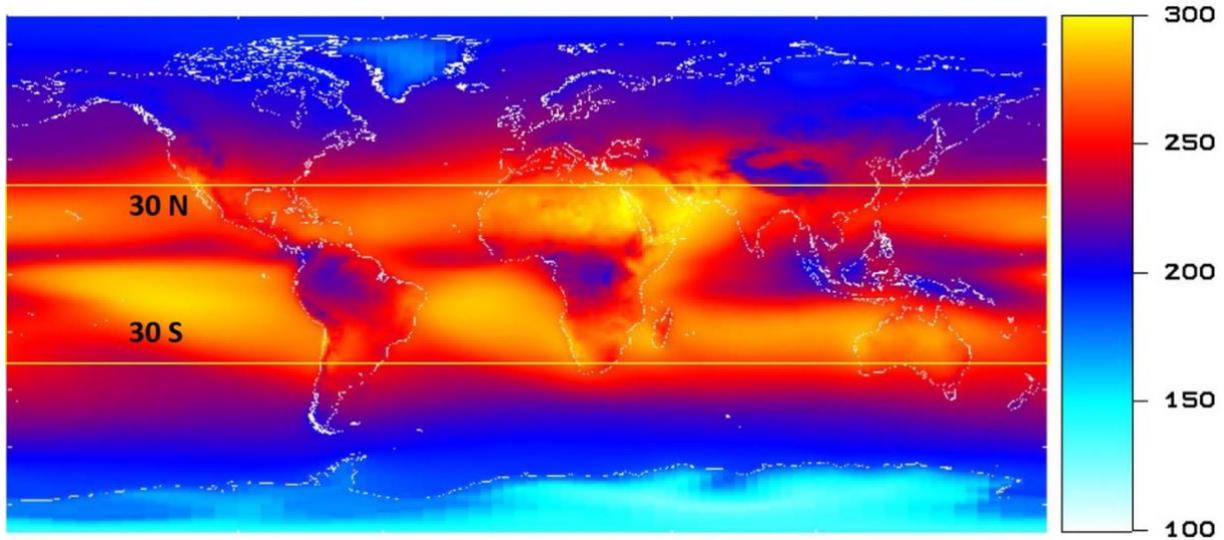


Figure 2a. Rayonnement ORL moyen sur 16 ans (Mean all sky CERES OLR 2001-2017) d'après fig 1 ici.

Notons que les zones tropicales concentrent l'essentiel des émissions IR et que les zones fortement émettrices sont peu corrélées avec les limites des continents. L'émission infra-rouge se produit donc principalement dans l'atmosphère, entre les latitudes 30S et 30N, zone correspondant à 50% de la surface du globe.

11.2.2 Le rayonnement IR sortant est variable dans l'année

Cette [animation](#) illustre les variations du rayonnement IR, mois par mois, sur plusieurs années, et permet d'observer l'influence de la distance Terre/Soleil ainsi que le balancement des saisons. La figure 2b ci-dessous compare les effets saisonniers pour le flux solaire entrant et le flux IR sortant.

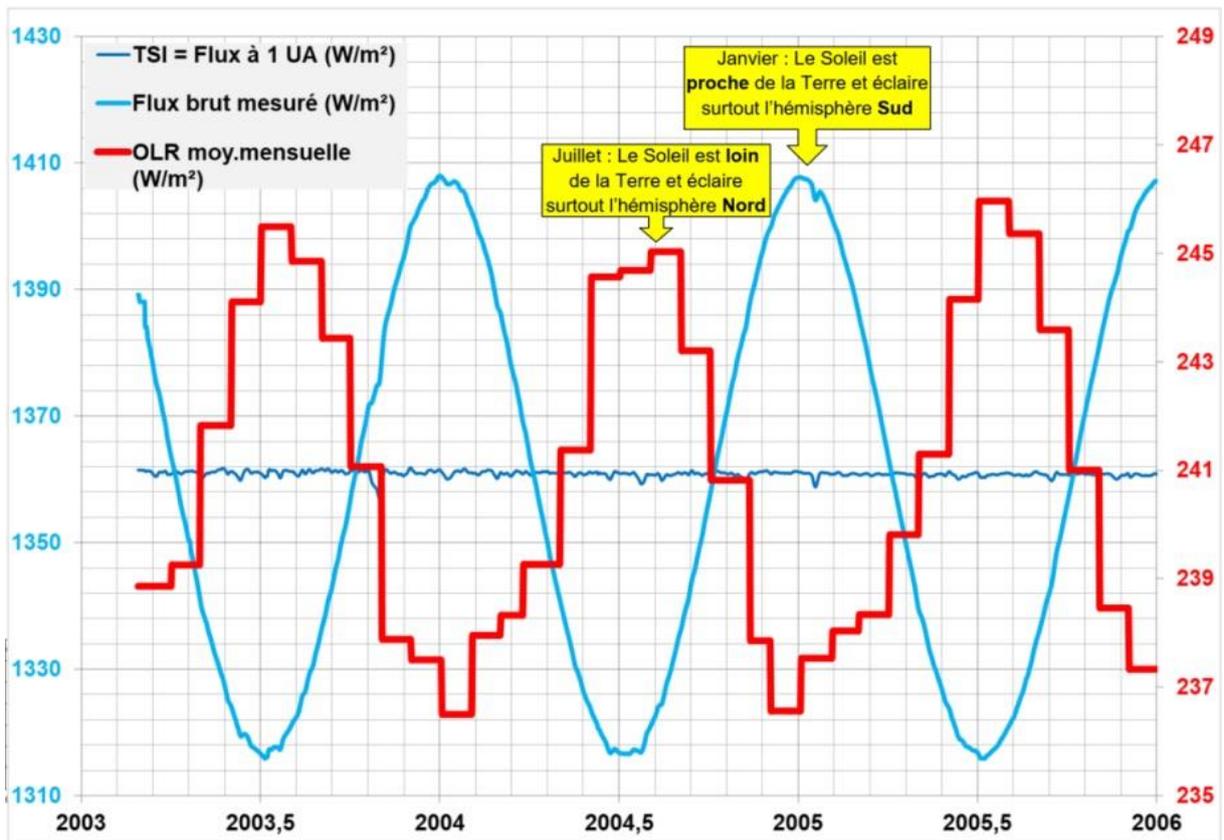


Figure 2b. Les flux réels reçus (solaire en bleu) et émis (IR en rouge) par le système Terre/atmosphère entre 2003 et 2006

[5] (sources [ici](#) et [ici](#)). La courbe bleue donne les mesures **brutes** (non corrigées pour 1 UA) du flux solaire entrant. La courbe bleu foncé correspond à la TSI : les mesures brutes sont **corrigées** pour obtenir une valeur théorique à 1 UA du Soleil.

- On remarque l'**opposition** de phase entre flux IR sortant (en rouge) et flux solaire incident (en bleu). En janvier, **l'OLR est minimal** ([ici](#) fig.4a) **alors que le flux solaire est maximal**, l'inverse se produit en juillet.
- Entre 2003 et 2006, début janvier (périhélie), le flux solaire réel est proche de 1406 W/m^2 ; début juillet (aphélie), il est proche de 1316 W/m^2 , soit une variation de $90 / 1361 = 6,6\%$ **ou $\pm 3,3\%$** . Les variations **relatives** du flux IR $(246-237)/241 \approx 3,7\%$ ou **$\pm 1,9\%$** sont plus faibles que celles du flux solaire. En 6 mois, les puissances globales instantanées varient (en opposition) de $\approx 11,5 \text{ PW}$ ($P = \text{Péta} = 10^{15}$) pour le flux solaire entrant et $\approx 4 \text{ PW}$ pour le flux IR sortant.
- Non représenté ici, le flux solaire réfléchi RSF (voir figure 3c) est **en phase** avec le flux solaire entrant: maximal en janvier et minimal en juillet.

11.2.3. Le rayonnement IR sortant est en croissance

Plusieurs institutions fournissent les données **après traitements/corrections**. La figure ci-dessous illustre l'évolution de ce flux infrarouge depuis 1980.

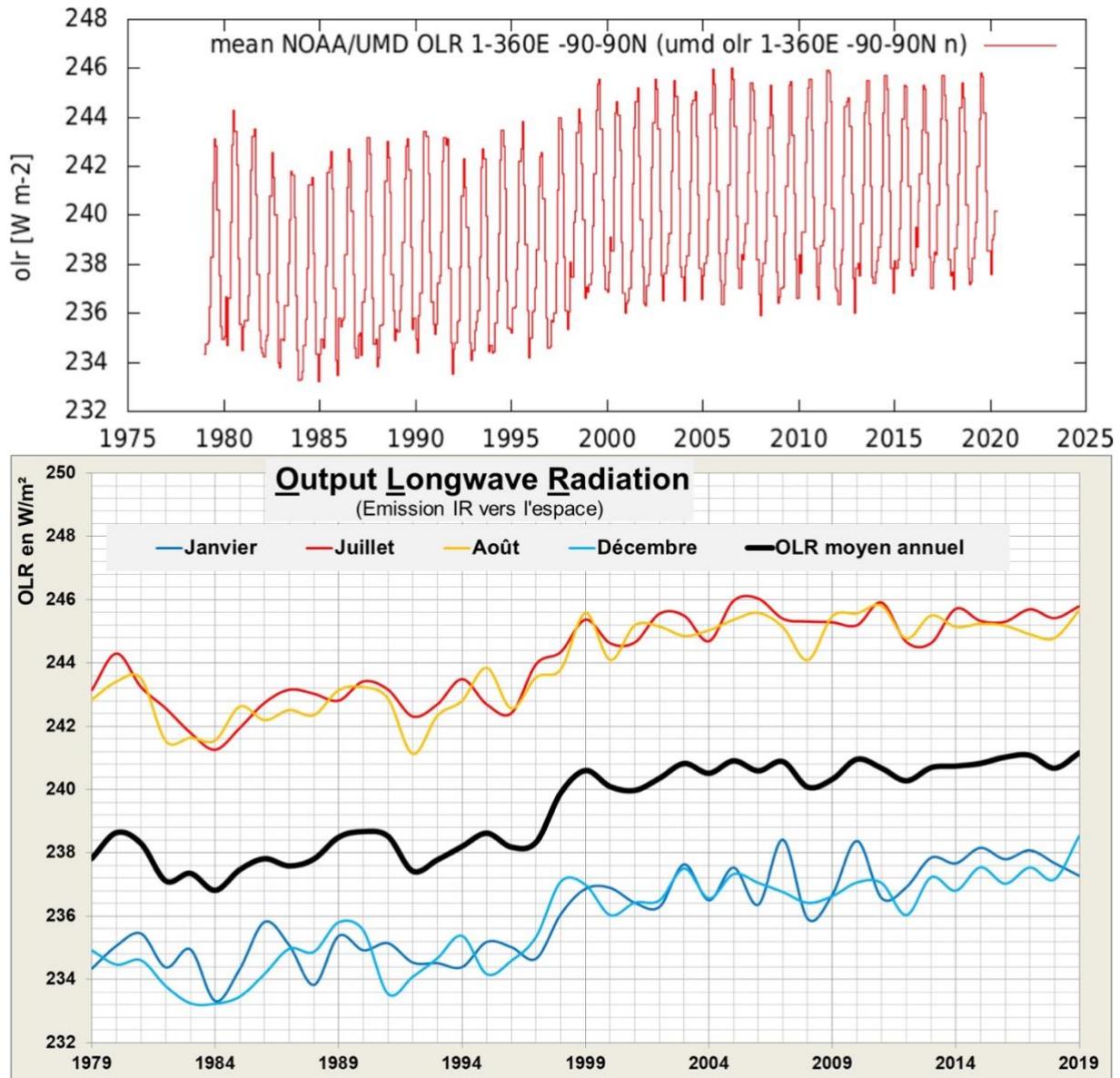


Figure 2c. Le rayonnement IR sortant est **en croissance** au cours des 4 décennies de mesures [5] (source NOAA/UMD , voir aussi [ici](#)). **En haut** : OLR mensuel (W/m²) entre 1980 et 2020, **en bas** : OLR min, max, moyen annuel.

