

L'effet de Serre : Les preuves par l'image ?

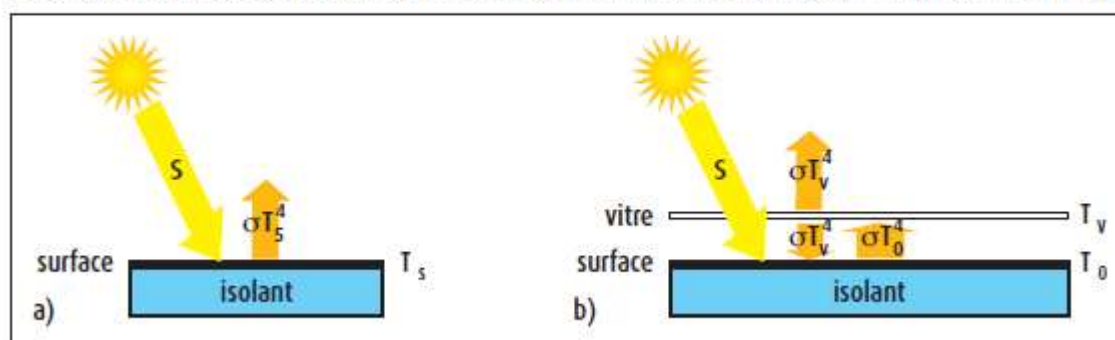
« Il faut toujours dire ce que l'on voit. Surtout il faut toujours, ce qui est plus difficile, voir ce que l'on voit » **Charles Péguy**

Beaucoup d'arguments sinon des preuves de l'origine humaine du réchauffement climatique sont basés sur des images. La présentation d'Al Gore en est truffée mais ce n'est pas la seule. Tout le monde, moi le premier, se laisse prendre, à première vue, aux images qui paraissent démonstratives oubliant qu'il ne s'agit que de « représentations ». Dans ce papier, nous nous focaliserons sur les images destinées à démontrer la réalité de l'effet de serre (EDS).

Première image : le modèle de la vitre

A l'origine d'une explication anthropique du réchauffement planétaire, on trouve le modèle de la serre agricole : pour expliquer ce qu'on entend par effet de serre, on se sert, en effet, le plus souvent de l'exemple d'une vitre totalement transparente au rayonnement solaire et totalement absorbante au rayonnement émis par la surface (de la terre) comme on peut le voir sur la figure1 ci-dessous extraite du document de MM Dufresne et Treiner [1].

Figure 2 - Représentation schématique des échanges radiatifs (a) pour une surface parfaitement absorbante sur une face et parfaitement isolée thermiquement sur l'autre et (b) pour la même surface recouverte par une vitre totalement transparente au rayonnement solaire et totalement opaque et absorbante au rayonnement infrarouge.



Sur la partie gauche a) de la figure, le plancher (soit la surface ou le sol) reçoit S . Le plancher ainsi chauffé émet des IR vers (dans) l'espace en fonction de sa température T_s .

A l'équilibre, on a $\sigma T_s^4 = S$ ce qui donne si la valeur de S est de 240 W/m^2 , pour la température de la surface du plancher, -18°C .

Sur la partie droite on glisse la vitre transparente aux rayons solaire. Le plancher reçoit toujours S mais les IR qu'il émet vers le haut chauffe la vitre qui à l'équilibre atteint aussi la température de -18°C et donc émet également $\sigma T_s^4 = \sigma T_v^4 = S$ et jusque-là pas rien à dire, le système reçoit σT_s^4 et émet la même chose dans l'espace. Le bilan est correct.