- On retient pour l'article la moyenne sur 40 ans ($\approx 239 \text{ W/m}^2 \pm 2,5 \text{ W/m}^2$) correspondant à la puissance totale IR sortante $\approx 122 \text{ PW} \pm 1,3 \text{ PW}$ ($P = \text{Péta} = 10^{15}$).
- En comparant la moyenne 1979-1983 versus moyenne 2015-2019 [5], on trouve une croissance relative de $(241-237,7) / 237,7 = +1,4\%$. Cette croissance correspond à une puissance supplémentaire $(241-237,7) * 5,12 \cdot 10^{14} = 1,68 \cdot 10^{15} \text{ W} \approx +1,7 \text{ PW}$, supérieure à la marge d'incertitude de $\pm 1,3 \text{ PW}$.
- Cette croissance (+ 1,7 PW soit + 1,4%) du rayonnement infrarouge sortant est **moins médiatisée** par le GIEC ou l'OMM que la croissance des indicateurs de température UAH ou RSS (+0,6 K soit + 0,2%).
Peut-être faut-il éviter de troubler l'opinion publique avec ce nouveau mystère de « l'effet de serre » : plus il y a de CO₂ et plus le rayonnement infrarouge s'échappe vers le vide spatial.

11.3. Rayonnement solaire réfléchi

11.3.1. Albédo moyen

La **fraction** de l'énergie solaire entrante réfléchi par le système Terre/atmosphère vers l'espace est appelée **albédo planétaire**. L'albédo est donc calculé à partir des ondes courtes (SW) analogues au spectre solaire. L'albédo, variable dans l'année (*animation ici*), **dépend surtout de l'atmosphère** (aérosols et vapeur d'eau). La figure ci-dessous illustre l'albédo **moyen annuel**.

Total Sky Albedo

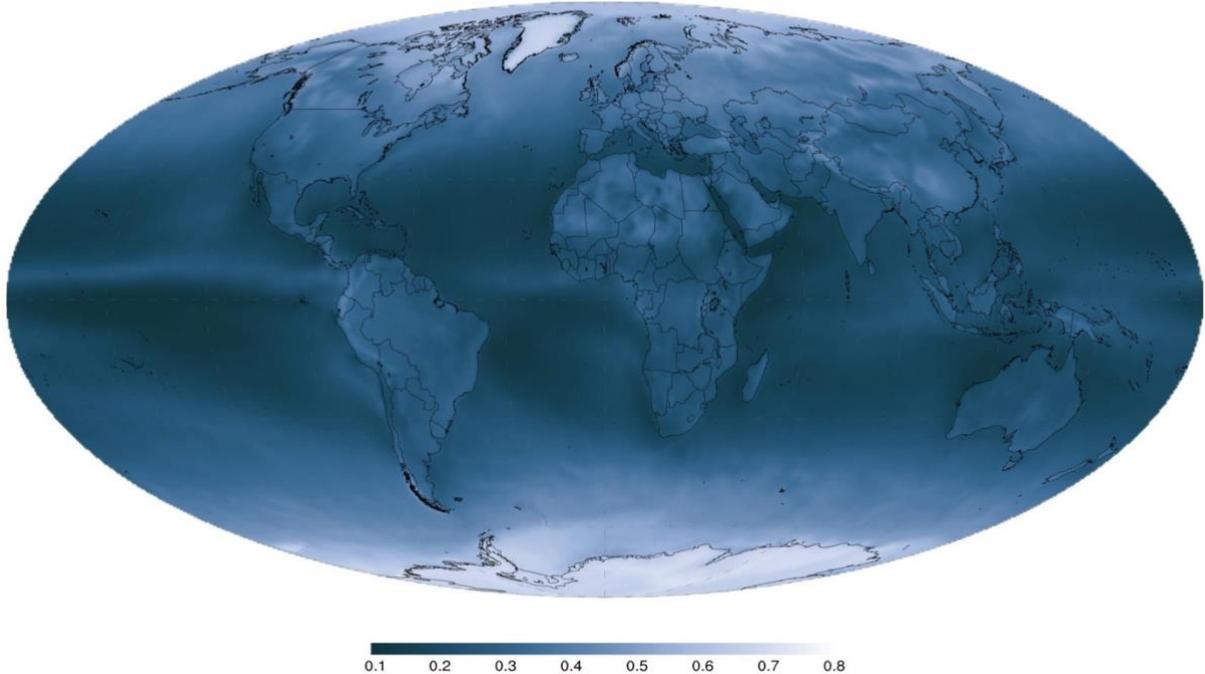


Figure 3a. Mean annual total sky albedo CERES-Aqua 2003-2004 (ici). L'albédo moyen annuel $\approx 0,27$ à $0,32$ (selon *Nasa*, albédo = $0,306$). Entre un albédo moyen de 30% ou de 31%, l'écart de puissance, pour le rayonnement solaire réfléchi, correspond à $\approx 1,7$ PW. L'albédo indique seulement le **rapport** entre flux solaire entrant et flux réfléchi: le flux réfléchi (W/m^2) dépend donc de la **valeur** du flux solaire entrant. Le paragraphe suivant présente ce flux **réfléchi** [3].

11.3.2 Flux solaire réfléchi moyen.

La couverture nuageuse est la source de la majorité du flux solaire réfléchi (désigné indifféremment par RSF, RSR, flux SW avec $\lambda < 4 \mu m$). La figure ci-dessous donne la moyenne des mesures + **modélisations/corrections** sur une décennie.

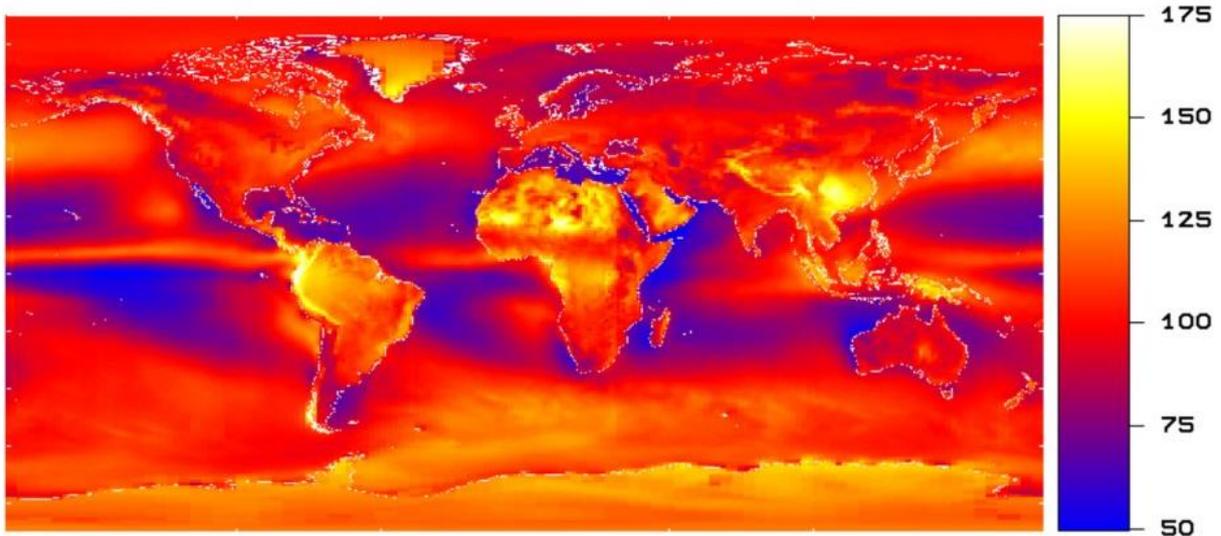


Figure 3b. Reflected Solar Flux en moyenne décennale selon CERES (*ici*).
La moyenne sur 10 ans, varie, selon la zone géographique, entre 50 et 175 W/m².

11.3.3 La variabilité saisonnière : une contre-réaction.

Début janvier, la Terre est proche du Soleil et le flux solaire entrant est **maximal**. Il en est de même pour sa **part réfléchie** dont la variation saisonnière est illustrée par la figure ci-dessous.

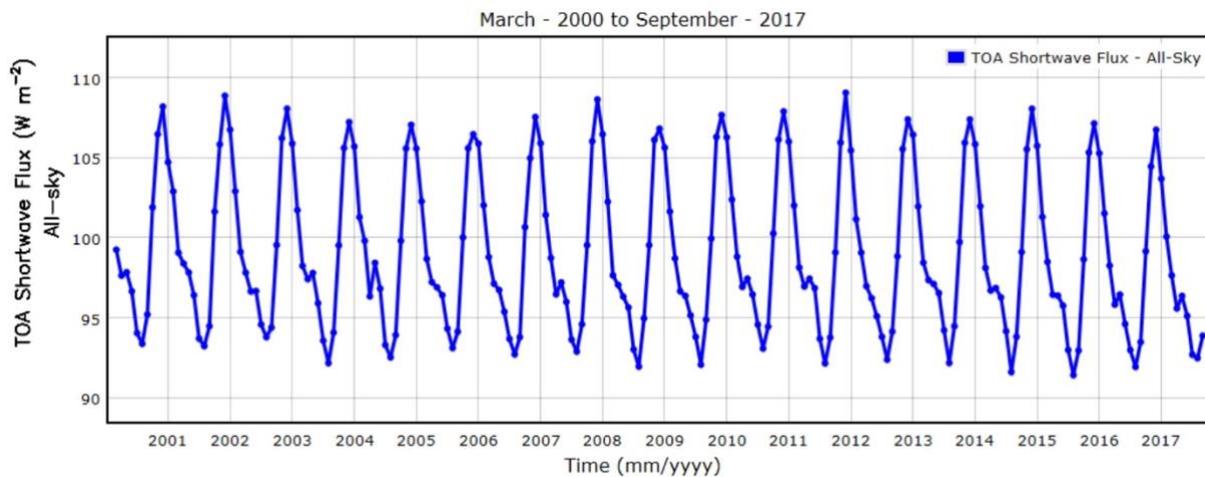


Figure 3c. Variation saisonnière 2000-2017 du flux solaire réfléchi RSF = flux SW (selon CERES).
Entre 2000 et 2017, le flux réfléchi est maximal en janvier ($\approx 109 \text{ W/m}^2$ soit 56 PW), il est minimal en juillet ($\approx 93 \text{ W/m}^2$ soit 48 PW). La variation **relative** est de $\pm 7,5\%$ alors que le flux solaire entrant (en phase avec RSF) varie **seulement** de $\pm 3,3\%$. Il existe donc **aussi** une variation annuelle de l'albédo, ce **qui constitue une contre-réaction** à la variation du flux solaire entrant (*ici* fig. 5d).

Grâce à cette variation d'albédo (couverture neigeuse + couverture nuageuse), le flux solaire **net** = [flux solaire entrant – flux solaire réfléchi] est **peu variable**. En 6 mois, la variation de puissance du flux solaire entrant est $\approx 11,5 \text{ PW}$ alors que la puissance pour le flux solaire **net** varie seulement de $\approx 4 \text{ PW}$ ($\approx 8 \text{ PW}$ si albédo constant ou pas de contre-réaction). La puissance mise en jeu dans cette contre-réaction naturelle ($8 - 4 = 4 \text{ PW}$) est **supérieure** à celle de l'« effet de serre/forçage radiatif » ($\approx 1 \text{ PW}$), hypothèse défendue par le GIEC ou l'OMM.

11.3.4 Influence de la couverture nuageuse.

La figure ci-dessous illustre la corrélation entre le flux solaire réfléchi (flux SW) et la couverture nuageuse.

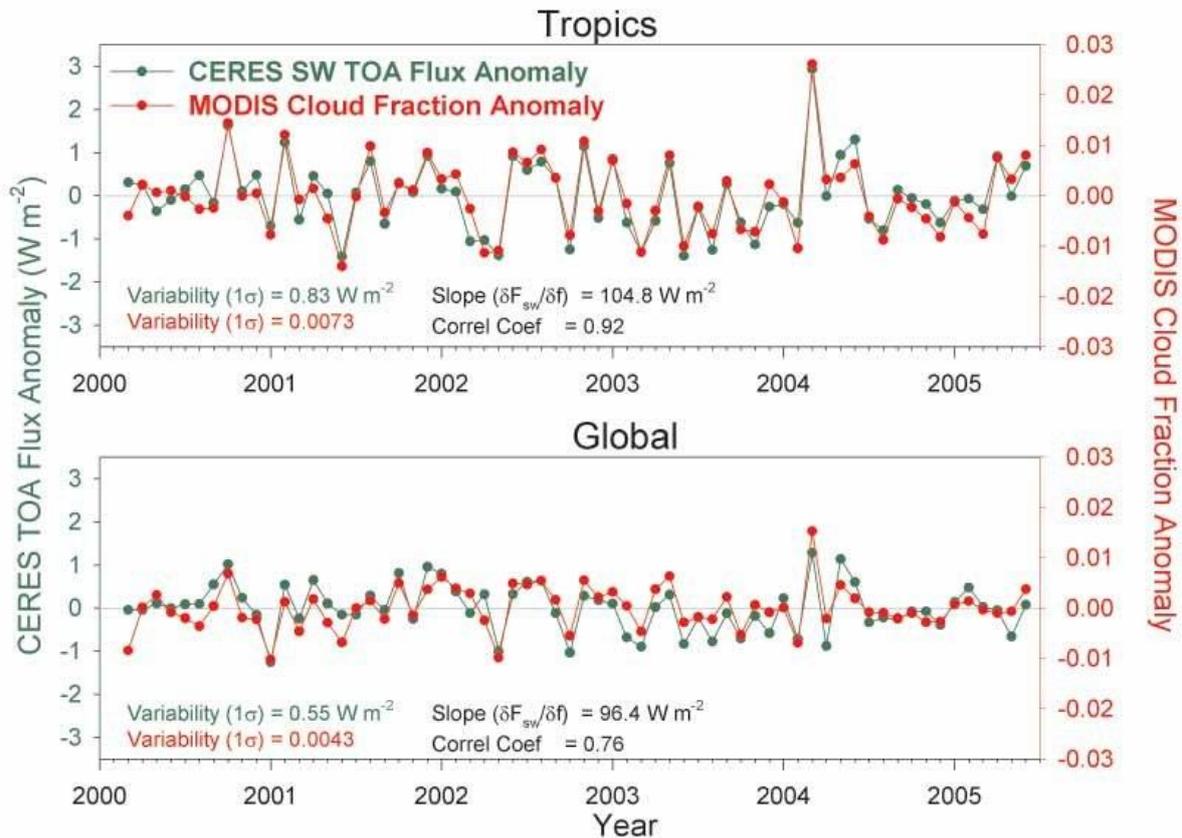


Figure 3d. Anomalie désaisonnalisée du flux SW à la TOA versus couverture nuageuse (selon fig 16 ici). La corrélation flux SW/couverture nuageuse est excellente dans la zone tropicale, zone où le flux SW est le plus élevé.

- Le flux solaire réfléchi est influencé par la **couverture nuageuse tropicale** que l'on ne sait pas prévoir pour les prochaines décennies. Il y a là une **difficulté majeure** pour des prévisions **scientifiques** sur le climat.
- On suspecte des influences **indirectes** sur l'albédo: la partie UV du spectre solaire (ici) ainsi que le flux de particules extraterrestres (ici §4) pourraient **modifier la couverture nuageuse** et donc le flux solaire réfléchi.

L'incertitude sur la **mesure** de RSF (ici) est affectée par les **nombreuses corrections + modélisations** utilisées. **Aucun** instrument n'a effectué de mesures en continu pendant 40 ans et les modélisations/corrections dépendent de la compréhension de la couverture nuageuse. L'article retient, pour la **moyenne pluriannuelle**, un flux solaire réfléchi (RSF) de $101,5 \pm 3 \text{ W/m}^2$ correspondant à la puissance globale $P \approx 52 \text{ PW} \pm 1,5 \text{ PW}$.

11.4. Puissances globales moyennes au-dessus de l'atmosphère.

L'article adopte les valeurs moyennes suivantes: TSI = 1361 W/m² (**341 W/m²**); RSF = **101,5 W/m²** ; OLR = **239 W/m²**. Pour comparaison, l'AR5 à la figure 2.11 propose : incoming solar **340 W/m²**, solar reflected **100 W/m²**, Thermal outgoing **239 W/m²** ; tandis que Dewitte et Clerbaux (2017) proposent : TSI = 1362 W/m² (**340,5 W/m²**), Albédo = 0,298 soit RSF=**101,6 W/m²**, OLR=**238 W/m²**.

Le schéma ci-dessous illustre les puissances **globales** (moyennes **pluriannuelles**), pour l'ensemble du système Terre/atmosphère.

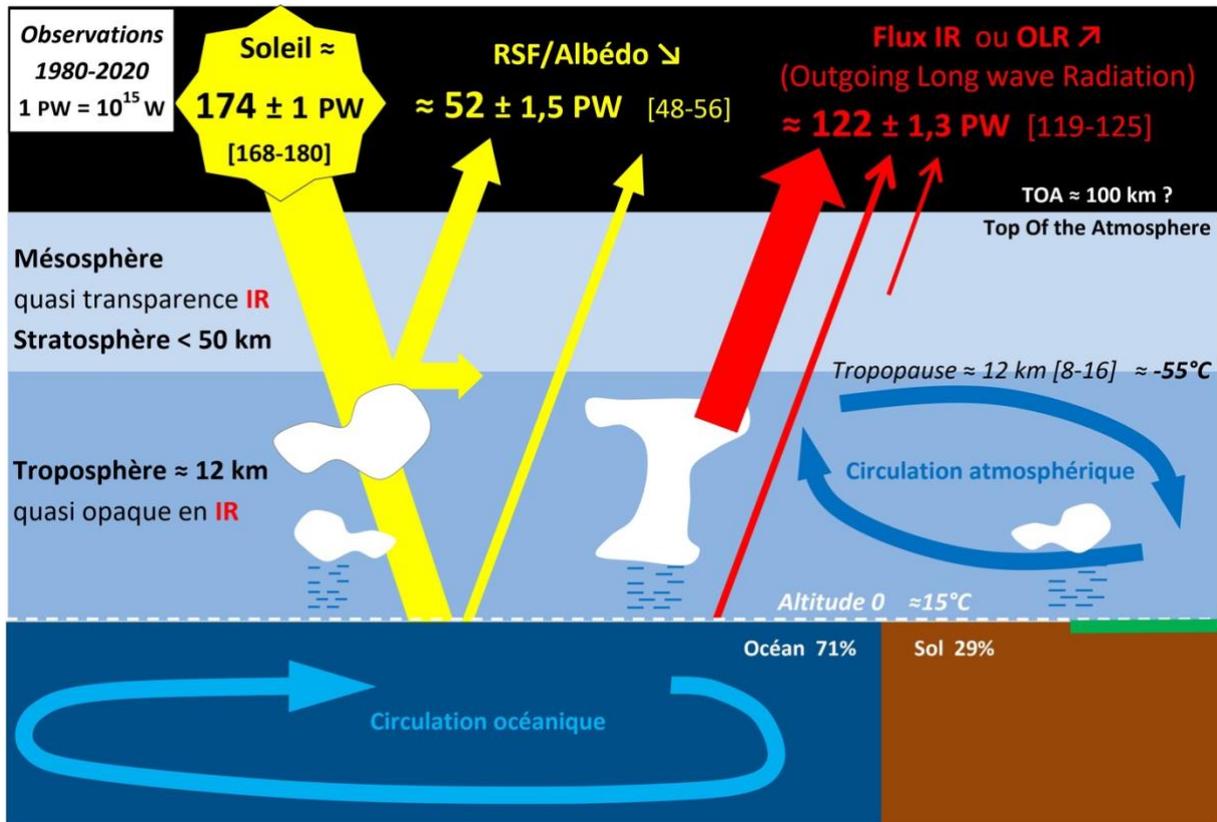


Figure 4a. Les puissances moyennes globales au-dessus de l'atmosphère.

Les valeurs entre crochets donnent les extrêmes pour les puissances instantanées : en juillet, le maximum pour l'IR correspond à un minimum pour le flux solaire entrant et le flux solaire réfléchi ; l'inverse se produit en janvier lorsque la Terre est proche du Soleil.