Mais on note sur la figure que la vitre émet aussi σT_v^4 vers le plancher. Les auteurs écrivent alors que celui reçoit $S + \sigma T_v^4$ et donc que σT_0^4 vaut $2\sigma T_v^4$. Il en résulte une augmentation de la température du plancher puisque sa nouvelle température d'équilibre est maintenant $2^{1/4}$ fois plus grande que sans la vitre. L'EDS serait ainsi démontré ! Ce qu'il y a de surprenant, c'est que personne ne remarque que la vitre elle-même reçoit du coup σT_0^4 . Elle devrait donc elle aussi à l'équilibre atteindre la Température T_0 soit environ 30°C . Nous n'insisterons pas, ici, sur ce type d'incohérence qui implique pourtant ex nihilo une création d'énergie pour plusieurs raisons :

- parce que les expériences de R. W. Wood en 1909 et du professeur Nasif Nahle en 2011 qui reproduisent le principe de la figure 2 de Dufresne et Treiner, ont constaté que, comme pour une serre agricole, il n'y avait aucun chauffage dû au rayonnement infra-rouge émis par la vitre au sein de leur dispositif démontrant ainsi le caractère erroné du modèle proposé.

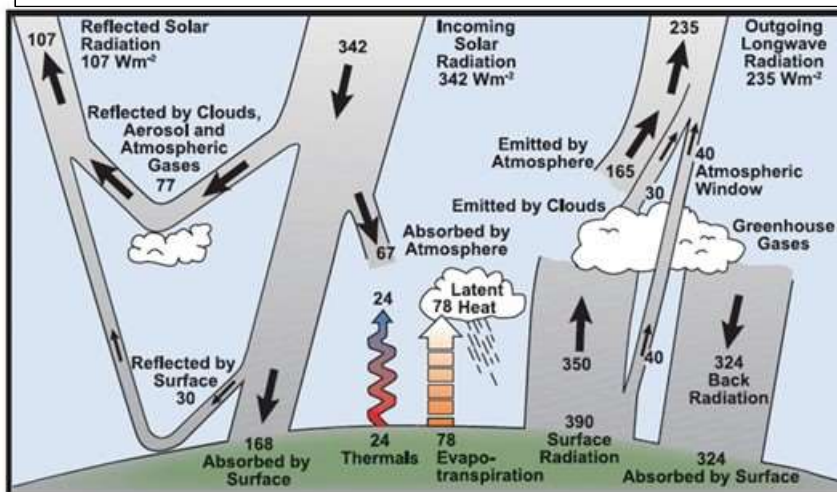
- parce que ce modèle n'est pas vraiment représentatif : l'atmosphère y est condensée dans une vitre de faible épaisseur et est séparée du sol par du vide, alors que la surface de la terre est en contact intime avec l'air.
- parce que les carbocentristes eux-mêmes trouvent des défauts au modèle de la serre agricole et à celui de la vitre : Tout le monde y compris le GIEC s'accorde d'ailleurs aujourd'hui pour reconnaître que les rayonnements n'interviennent pas ou peu dans son fonctionnement.
- Enfin parce que nous allons retrouver ce type d'anomalie dont expliquerons alors la genèse au cours du paragraphe suivant.

Deuxième image : définition de l'EDS par les diagrammes K&T

L'effet de serre est souvent expliqué au travers de diagrammes semblables à ceux des figures 2 et 3 extraites des rapport AR4 et AR5 de 2007 et 2014 du GIEC. Ces graphiques sont censés être plus représentatifs car décrivant tous les échanges d'énergie entre le soleil, la surface de la terre, l'atmosphère et l'espace. Ce type de diagrammes, inventé en 1997 par Kielh et Trenberth (K&T), est très prisé par les tenants de l'EDS. D'un diagramme à l'autre les valeurs indiquées dans les « tubes » changent un peu mais ce n'est pas cela l'important car il est évident qu'il existe des grosses incertitudes pour certaines données.