- En 40 ans, la variation (hausse? baisse?) de la puissance solaire semble inférieure à 0,2 PW (ici § 2,2), et on semble proche de l'équilibre (à 0,2 PW) entre flux entrant et sortants (ici § 1,3). Dans ces conditions, la hausse du flux IR sortant (+ 1,7 PW selon NOAA/UMD) devrait être compensée par une **légère baisse du flux solaire réfléchi**.
- Ce sens probable (voir ici) des variations est indiqué à la figure 4a et la figure ci-dessous illustre les évolutions opposées des flux sortants.

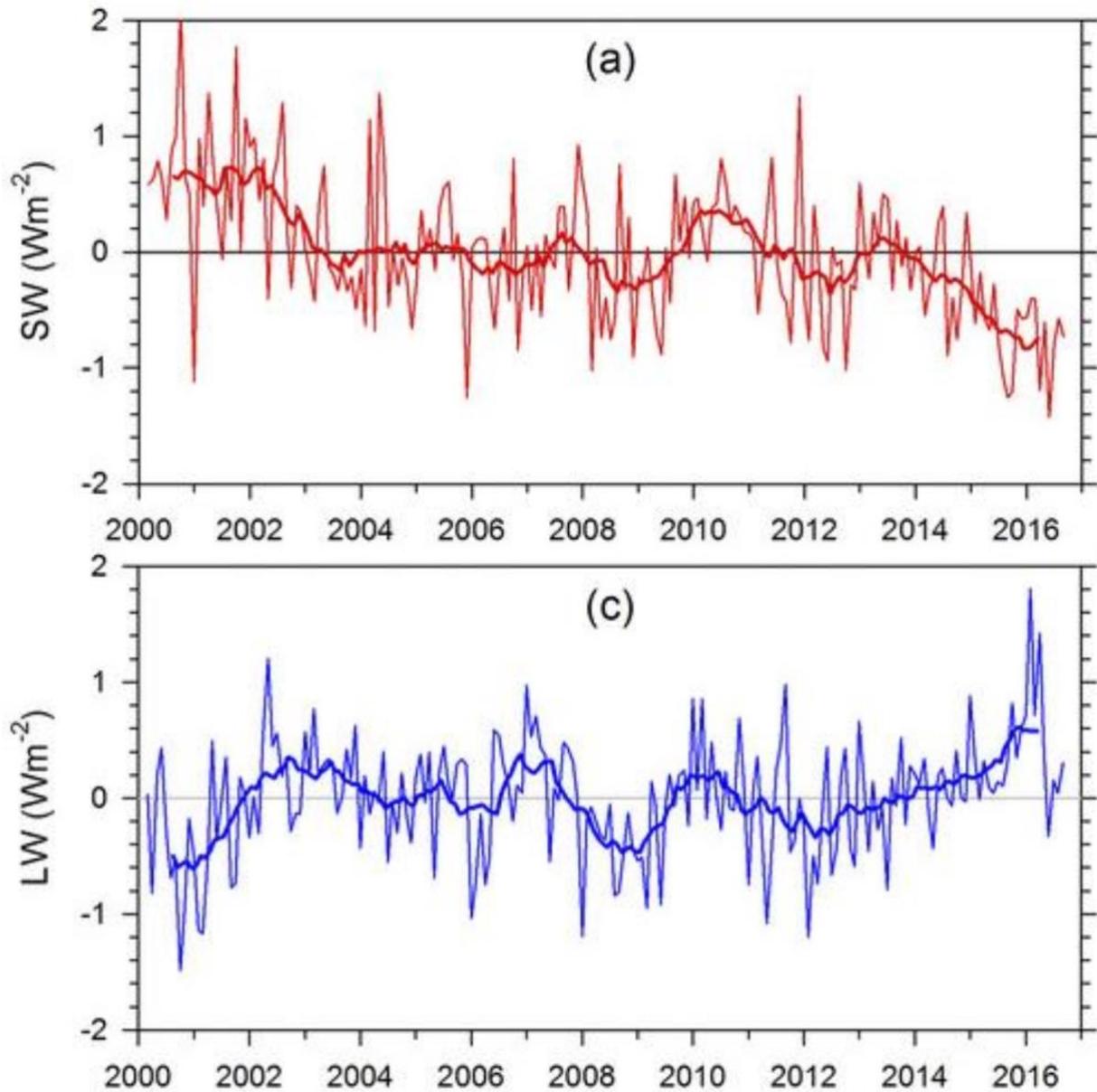


Figure 4b. Variations 2000-2016 des flux sortants (selon fig 9 ici) : légère baisse pour le flux solaire réfléchi (SW = RSF), légère hausse pour le flux IR (LW = OLR).

11.5. Conclusions

- Depuis 40 ans, les mesures par satellites ont amélioré la connaissance des flux énergétiques **au-dessus** de l'atmosphère. Néanmoins, **la précision est insuffisante** pour mettre directement en évidence un éventuel déséquilibre (sur le long terme) pour la puissance entre le flux solaire entrant ≈ 174 PW et les flux sortants ≈ 122 PW + 52 PW (1 PW = 10^{15} W).
- Elaborées à partir de mesures brutes sur **plusieurs** instruments satellitaires, les estimations des flux sortants sont **très dépendantes** de multiples corrections et modélisations concernant la distribution angulaire et l'heure locale.

- Il est particulièrement difficile de prévoir l'évolution à long terme du flux solaire **réfléchi**, lié à la couverture nuageuse. Un simple changement de 1% sur l'albédo correspond à une modification $\approx 1,7$ PW pour la puissance solaire réfléchie.
- Plus généralement, **aucun** des 3 flux (solaire entrant, solaire réfléchi, infra-rouge sortant) ne dispose actuellement d'un modèle **confirmé**, permettant d'anticiper leur valeur. La prévision **scientifique** du climat reste donc, à ce jour, un projet très optimiste voire hasardeux.
- En 6 mois, la variation de la distance Terre-Soleil entraîne un changement $\approx 11,5$ PW pour la puissance solaire entrante, mais le système Terre/atmosphère est capable de s'**adapter naturellement** pour compenser partiellement ce changement de puissance.
- Grâce à la couverture nuageuse, un léger rééquilibrage des 2 flux sortants s'est peut-être produit en 40 ans : une faible **hausse du flux IR** aurait été en partie compensée par une faible baisse du flux solaire réfléchi.
- Sur 4 décennies, l'**augmentation simultanée** du flux infrarouge sortant et du CO₂ atmosphérique peut susciter des interrogations. La notion d'« effet de serre », si chère aux organismes intergouvernementaux, serait-elle comparable à la notion d'éther dans la physique du XIX^e siècle ou même à l'impetus dans la physique médiévale?

La dernière partie de l'article complètera le schéma de la figure 4a avec des estimations pour les puissances en jeu dans l'atmosphère. Une discussion sur l'attribution d'un éventuel déséquilibre entre flux entrant et sortants sera proposée.

Références

[1] BILAN

Dewitte et Clerbaux (2017) <https://gerb.oma.be/people/gerb/remotesensing-09-01143-v2.pdf>
 CERES <https://ep3vztogsi3zdd6p6fxpuoxcry-eres-larc-nasa-gov.translate.google/#ceres-carousel>
 NASA/CERES Earth's Energy Budget <https://ep3vztogsi3zdd6p6fxpuoxcry-eres-larc-nasa-gov.translate.google/science/#earths-energy-budget>
[The global radiative energy budget in MERRA](#)
 Dewitte, Clerbaux, Cornelis (2019) [Decadal Changes of the Reflected Solar Radiation and the Earth Energy Imbalance](#)
 Remote sensing of earth's energy budget: synthesis and review <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2019.1597189>

[2] OLR

The Climate Monitoring SAF Outgoing Longwave Radiation from AVHRR <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/6/929>
https://climexp.knmi.nl/select.cgi?umd_olr
<https://www.ncdc.noaa.gov/cdr/atmospheric/outgoing-longwave-radiation-daily>
<http://olr.umd.edu/>
<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
<https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00875>
<https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>
https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/28/1/2010jtecha1521_1.xml
<https://ceres.larc.nasa.gov/instruments/>
<https://www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1539>

[3] Albédo/RSF

The albédo of Earth <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/84499/measuring-earths-albedo>
<http://www.globalbedo.org/index.php>
<https://svs.gsfc.nasa.gov/30604#>
<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
http://research.iac.es/galeria/epalle/reprints/Palle_etal_Science_2004.pdf
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL068025>

https://www.researchgate.net/publication/271590174_The_Albedo_of_Earth
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006GL028196>
<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/24/2919/pdf>
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014RG000449>
[The Observed Hemispheric Symmetry in Reflected Shortwave Irradiance](#)
[Uncertainty in CERES Top-of-Atmosphere Fluxes Caused by Changes in Accompanying Imager](#)

[4] Couverture nuageuse

NASA Earth Observations Cloud fraction
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/31/2/jcli-d-17-0208.1.xml>

[5] La feuille de calcul [Puissances en jeu 2.xls](#) met en forme les données d'observation.

[12. Puissances en jeu dans le système Terre/atmosphère \(3/3\)](#)

Mis en ligne : 14.09.2021

Estimations complémentaires, influences anthropiques

La [première](#) partie de l'article a exploré l'équilibre 1980/2020 pour les flux énergétiques [1] ainsi que le flux solaire entrant, la [deuxième](#) partie a décrit les flux énergétiques sortants. Dans cette troisième partie, on tentera d'estimer quelques puissances en jeu à **l'intérieur** du système Terre/atmosphère. Un schéma récapitulatif pour les **puissances moyennes globales** est proposé ainsi qu'une discussion sur les influences anthropiques et solaires.

12.1. Puissances internes au système Terre/atmosphère.

12.1.1 Échantillonnage peu satisfaisant des mesures *in situ*.

Au sol, insolation et pluviométrie sont les deux grandeurs fondamentales pour le climat. Les mesures à l'altitude 0 (sol/océan) utilisent pyréliomètres / pyranomètres ([ici](#)) et [pluviomètres](#). A cause de la couverture nuageuse, pluviométrie et insolation sont **très variables** dans le temps (jour/mois/décennie). En réalité, il faut **quelques décennies de mesure** pour obtenir **une moyenne fiable en un lieu donné**. Malheureusement, les mesures de long terme sont à la fois **mal réparties** sur le globe et **trop peu nombreuses**. La zone 30S-30N (50% de la surface du globe), **la plus importante pour les puissances en jeu**, est sous-échantillonnée car à 75 % océanique.

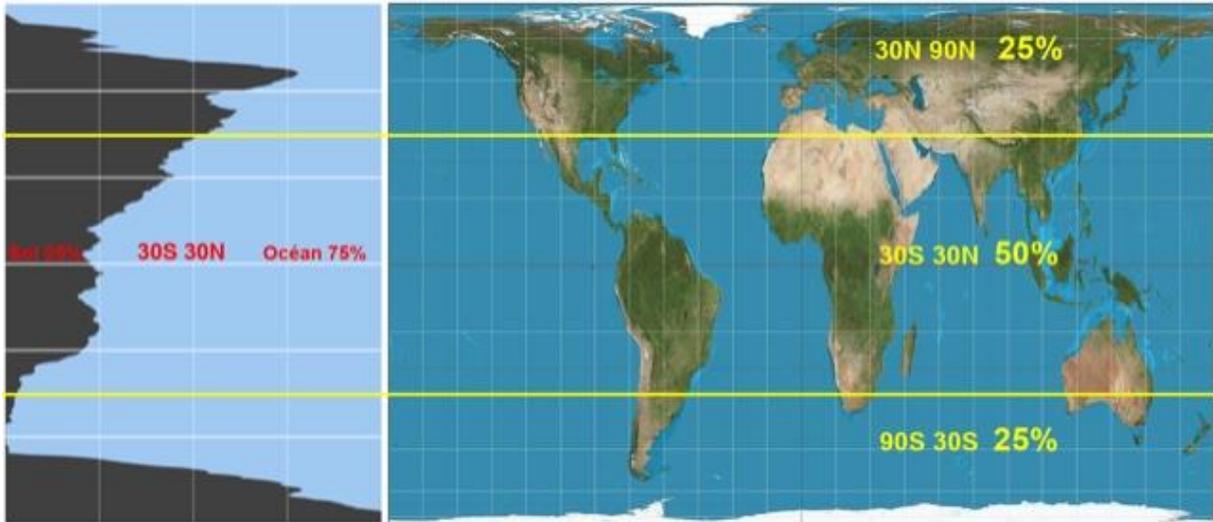


Figure 1 : A gauche : répartition land/ water (*ici*) ; A droite : Planisphère projection Gall-Peters (*ici*). Les mesures historiques 'in situ' se situent principalement **entre 30N et 90N** (25% du globe), et **sur les continents** (in fine **seulement 12%** du globe).

Sous-échantillonnage pour l'océan :

L'océan représente 71% du globe terrestre, soit $3,6 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$. Pour disposer de mesures tous les 10 km, il faudrait $3,6 \cdot 10^{14} / 10^8 = 3,6$ millions de capteurs, alors que nous disposons seulement de quelques milliers de bouées pour les mesures *in situ*.

Sous-échantillonnage pour l'atmosphère :

Avec une surface terrestre de $5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ et un sommet de l'atmosphère (TOA) $\approx 100 \text{ km}$, le volume à mesurer est $5,1 \cdot 10^{19} \text{ m}^3$. Pour disposer de mesures tous les 10 km, tous les 1000 m d'altitude, il faudrait $5,1 \cdot 10^{19} / 10^{11} = 51$ millions de capteurs. Mais, à un instant donné, seulement une centaine de radiosondes [2] sont présentes, *in situ* dans l'atmosphère .

12.1.2 Le cycle de l'eau est le phénomène majeur à l'altitude 0.

12.1.2.1 Puissance en jeu pour la vaporisation.

A partir de la pluviométrie moyenne du globe, il est possible d'estimer la puissance nécessaire pour la vaporisation de l'eau correspondante. Selon la FAO , il tomberait 814 mm d'eau par an sur les **terres** (29% du globe). Mais la pluviométrie semble plus importante sur les océans (71% du globe), où **les mesures sont récentes**, ce qui entraîne une grande incertitude sur la moyenne mondiale des précipitations (la pluviométrie est très variable: entre 0,02 m/an et 12 m/an) [3]. La figure ci-dessous illustre les mesures satellitaires récentes.

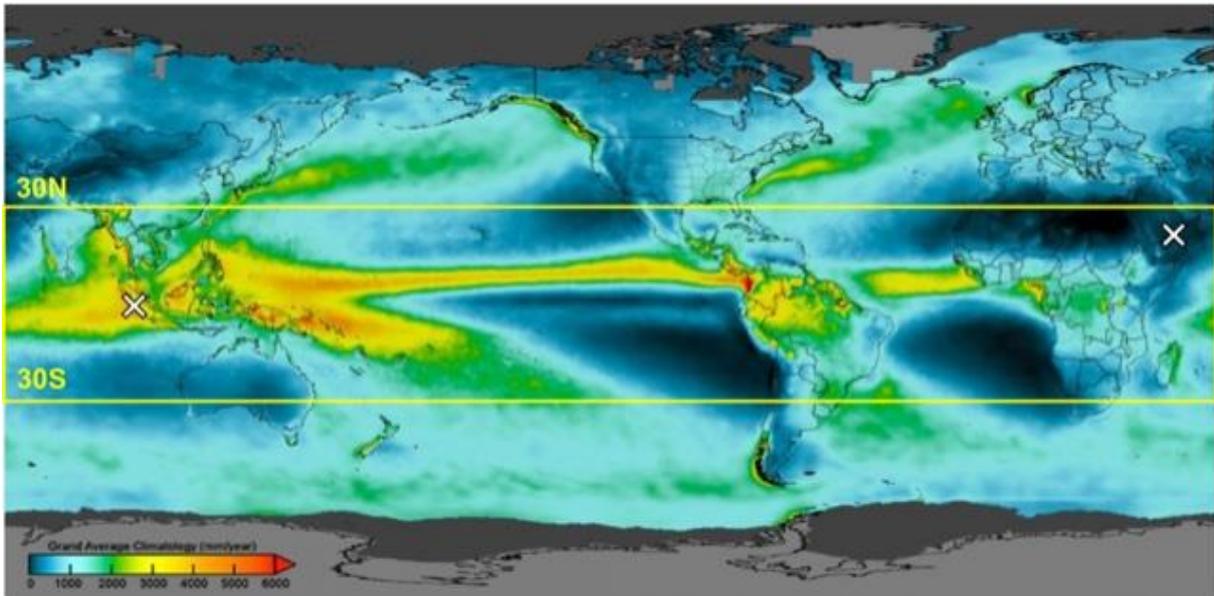


Figure 2 : The two-decade satellite precipitation record (*ici*) by GPM, TRMM and the GPM constellation satellites. Les précipitations sont abondantes sur l'océan entre 30S-30N.

Remarque : L'examen de cette figure 2 montre aussi les limites de tout calcul théorique (*exemple ici*) qui utiliserait une moyenne pour la quantité d'eau présente dans l'atmosphère. Un tel calcul serait largement faussé (croix fig. 2) pour la colonne atmosphérique au-dessus de l'île de Sumatra (très humide) comme au-dessus de la péninsule arabique (très sèche).

En retenant des précipitations moyennes $\approx 1,1$ m/an, soit 3,01 mm/jour, on estime les précipitations **journalières** à $\approx 1,54 \cdot 10^{15}$ kg. La puissance totale pour vaporiser ($2,454 \cdot 10^6$ J/kg) cette eau est $P = (1,1 \cdot 10^3 \cdot 5,1 \cdot 10^{14} \cdot 2,454 \cdot 10^6) / (365 \cdot 24 \cdot 3600) = 44 \cdot 10^{15}$ W = **44 PW** ($P = \text{Péta} = 10^{15}$) [6]. Pour comparaison, dans un article de 2020, Koutsoyiannis [4] propose 1290 ZJ/an, soit $1,29 \cdot 10^{24} / 3,16 \cdot 10^7 \approx 41$ PW.

12.1.2.2 De l'importance du cycle de l'eau.

- Les phénomènes d'advection/convection dans l'atmosphère mettraient en jeu une puissance de l'ordre de 9 PW (*voir ici*). Ainsi le cycle de l'eau (vaporisation océanique + évapotranspiration végétale + advection/convection) mettrait en jeu la puissance totale $\approx 44 + 9 =$ **53 PW**.
- La puissance solaire **entrante** au sommet de l'atmosphère est ≈ 174 PW et il n'en subsisterait, après traversée de l'atmosphère, qu'environ la moitié (92 PW) à l'altitude 0. Finalement, pour les puissances globales, le cycle de l'eau est le **phénomène majeur** à l'altitude 0 : il représente $53/92 =$ **58% de l'insolation brute**. En déduisant la part d'insolation réfléchie à l'altitude 0, on obtient $53/(92-13) =$ **67% de l'insolation nette**.
- La masse totale d'eau dans l'atmosphère est $\approx 1,3 \cdot 10^{16}$ kg (*ici*), ce qui permet d'estimer la durée de séjour d'une molécule d'eau dans l'atmosphère à $1,3 \cdot 10^{16} / 1,54 \cdot 10^{15} \approx$ **8,5 jours**. Mettant en jeu une puissance > 40 PW, avec un renouvellement en quelques jours, l'eau atmosphérique semble un **régulateur efficace** pour tout déséquilibre énergétique. Pour l'étude **scientifique** du climat, le cycle de l'eau et son évolution de long terme devrait être un sujet de recherche prioritaire.

12.1.3 Estimations complémentaires.

Le paragraphe 1.1 a montré la difficulté d'obtenir des moyennes de long terme basées sur des mesures *in situ* pour l'**ensemble** du globe. Les estimations retenues ci-dessous sont donc partiellement arbitraires.

- Un peu plus de la moitié de la puissance solaire entrante (174 PW) parviendrait à l'altitude 0 : environ 55% selon [Nasa/Ceres](#), mais environ 50% selon [cet article](#). On adopte $174 * 53\% = 92 \text{ PW} ?$
- Le flux solaire réfléchi ($\approx 52 \text{ PW}$) proviendrait à 75% de l'atmosphère, soit $P \approx 52 * 75\% \approx 39 \text{ PW} ?$
- Le solde doit nécessairement être intercepté **dans** l'atmosphère, soit $P \approx 174 - 92 - 39 = 43 \text{ PW} ?$
- Le flux solaire réfléchi proviendrait à 25% de l'altitude 0, soit $P \approx 52 * 25\% \approx 13 \text{ PW} ?$
- Dans les zones où l'atmosphère est sèche, la faible absorption atmosphérique permettrait à une portion de l'infrarouge émis depuis l'altitude 0 (principalement la gamme $8 \mu\text{m}/13 \mu\text{m}$), d'atteindre **directement** la TOA. On retient 22 W/m^2 ([ici](#) ou [là](#)) correspondant à une puissance totale $P \approx 11 \text{ PW} ?$
- Afin d'équilibrer le bilan au sol (92-13- 53-11), on affecte, pour le solde, la puissance $P = 15 \text{ PW} ?$ Ce solde est représenté à la figure 3 ci-dessous par une flèche noire **double** (une faible partie pourrait être absorbée par la surface terrestre ou par la biosphère). Selon le GIEC, une **partie** de ce solde pourrait aussi être interprétée comme le bilan d'un « échange radiatif » avec l'atmosphère.
- Le flux géothermique provenant de l'intérieur de la Terre est négligeable ($P \approx 0,05 \text{ PW}$ [ici](#)) relativement aux puissances précédentes et n'est donc pas représenté sur la figure 3 ci-dessous.