Des flux de chaleur (puisque les valeurs des flèches sont exprimées en watt par m²) se

Figure 2 : Diagramme des échanges d'énergie AR4 2007



FAQ 1.1, Figure 1. Estimate of the Earth's annual and global mean energy balance. Over the long term, the amount of incoming solar radiation absorbed by the Earth and atmosphere is balanced by the Earth and atmosphere releasing the same amount of outgoing longwave radiation. About half of the incoming solar radiation is absorbed by the Earth's surface. This energy is transferred to the atmosphere by warming the air in contact with the surface (thermals), by evapotranspiration and by longwave radiation that is absorbed by clouds and greenhouse gases. The atmosphere in turn radiates longwave energy back to Earth as well as out to space. Source: Kielh and Trenberth (1997).

propagent entre la Terre, l'atmosphère, le Soleil et l'espace, dans un sens bien déterminé.

A partir des éléments de ce diagramme, il est alors facile de faire des bilans, en additionnant les valeurs des différentes flèches qui vont dans le même sens et en retranchant celles qui vont en sens contraire. Par exemple, (figure 1) La terre au sens de la surface des terres et des océans reçoit 168 w/m² du soleil. Elle émet vers la troposphère 128 w/m² (350-324)+(78+24).

La troposphère reçoit directement, du soleil 67 w/m², l'ensemble « terre+atmosphère » absorbe donc au total 195 w/m². Comme la terre, d'après ce graphique, émet aussi directement 40 w/m² vers l'espace le système « terre+atmosphère », renvoie bien dans l'espace les 235 w/m² qu'il a reçu du soleil (67+168). Le bilan est bouclé en ne faisant que de simples additions ou soustractions.

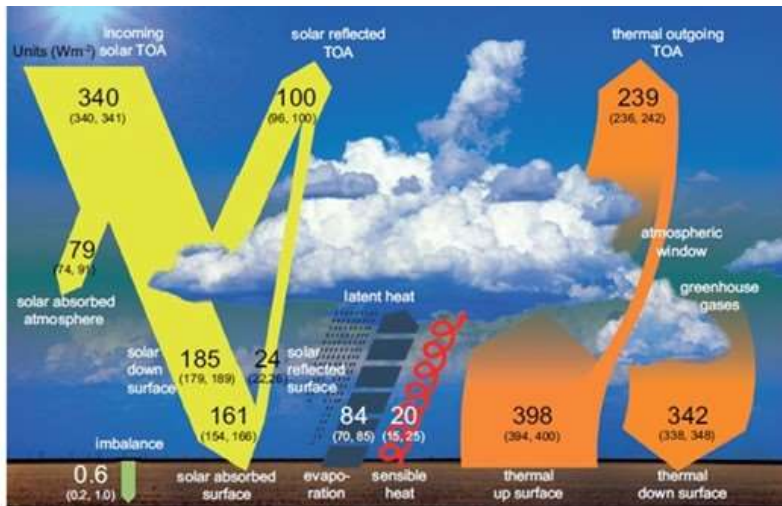


Figure 3 : Diagramme des échanges d'énergie AR5 2014

L'EDS, dans ces diagrammes est donné par la différence entre le flux émis par le sol et celui envoyé dans l'espace soit $390 - 235 = 155 \text{ w/m}^2$ pour la figure 1 et $398 - 239 = 159$ pour la figure 2. Ces valeurs sont « permises » par le fait que la troposphère et les nuages renvoient 324 à 342 w/m^2 vers la surface de la planète. Cela paraît au premier abord convainquant mais si on est attentif,

on se demande,

- 1) Comment justifier que, dans un système qui reçoit environ 240 , apparaissent des flux de 324 à 400 W/m^2 ?
- 2) Comment est-il possible que la troposphère et les nuages émettent dans le même temps 195 vers l'espace et 324 W/m^2 vers la terre (figure 2) : une couche d'air émet des rayonnements IR correspondant à sa température dans toutes les directions, cependant cette émission, se faisant sans direction privilégiée, doit être la même vers le haut et vers le bas. Comme ce n'est pas le cas, il y a là manifestation, là aussi, **création** (génération spontanée) d'énergie ($324 - 195$).