12.2. Schéma des puissances en jeu.

12.2.1 Représentation en puissances globales

Il est courant de trouver des schémas [4] utilisant des valeurs moyennes exprimées en W/m^2 . Malheureusement, ces **moyennes sur le globe** occultent la très **grande variabilité** géographique, par exemple:

- le flux infrarouge sortant (OLR) varie entre 150 W/m^2 et 300 W/m^2 suivant la zone géographique.
- pour le flux solaire incident, la moyenne de 341 W/m^2 est particulièrement trompeuse : début janvier à 12 H, au-dessus de l'Australie, le flux est proche de 1406 W/m^2 . Cependant, au même instant et pour plusieurs semaines, au Nord du Groenland le flux est proche de 0 W/m^2 (nuit polaire).

Le schéma proposé ci-dessous se limite donc à indiquer les puissances **globales**, moyennées sur 40 ans.

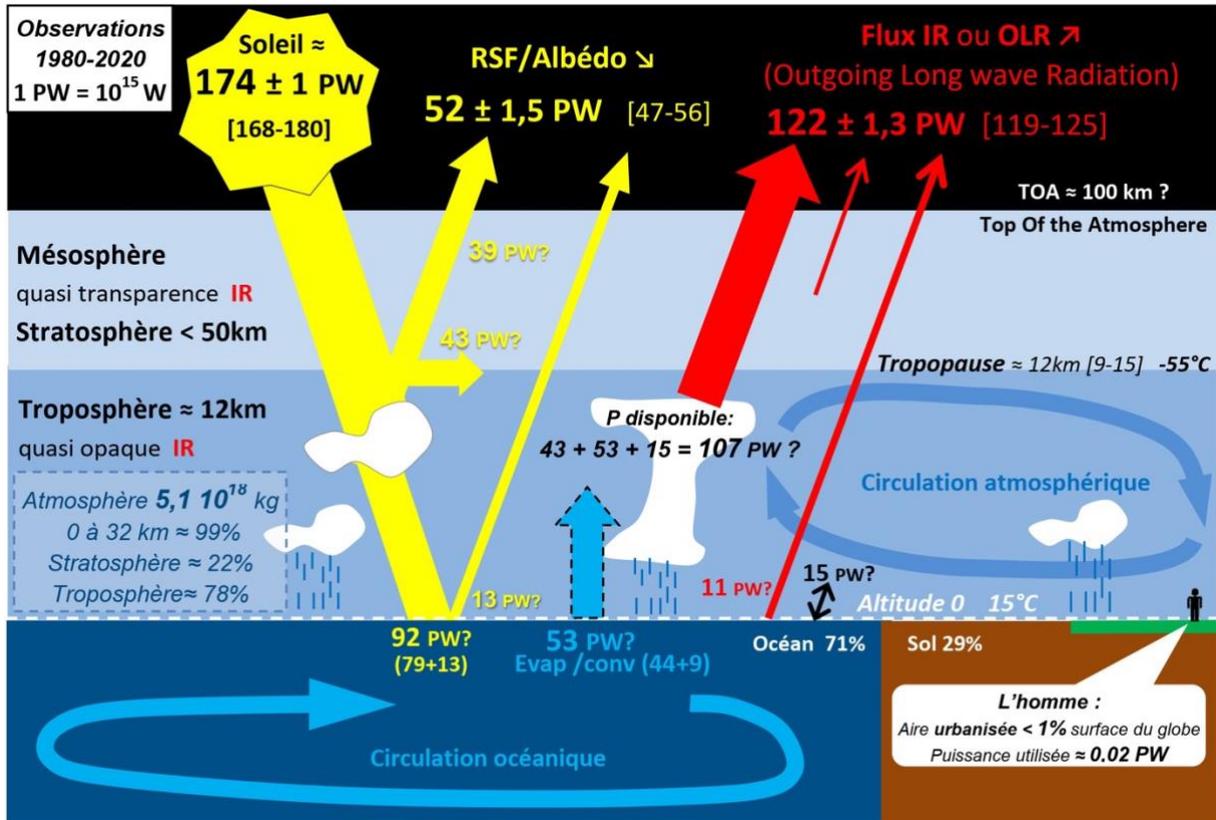


Figure 3 : Estimations des puissances moyennes globales en jeu dans le système Terre/atmosphère. Rayonnements : en jaune SW ($\lambda < 4 \mu\text{m}$), en rouge LW ($\lambda > 4 \mu\text{m}$), $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ Watts}$. Les puissances moyennes indiquées au-dessus de l'atmosphère sont déduites des mesures satellitaires depuis 40 ans. Les valeurs extrêmes (janvier et juillet) sont données entre crochets. Les puissances en jeu dans l'atmosphère sont des estimations très incertaines.

Les flux moyens (W/m^2) s'obtiennent en divisant chaque terme par $0,51 \text{ Pm}^2$, mais la répartition des puissances dépend très fortement de la latitude. Notons que la zone 30S-30N (à 75% océanique) correspond à la moitié de la surface terrestre alors qu'elle met en jeu la majorité des puissances globales. Les observations historiques *in situ* sont malheureusement peu nombreuses dans cette zone.

Pour le rayonnement sortant à la TOA ($52 + 122 = 174 \text{ PW}$), la part en provenance directe de l'altitude 0 serait $\approx 13 + 11 = 24 \text{ PW}$, soit $24/174 = 14\%$, alors que l'on aurait $\approx 150 \text{ PW}$, soit $150/174 = 86\%$ émanant directement de l'atmosphère. Un calcul théorique sur une atmosphère standard (voir remarque à la fig.2) montre qu'il est possible que le rayonnement IR sortant (122 PW) provienne surtout (ici figs. 1et 5a) de la moitié supérieure de la troposphère (jusqu'à 107 PW disponibles selon la figure 3 ci-dessus).

A propos de l'influence de l'homme sur le climat, le paragraphe suivant propose quelques ordres de grandeurs.

12.2.2 Échelle humaine.

- Influence anthropique directe :

Pour sa consommation annuelle, l'humanité utilise $\approx 14 \text{ Gtep}$, soit $0,6 \cdot 10^{21} \text{ Joules}$ d'énergie primaire (voir ici), ce qui correspond à une puissance moyenne $P = 0,019 \cdot 10^{15} \text{ W} \approx 0,02 \text{ PW}$.

La figure 3 permet au lecteur de comparer avec les puissances naturelles en jeu.

- *Influence anthropique indirecte (albédo):*
L'aire urbanisée ([voir ici](#)) par l'homme est $\approx 3,6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, ce qui correspond à $3,6/510 \approx 0,7\%$ de la surface du globe ($\approx 510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$).
Les terres agricoles ([voir ici](#)) occupent $\approx 49 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, soit $49/510 = 9,6 \%$ de la surface du globe.
Toutefois, hors pâturages, les cultures correspondent seulement à $2,5 \%$: finalement l'homme n'est guère présent que sur **3 à 4 %** du globe.
- *Influence anthropique hypothétique :*
L'organisation intergouvernementale GIEC, invoque l'existence d'un « forçage radiatif » qui serait la conséquence indirecte des activités humaines via le CO_2 anthropique.

12.3. A propos de l'influence anthropique hypothétique.

12.3.1 Mise en perspective.

Cette influence anthropique hypothétique est chiffrée par le GIEC entre 1 et $3,5 \text{ W/m}^2$ (AR5 WG1 p.697) [5]. En utilisant la [formule de Myhre](#) et la concentration moyenne 1980/2020 du CO_2 atmosphérique, la puissance **globale** correspondante est $\approx 1 \text{ PW}$ [6].

- La première partie de l'article ([ici](#) § 1.3) a montré que l'on obtient une estimation d'un déséquilibre $\approx 0,2 \text{ PW}$ des flux entrant/sortant entre 1980 et 2020. Comment concilier $0,2 \text{ PW}$ avec un « forçage radiatif » $\approx 1 \text{ PW}$ si les variations naturelles sont négligeables ?
 - L'hypothèse d'un « forçage radiatif » $\approx 1 \text{ PW}$ est également à mettre en perspective avec les puissances suivantes :
 - les variations entre janvier et juillet atteignent **11,5 PW** pour le flux solaire entrant et **4 PW** pour le flux IR sortant.
- il existe une contre-réaction (albédo) du système Terre/atmosphère mettant en jeu une puissance $\approx 4 \text{ PW}$ ([ici](#) § 3.3).
- la variation séculaire du flux solaire entrant peut atteindre **1,5 PW** ([ici](#) § 2.2).
- les reconstitutions/composites de la TSI, lors des cycles solaires 21 à 24, diffèrent de 5 W/m^2 , soit **0,7 PW** ([ici](#) § 2.2).
- suivant le rayon du disque qui intercepte le flux solaire, la puissance **moyenne** passe de 173 PW (altitude 0 km) à 179 PW (altitude 100 km), soit un écart de **6 PW** ([ici](#) § 2.3).
- entre 1980 et 2020, le flux IR sortant **croît** de **1,7 PW** ([ici](#) § 2.3).

12.3.2 Influence solaire vs anthropique selon l'AR5.

La figure 8.15 du rapport AR5 donne les facteurs qui influenceraient l'équilibre des 3 flux (TSI, RSF et OLR) depuis 1750. Selon les rédacteurs de l'AR5, l'influence anthropique hypothétique serait largement dominante.

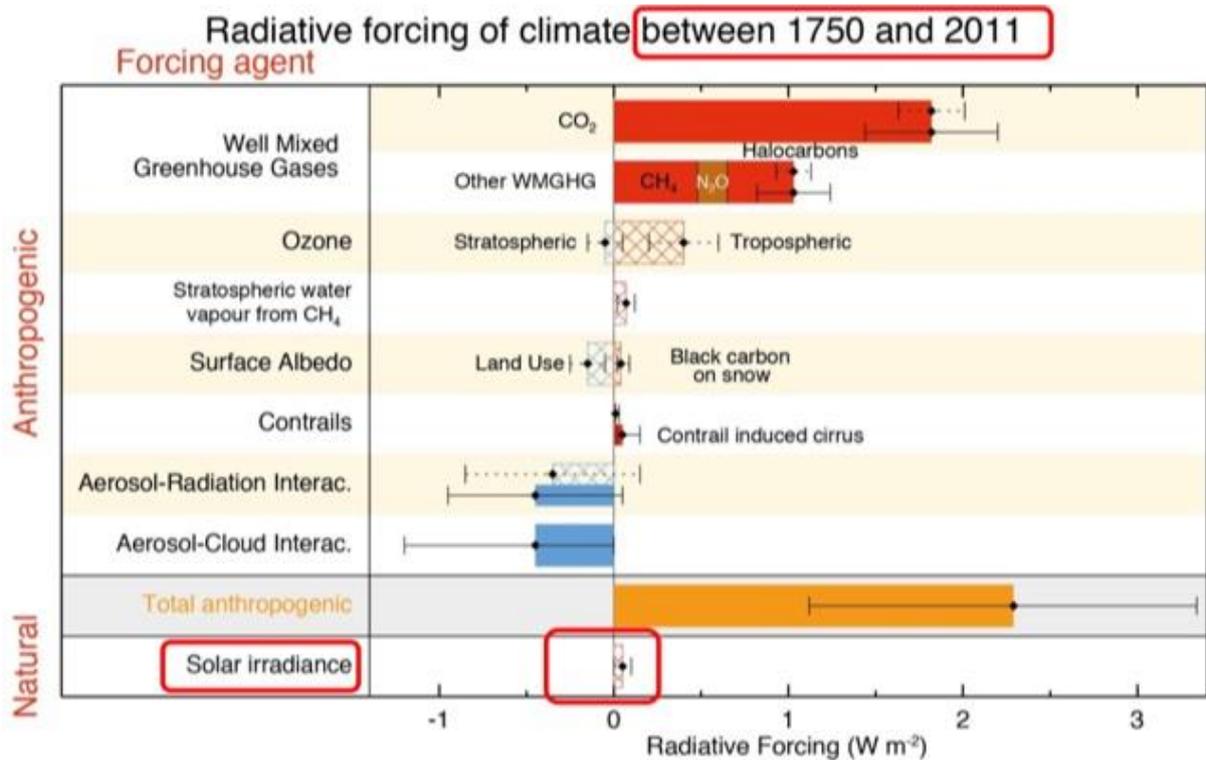


Figure 4 : D'après la figure 8.15 du chapitre 8 de l'AR5 [5] (similaire à la figure 7.6 chap.7 p.182 du récent AR6).