Il s'agit donc d'incohérences et d'erreurs dont il est facile de voir l'origine : dans les diagrammes des figures 1, 2 et 3, il y a, en fait, confusion entre flux radiatif et transfert de chaleur. La plupart des flux indiqués (par exemple les 324 ou les 342 ou les 390 et 398 W/m^2 des figure 2 et 3) ne correspond pas à un transfert de chaleur.

En effet, la propagation de chaleur par rayonnement est unidirectionnelle et se fait entre 2 surfaces : la surface i à la température T_i et la surface j à la température T_j avec $T_i > T_j$. La surface la plus chaude émet un flux **net** de chaleur q en W.m^{-2} vers la surface la plus froide j , qui l'absorbe : pour $T_i > T_j$: $q(i \rightarrow j) = \sigma(T_i^4 - T_j^4)$.

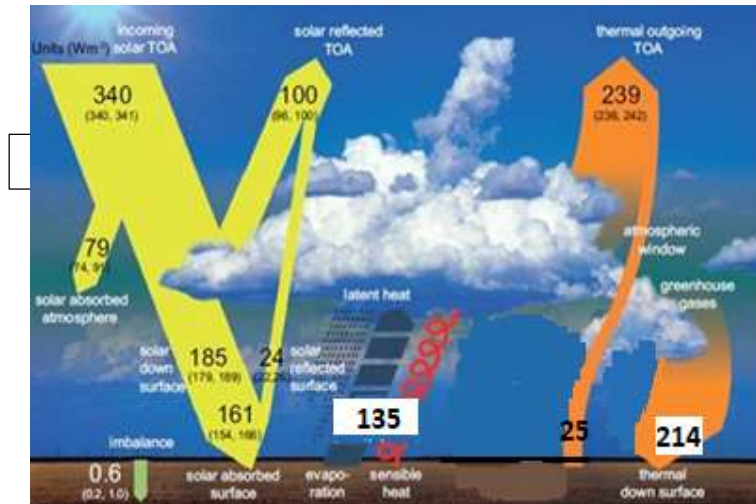
Pour le modèle de la vitre de la figure 1, $q(i \rightarrow j) = \sigma(T_i^4 - T_j^4) > 0$ jusqu'à ce que $T_i = T_j$, soit jusqu'à ce que $T_v = T_s = T_0$.

Notons que si on fait passer dans ce plancher chauffé par le soleil (ou par tout autre moyen) un petit tuyau dans lequel circule un caloporteur, il serait possible d'extraire de l'énergie sans changer la température de la vitre, c'est-à-dire extraire une énergie « gratuite » qui vient de nulle part. On aurait ainsi fabriqué une machine thermique quasi « perpétuelle ».

Les auteurs des diagrammes (donc le GIEC) représentent aussi sur leur dessin une propagation bidirectionnelle des rayonnements (déjà réfutée en 1827 par Joseph Fourier). Pour la figure 2, par exemple, la flèche « thermal outgoing » montre que les nuages et la troposphère émettent vers l'espace ce qu'ils reçoivent soit 239 W/m^2 . On peut donc en déduire sa température via la loi de Stephan (σT_j^4) soit environ -18°C . La flèche « thermal down surface » de 342 W/m^2 représente aussi l'émission de l'atmosphère et dans la formule σT_j^4 , l'indice j correspondant toujours à la troposphère. Elle conduit alors à une température de la troposphère T_j de $278,7 \text{ K}$ soit $+5,5^\circ\text{C}$! Outre le fait qu'on a là aussi **deux** températures pour le même objet, la troposphère, il y a bien vers la surface de la planète, **création d'énergie, chaleur fictive absorbée par le sol**.

Le transfert de chaleur par voie radiative est, bien entendu, la différence entre ce qui est absorbé et ce qui est rayonné, c'est-à-dire, si on prend les valeurs de la figure 1, que le flux net est donné par $(\sigma T_i^4) - (\sigma T_j^4) = \sigma(T_i^4 - T_j^4) = 390 - 324 = 66$. Un flux de 40 Wm^{-2} étant directement envoyé dans l'espace cela ne laisse plus que 26 Wm^{-2} pour un éventuel EDS soit une valeur de l'ordre de grandeur des incertitudes. C'est-à-dire que ce flux qui n'a pas lieu d'être, devrait être nul au profit des flux thermiques et d'évaporation).

Remarque : Ces flux radiatifs sont des flux nets¹ qui sont bien homogènes avec les flux des échanges convectifs et par évapotranspiration qui sont de la forme²



$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \approx q = -\lambda h(T_i - T_j)/z$
 Il est donc nécessaire pour tenir compte de la physique des phénomènes radiatifs de corriger la figure 3, on obtient alors la figure 4 qui est maintenant cohérente, en ce sens que la surface de la terre (continent+océans) absorbe l'énergie venant du soleil à un taux moyen de 168 Wm^{-2} et émet vers la troposphère également $66 + 24 + 78 = 168 \text{ Wm}^{-2}$. La troposphère elle reçoit $26 + 78 + 24 + 67 = 195 \text{ Wm}^{-2}$ ce qui correspond bien à ce qu'elle

envoie dans l'espace.

La seule source de chaleur externe qu'absorbe la surface est donc de 161 ou 168 Wm^{-2} , Remarquons que les IR émis dans la fenêtre atmosphérique n'interagissent pas avec l'atmosphère et sont donc émis directement dans l'espace. Cette énergie est donc extraite de la surface qu'elle refroidit. Elle vaut 40 Wm^{-2} d'après le rapport AR4 du GIEC ; la valeur³ déduite de l'épaisseur optique de l'atmosphère et des nuages ne donne, elle, que 25 Wm^{-2} .

En surface, la majorité de l'énergie absorbée par les gaz (H_2O , CO_2 ...) de la troposphère l'est maintenant par des phénomènes thermodynamiques, changement de phase, conduction/convection ! Bien entendu, augmenter la concentration de ces gaz donc augmenter la profondeur optique de l'atmosphère aurait pour conséquence d'augmenter l'absorption des IR aux fréquences correspondant à la fenêtre atmosphérique. Cela diminuerait (très peu pour le CO_2) le refroidissement associé Il n'y aurait pourtant pas d'augmentation de la température du moins pas autant qu'attendu car ce réchauffement serait compensé par l'augmentation automatique des transferts de chaleur thermodynamiques.

On ne peut donc plus, à partir de ce diagramme basé principalement sur les échanges radiatifs, expliquer pourquoi la température de surface a la valeur constatée d'environ 15°C . Nous confirmerons plus loin et dans l'Annexe que pour justifier températures et énergie il est effectivement nécessaire de faire intervenir la thermodynamique comme le suggère déjà la figure 4 qui, rappelons-le, correspond à la figure 3 corrigée.

Troisième image : Définition de l'Effet de Serre à partir de la courbe de Planck

¹ $q(i \rightarrow j) = \sigma(T_i^4 - T_j^4)$ est un flux net et remarquons au passage qu'on a alors bien $q(j \rightarrow i) = 0$ si $T_i = T_j$ donc pas de réchauffement donc pas d'effet de serre si le milieu est isotherme, évidence qui étonne les réchauffistes !

² Dans les transferts de chaleurs entre 2 points à la distance z d'un milieu donné on ne sépare pas le transfert de chaleur en 2 flux $\lambda T_i/z$ et $\lambda T_j/z$.

³ $161 * e^{-1,868} = 25$ en revanche si on prend l'ensemble atmosphère+ terre la valeur est $239 * e^{-1,868} = 37$ soit de fait proche des 40 du GIEC.