La figure 8.15 de l'AR5 compare les variations (depuis 1750) de 'Solar irradiance' avec l'influence anthropique indirecte hypothétique (« forçage radiatif » principalement). Pour les variations 'Solar irradiance', la figure 8.15, ainsi que la table 8.6 page 696, indiquent **0,05 W/m²** (0 à 0,1 W/m²). Après mise à l'échelle (surface sphère = 4 x surface disque), la TSI aurait seulement augmenté, depuis 1750, de **+ 0,2 W/m²** avec une **marge d'incertitude de ± 0,2 W/m²**. Une critique de cette valeur et de sa marge d'incertitude est proposée au paragraphe suivant.

12.3.3 La beauté est dans l'œil de ceux qui rédigent.

- Cette faible augmentation (**+0,2 W/m²**) de la TSI depuis 1750 est en contradiction avec une partie de la littérature scientifique ([Judge et al. 2020](#), [Connolly, Soon, Connolly 2021](#)) [5].
- Cette évolution de la TSI (**+ 0,2 W/m²**) est principalement fondée sur l'article [Krikova et al \(2010\)](#), pour lequel l'entrée du **modèle** est simplement le **nombre de taches solaires** vers 1745. Parmi la littérature scientifique disponible pour l'AR5, cet article sélectionné par le GIEC donne une des estimations les plus faibles (voir table 2 [Soon, Connolly, Connolly 2015](#)) [5].
- Marge d'incertitude : dans l'article récent [Kopp 2016](#), la TSI moyenne sur le cycle solaire 23 est de $1361,0 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$. Dans [Dewitte Clerbaux 2017](#), la TSI est estimée à $1362,0 \pm 0,9 \text{ W/m}^2$.

Les rédacteurs/modélisateurs de l'AR5 parviennent néanmoins à estimer la TSI en **1750** avec une incertitude de **± 0,2 W/m²**, soit une incertitude relative = $0,2/1361 = \pm 0,015 \%$.

- Marge d'incertitude : les rédacteurs du chapitre 8 confessent implicitement leur **grand optimisme** car leur figure 8.14 p. 695 du même chapitre indique une confiance **basse** ou très basse pour Solar Irradiance.

- Marge d'incertitude : Le paragraphe 8.SM.4 de l'AR5 ([ici](#)) rapporte la TSI de 1760 avec **6 chiffres significatifs** (1360,19). Pour l'écriture des rapports scientifiques WG1, le GIEC devrait privilégier des rédacteurs pratiquant l'observation plutôt que la simulation exclusivement.
- Finalement, ce grand optimisme des rédacteurs/modélisateurs permet d'obtenir 'Solar Irradiance' nettement plus faible que 'Total anthropogenic' et ceci **sans recouvrement** des marges d'incertitudes. Mais un aussi beau résultat n'est-il pas surtout la conséquence d'une vision anthropomorphique des rédacteurs/modélisateurs ?

12.4 Conclusions

- Les mesures par satellites ont permis une meilleure connaissance des flux énergétiques **au-dessus** de l'atmosphère. En revanche, les puissances en jeu **dans** l'atmosphère restent incertaines à cause d'un échantillonnage peu satisfaisant des mesures *in situ*.
- Environ la moitié de la puissance en provenance du soleil parvient à l'altitude 0, où elle est principalement utilisée pour vaporiser/envoyer l'eau vers l'atmosphère.
- Les rayonnements sortants de l'atmosphère proviennent (directement) surtout de l'atmosphère et non pas de l'altitude 0.
- L'existence d'un déséquilibre des flux, depuis 40 ans, **n'est pas** démontrée par les observations satellitaires. On tente de mettre en évidence cet éventuel déséquilibre ($\approx 0,2$ PW ?) par des mesures de température dans l'océan : il faut parvenir à mesurer une variation de 0,1 à 0,2 degré sur plusieurs décennies, à partir de bouées distantes de centaines de km.
- Compte tenu des incertitudes sur les changements multi-décennaux pour la TSI et pour l'albédo, l'attribution d'un déséquilibre incertain ($\approx 0,2$ PW) à une cause **unique**(anthropique) semble largement prématurée.
- La compréhension insuffisante des flux sortants (RSF et OLR), ainsi qu'une TSI **peu prévisible selon le GIEC** : « *at present there is **very low** confidence concerning future solar forcing estimates* » ([AR5 § 8.4.1.3 page 690](#)) montrent que la prévision **scientifique** du climat reste, à ce jour, une gageure voire un simple songe.
- En 2001, cette conclusion était déjà celle des rédacteurs du GIEC : « *In climate research and modelling, we should recognize that we are dealing with a coupled non-linear chaotic system, and therefore that the long-term **prediction of future climate states is not possible*** » ([AR3 page 774](#)).

Épilogue

*Chacun tourne en réalités
Autant qu'il peut ses propres songes :
L'homme est de glace aux vérités ;
Il est de feu pour les mensonges.*

(Jean de La Fontaine, Fables livre IX, 1678)

Références

1. Bilan

CERES <https://ep3vztogsj3zdd6p6fxpuoxcry-ceres-larc-nasa-gov.translate.goog/#ceres-carousel>

Earth's Energy Budget <https://ceres.larc.nasa.gov/science/>

Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget <https://acp.copernicus.org/articles/5/2847/2005/>

2. Données statistiques

[Superficies selon la Banque Mondiale](#)

[Consommation énergétique mondiale](#)

[Radiosondages](#)

[Masses atmosphériques: http://arxiv.org/pdf/1810.08658.pdf](#)

3. Couverture nuageuse, précipitations

https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_CLD_FR&date=2019-06-01

<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>

<https://gpm.nasa.gov/>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-017-9416-4>

[Koutsoyiannis 2020](#) Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying?

[Koutsoyiannis 2021](#) Rethinking climate, climate change, and their relationship with water

4. Schémas

Schéma bilan selon CERES <https://ep3vztogsj3zdd6p6fxpuoxcry-ceres-larc-nasa-gov.translate.goog/images/EnergyBudget.png>

Schéma bilan selon IPCC [fig 2.11 chapitre 2 AR5](#)

Schéma bilan selon NASA <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/ceres-poster-011-v2.jpg>

Earth's surface heat flux <https://se.copernicus.org/articles/1/5/2010/se-1-5-2010.pdf>

5. TSI et AR5

AR 5 Chapitre 2 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf

AR 5 Chapitre 8 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf

AR 5 Chapitre 8 Supplementary Material https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WGI_AR5.Chap_8_SM.pdf

Judge et al 2020 <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ab72a9/meta>

Soon, R. Connolly, M. Connolly 2015 [Re-evaluating the role of solar variability on Northern Hemisphere temperature trends since the 19th century](#)

R. Connolly, Soon, M. Connolly 2021 [How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate](#)

6. Les feuilles de calcul [Puissances en jeu 3](#) mettent en forme les observations.

13. Selon le physicien W. Happer il y aura peu d'effets pour un doublement du taux de CO₂

Mis en ligne : 30.06.2022

English version : *According to the physicist W. Happer there will be little effect for a doubling of the rate of CO₂*

Lorsque l'on parle de [l'effet de serre](#) et du [taux de CO₂ atmosphérique](#) sachez qu'il existe **trois catégories de scientifiques** : **(i)** ceux qui acceptent cet effet de serre et qui pensent que le taux croissant de CO₂ aura des effets majeurs sur la température de la basse troposphère; ce sont généralement les partisans des [thèses du GIEC](#); **(ii)** ceux qui acceptent l'idée d'un effet de serre mais qui pensent que le réchauffement sera modeste voire inexistant; ce sont des scientifiques qualifiés de climato-réalistes ou climato-sceptiques; nous pouvons par exemple ranger dans cette catégorie des physiciens et climatologues comme [William Happer](#), [Herman Harde](#), [Roy W. Spencer](#), [John Christy](#) ou [Richard Lindzen](#); **(iii)** et enfin ceux qui n'acceptent pas l'idée d'un effet de serre, pour diverses raisons théoriques, et pour qui forcément il n'y aura aucun effet du taux croissant de CO₂. Ces derniers scientifiques sont également qualifiés de climato-réalistes ou climato-sceptiques; Nous pouvons par exemple citer [Gerhard Gerlich](#), [Ralf D. Tscheuschner](#), [Jack Barrett](#) (du moins dans son article de 1995) et [Georges Geuskens](#). Notons que les scientifiques des trois catégories ci-dessus ne nient généralement pas le léger réchauffement global, et notons finalement qu'il existe des scientifiques indécis.

Le but du présent article est de vous présenter la vision de **William Happer**, un physicien faisant clairement partie de la catégorie n°2.

13.1. Les idées de William Happer résumées en une seule figure

Les idées de W. Happer **se résument clairement avec la Figure ci-dessous (Figure 1)**, issue de ses travaux de 2020 avec son collègue William Wijngaarden ([ici](#)). Il s'agit d'une figure représentant la quantité d'infrarouges émis par la Terre en fonction de leur fréquence (depuis le sol et/ou de l'atmosphère), à l'altitude de la **mésopause (86 km)**. Tout comme si un spectromètre était positionné à cette altitude et pointé vers le sol. La Figure 1 nous montre en fait 4 courbes : 3 en présence de diverses compositions atmosphériques (courbes noire, rouge et verte) et une sans aucune atmosphère (courbe bleue). Insistons sur le fait que toutes ces courbes sont **issues de calculs** et n'ont nullement été mesurées à 86 km d'altitude.

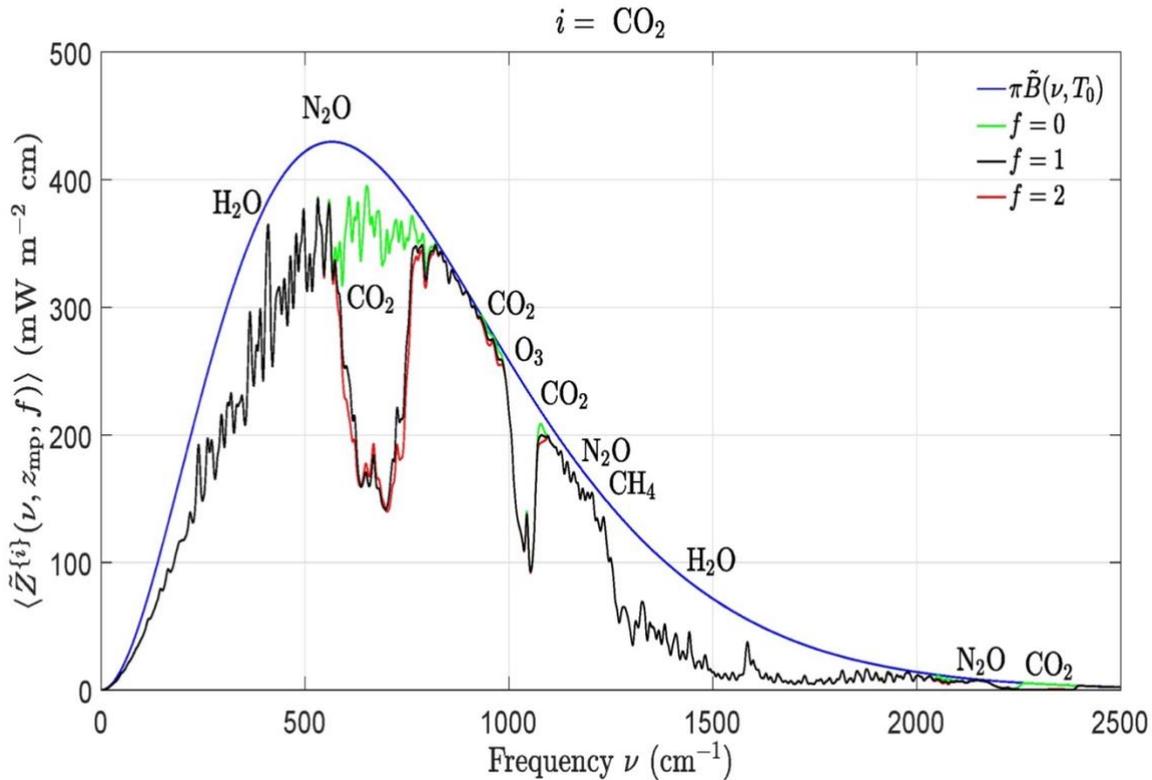


Figure 1. Radiations *calculées* émises par la Terre à 288.7 K (15.5°C). Explications dans le texte ci-dessous. Source : [Happer & Wijngaarden \(2020\)](#).

Pour construire cette figure, Happer et Wijngaarden ont utilisé la base de données de transmission et d'absorption moléculaire ligne par ligne [HITRAN](#) maintenue à l'Université de Harvard ([Wijngaarden & Happer, 2020](#)). HITRAN est un acronyme venant des termes anglais « *high-resolution transmission* ». Cette base de données compile des paramètres spectroscopiques que les programmeurs informatiques peuvent utiliser pour modéliser la transmission et l'émission de lumière dans l'atmosphère. Point important à noter, Happer et Wijngaarden ne considèrent pas l'effet des nuages. Nous y reviendrons plus loin.

La **courbe bleue** de cette Figure 1 représente les infra-rouges émis par la surface de la Terre (le sol) vers l'espace **si la Terre ne possédait pas d'atmosphère**, et ce pour la température de 288.7 K (15.5°C). Il s'agit bien entendu d'une courbe pouvant être calculée avec l'équation de Planck. L'énergie totale émise vers l'espace correspond simplement à l'aire sous cette courbe bleue.

La **courbe noire** de la Figure 1 représente les infra-rouges émis par la Terre vers l'espace avec l'atmosphère actuelle, comportant 400 ppm de CO₂, toujours pour la température de 288.7 K (15.5°C). Il s'agit également d'une courbe calculée, ici avec la base de données HITRAN. Nous voyons que moins d'énergie est émis vers l'espace car certains gaz atmosphériques absorbent des infra-rouges (et donc l'aire sous la courbe noire est plus petite que dans le cas précédent). Le nom de ces gaz est indiqué sur la Figure 1. Remarquons que cette **courbe noire est relativement proche des courbes expérimentales observées** par des spectromètres placés en orbite autour de la Terre, et ce à diverses altitudes. C'est ce que l'on appelle en anglais la « **Outgoing Longwave Radiation** », ou OLR. Un bel exemple de publication à ce sujet est celle de [Harries et al. \(2001\)](#). **Tout ceci semble valider la méthode basée sur la base de données HITRAN.** Mais nous vous laissons juger par vous-même en consultant l'article cité.

La **courbe rouge** de la Figure 1 représente les infra-rouges émis par la surface de la Terre vers l'espace avec une atmosphère identique à l'actuelle mais comportant **800 ppm** de CO₂, toujours pour la température de 288.7 K (15.5°C). Il s'agit également d'une courbe calculée avec la base de données HITRAN. **Nous voyons ici le point le plus important des idées de Happer : la différence entre la courbe noire et la courbe rouge est minime alors que le taux de CO₂ a été doublé!** Selon les calculs de Happer, la différence entre les deux courbes ne vaut que 3 W/m². Si l'on évoque l'effet de serre cela correspondrait à une augmentation de température de l'air en surface de seulement 1.4 à 2.2°C (sans l'intervention de nuages).

Enfin, la **courbe verte** représente une atmosphère hypothétique, similaire à l'atmosphère actuelle, mais qui ne comporterait **aucune** molécule de CO₂. Nous voyons ici que l'aire sous la courbe est plus grande que dans les deux cas précédents. Nous pouvons donc voir que le CO₂ atmosphérique absorbe bien les infra-rouges émis par la Terre, mais qu'actuellement, avec 400 ppm nous sommes quasi arrivés à une saturation. En effet, **si nous rajoutons du CO₂ dans l'atmosphère, celle-ci n'absorbera quasi plus d'infra-rouges émis par la Terre.** Et si un jour nous arrivons à 800 ppm la différence avec la situation actuelle ne sera que de 3 W/m².

Nous n'allons pas décrire ici tous les résultats obtenus par Happer et Wijngaarden et nous vous renvoyons simplement à leur publication ([ici](#)). Pour bien comprendre leurs résultats vous pourrez également vous aider de l'article publié [ici](#).

13.2. Qui est William Happer?

Présentons maintenant brièvement William Happer. Celui-ci est né en 1939 et a effectué une grande partie de sa carrière dans la célèbre Université de Princeton aux USA. Sous la direction du professeur Donald Hamilton de Princeton, il a obtenu son **doctorat en physique en 1964**. Sa thèse portait sur les mesures des spins et des moments magnétiques des noyaux radioactifs. Il a ensuite débuté sa carrière universitaire en 1964 au Département de physique de l'Université de Columbia où il s'est intéressé aux applications des atomes optiquement polarisés. Les premiers travaux de W. Happer se sont concentrés sur la polarisation de spin des métaux alcalins (sodium, potassium, rubidium, césium). Il a été l'un des premiers à étudier les effets de la lumière avec une longueur d'onde légèrement différente de la résonance atomique, et il a étudié plusieurs effets, dont la rotation de la polarisation de la lumière et les transitions atomiques Raman. Ceux-ci sont devenus les piliers de la physique atomique moderne. Dans ce qui est devenu la marque de fabrique de toutes ses recherches, Happer a combiné des mesures expérimentales avec le développement de modèles théoriques rigoureux et d'explications intuitives simples. Il a également étudié les propriétés uniques des collisions de relaxation de spin entre les atomes de métal alcalin, ce qui a conduit, 30 ans plus tard, au développement d'horloges et de magnétomètres de précision. En plus de son travail scientifique à Columbia et Princeton, il a été codirecteur et directeur du Columbia Radiation Laboratory.

William Happer est auteur de plus de **200 publications scientifiques** et a reçu de nombreux prix pour ses recherches. Pour plus d'informations il suffit de consulter sa page à l'Université de Princeton ([ici](#)). Vous pouvez également l'écouter parler dans plusieurs petites vidéos comme [ici](#). William Happer devrait donc savoir de quoi il parle lorsqu'il évoque l'absorption d'infra-rouges par des molécules comme le CO₂ car la spectroscopie est son domaine de recherche.

13.3. Que conclure?

– La conclusion majeure est bien évidemment la suivante : si William Happer à raison, l'effet d'un doublement du taux de CO₂ sur la température du globe (400 à 800 ppm) sera minime car nous sommes quasi déjà arrivés à une « saturation ».

– Mais William Happer n'a pas considéré les nuages. Que se passerait-il en présence de nuages? Si l'on considère que **l'effet net actuel des nuages est de refroidir** ([voir ici](#)) et qu'il semble probable que la vapeur d'eau totale dans l'atmosphère diminue ou reste stable ([voir ici](#)), **les résultats de Happer suggèrent que nous n'avons vraiment pas à nous soucier de l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère.**

– Notons que William Happer n'a pas réalisé de mesures de terrain avec des spectromètres placés sur des satellites. Ses conclusions sont donc basées sur des calculs théoriques.

– Pour finir, remarquons que l'article de Wijngaarden et Happer n'a pas encore été officiellement publié puisqu'il s'agit d'une pré-publication déposée sur la **plateforme arXiv**. Il s'agit donc d'un travail en cours de soumission. Ceci n'est pas une preuve de mauvaise qualité, car les physiciens et mathématiciens procèdent très souvent de la sorte. Un exemple célèbre de résultat original posté sur arXiv est la démonstration de la conjecture de Thurston, impliquant la conjecture de Poincaré (l'un des sept problèmes du prix du millénaire) comme cas particulier, postée par Grigori Perelman en novembre 2002, travail dont la validité a été officiellement reconnue en 2006 et qui a conduit à l'attribution à Perelman de la médaille Fields (qu'il a cependant refusée).

En conclusion finale, **prenons donc le temps de lire et de comprendre les objections et arguments des scientifiques issus des trois groupes précités**. Et une fois que votre décision sera prise, il ne faut pas croire que vous ne changerez jamais d'avis!

Références

W. A. van Wijngaarden, W. Happer (2020) Dependence of Earth's Thermal Radiation on Five Most Abundant Greenhouse Gases. arXiv:2006.03098 [physics.ao-ph]