En attendant nous allons tenter de voir si une autre image souvent utilisée par les tenants des thèses du GIEC peut expliquer et justifier l'EDS. Cette image est celle présentée sur la

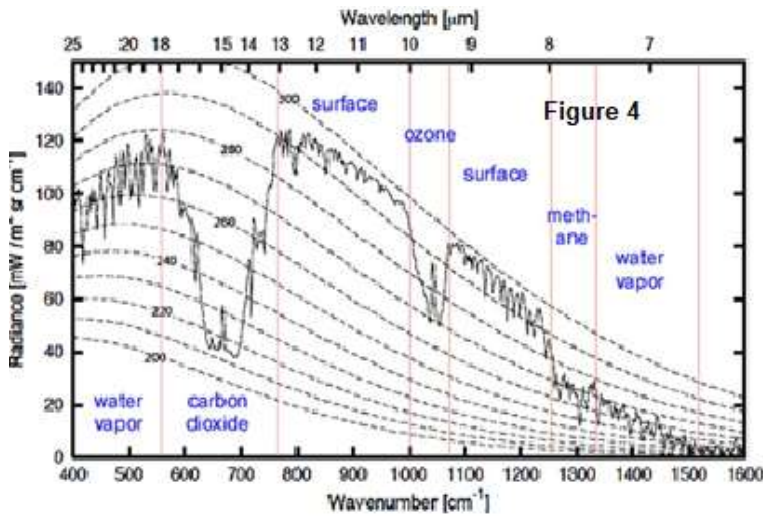


figure 4. Il s'agit du spectre de rayonnement infra-rouges (IR) émis par la terre tel qui peut être déduit des mesures satellitaires. Il est, en général, présenté comme étant au départ le spectre émis depuis la surface de notre planète ; les manques, affaissements ou « creux » appelés indentations seraient le résultat de l'absorption des IR due à la présence dans l'atmosphère de gaz absorbants dits GES indiqués en bleu (vapeur d'eau, dioxyde de carbone méthane, ozone ; et surface voulant dire,

rayonnement non absorbé car émis par la *surface*.

Sur cette figure, les courbes en pointillé surimposées sont le tracé des planckiennes (courbes de Planck) à différentes températures (300K=27°C, 260K=-13 °C, 220=-53 °C)

Supposons une Terre sans atmosphère (ou avec notre atmosphère mais sans aucun « GES »), son spectre serait une courbe sensiblement semblable à une courbe de Planck ; la surface sous cette courbe est alors l'énergie émise égale à l'énergie reçue du soleil soit un flux énergétique de 240 W/m² et une température de 255 K ou de -18 °C.

Introduisons ensuite dans l'atmosphère une certaine quantité de gaz comme le CO₂ qui absorbe une partie du rayonnement. L'absorption va effectivement se traduire par une indentation de la courbe de Planck.

De ce fait l'équilibre entre énergie reçue et énergie émise sera rompue.

Pour retrouver l'équilibre, il est proposé que le spectre « se modifierait » en conséquence et automatiquement via un déplacement vers le haut et vers les petites longueurs d'onde ; il en résulterait une élévation de température du sol, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit trouvé d'où le réchauffement de la planète.

Le mécanisme qui permettrait ce réchauffement est, bien entendu, attribué par le GIEC à l'EDS.

Ce processus est bien expliqué par J-M Bonnamy [2]. Et sur la figure 4, les courbes de Planck tracées en pointillé pour plusieurs températures et la courbe pleine qui fait bien apparaître une « indentation » qui serait due à l'absorption par le CO₂ des IR ayant une longueur d'onde $\lambda \approx 15 \mu\text{m}$, illustrerait l'explication proposée.

Cette définition de l'EDS basée sur la courbe de Planck de la surface de la terre assimilée à un corps noir et l'augmentation de sa température lorsqu'il y a absorption d'IR semble logique et recoupe toutes les autres définitions basées sur l'absorption [2], [3].

Placer l'observateur et l'origine du phénomène à la surface de la planète où certes nous vivons, revient à séparer la terre en deux parties distinctes ; d'une part la lithosphère et les océans, surfaces émettrices, d'autre part, l'atmosphère qui s'interpose comme une vitre absorbante entre elle et l'espace (le vide). De plus les transferts d'énergie autre que radiatifs ne sont pas pris en compte dans la définition proposée lus haut. Pour ces raisons, elle ne peut être retenue ni servir pour évaluer l'EDS.

Pour bien montrer ce qui se passe, nous avons besoin de définir l'épaisseur optique de l'atmosphère qui est donnée par $\tau_{a\lambda} = \kappa_{\lambda} \rho z_a$ où κ_{λ} est le coefficient d'absorption de la raie de longueur d'onde λ donné sur la figure 5 issu de [3]. ρ la masse volumique de l'atmosphère et z_a , en est l'épaisseur. On estime que l'absorption est totale lorsque τ_{λ} est

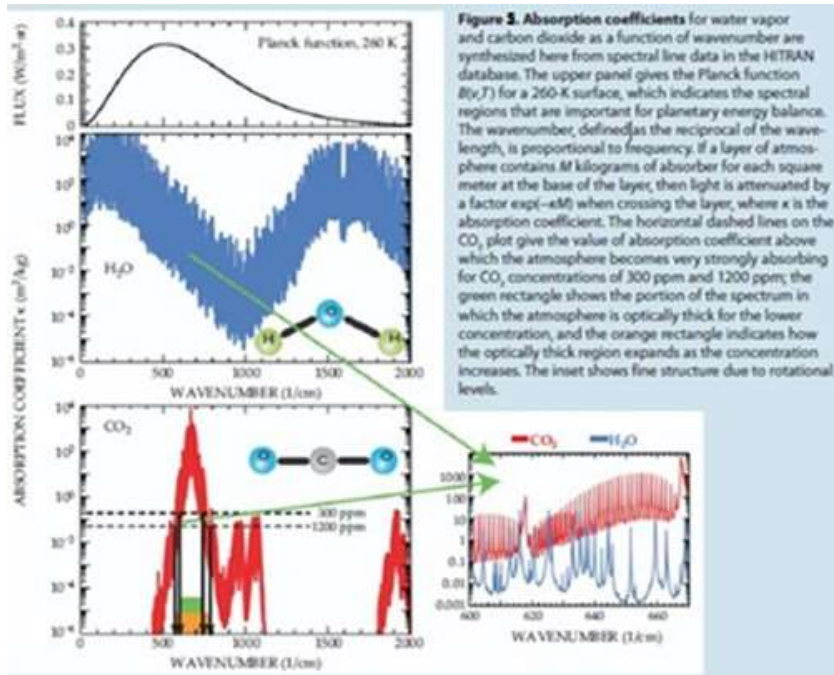


Figure 5. Absorption coefficients for water vapor and carbon dioxide as a function of wavenumber are synthesized here from spectral line data in the HITRAN database. The upper panel gives the Planck function $B(\nu, T)$ for a 260-K surface, which indicates the spectral regions that are important for planetary energy balance. The wavenumber, defined as the reciprocal of the wavelength, is proportional to frequency; if a layer of atmosphere contains M kilograms of absorber for each square meter at the base of the layer, then light is attenuated by a factor $\exp(-\kappa M)$ when crossing the layer, where κ is the absorption coefficient. The horizontal dashed lines on the CO_2 plot give the value of absorption coefficient above which the atmosphere becomes very strongly absorbing for CO_2 concentrations of 300 ppm and 1200 ppm; the green rectangle shows the portion of the spectrum in which the atmosphere is optically thick for the lower concentration, and the orange rectangle indicates how the optically thick region expands as the concentration increases. The inset shows fine structure due to rotational levels.

supérieure à 10. L'absorption étant exponentielle, cela correspond, en effet, à une absorption des raies concernées supérieure à 99,995 %. La figure 5 montre que κ_λ varie énormément en fonction de la longueur d'onde et que, par exemple pour la vapeur d'eau vers $6,5 \mu\text{m}$ (ou un nombre d'onde de 1540 cm^{-1}) et pour le CO_2 vers $15 \mu\text{m}$ (ou 650 cm^{-1}), κ_λ est très élevé, l'absorption correspondra alors à une épaisseur optique de l'atmosphère supérieure à

400 comme cela peut être vu sur la figure 6.

Si on reprend le raisonnement précédent l'atmosphère sans gaz absorbant doit émettre une « planckienne » correspondant à la température de 255 K (-18°C) et à 240 w/m^2 . L'ajout de gaz ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) va provoquer l'absorption d'IR émis, et la surface sur la courbe de ce qui reste de la planckienne va diminuer ainsi que l'intensité lumineuse et le flux émis dans l'espace.

Mais, en fait, cette absorption va « effacer » tous les rayonnements dont la profondeur optique est supérieure à 10 et chauffer la surface n'y changera rien, les IR de même longueur d'onde ne s'évaderont pas dans l'espace ; c'est-à-dire que le spectre va ressembler

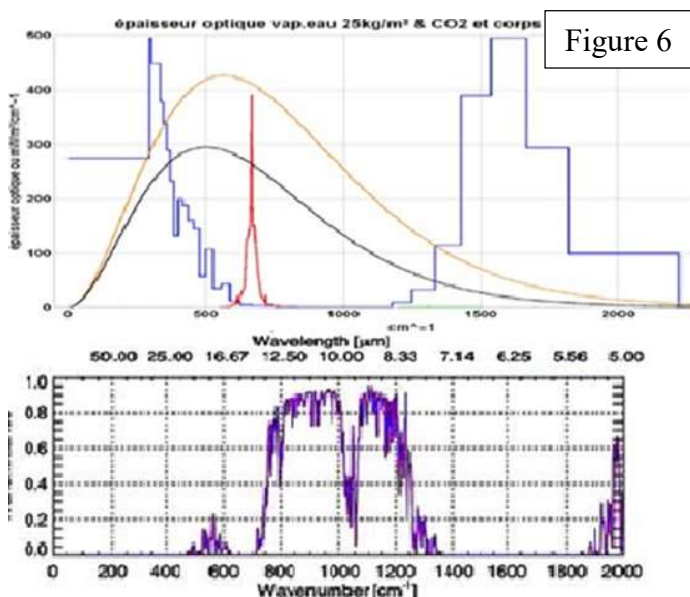


Figure 6

à la courbe de la partie inférieure de la figure 6 qui donne la transmittance ou le facteur de transmission qui est la fraction du flux lumineux traversant l'atmosphère.

Plus exactement les ordonnées auront des valeurs différentes mais il n'y aura pas d'IR dans les zones de transmittance nulle L'augmentation de température ne changera pas grand-chose à cette allure, seules les valeurs où la transmittance n'est pas nulle⁴ augmenteront et les pieds des pics s'élargiront légèrement mais cela ne donnera jamais le spectre noir expérimental de la figure 4 pour lequel il est observé et mesuré des émissions d'IR à toutes les longueurs d'onde.

Si on appliquait ce raisonnement à une étoile comme le soleil possédant une atmosphère totalement absorbante pour tout le spectre d'émission, cet astre ne devrait pas émettre de lumière. Il y a donc quelque chose qui ne va pas dans cette approche.

⁴ en particulier pour $\lambda < 5,6 \mu\text{m}$ et λ compris entre 16 et $20 \mu\text{m}$ (fenêtre atmosphérique),

Reprenons depuis le début !

Pour une émission monochromatique ayant une longueur d'onde correspondant à une épaisseur optique très élevée $\tau_{a\lambda}$ (ou si l'atmosphère est totalement absorbante pour tout le spectre d'émission), l'absorption des rayonnements émis par une couche profonde (prenons par exemple une couche dont l'épaisseur optique qui la sépare de l'espace est de 25), est totale. Aucun photon émis par cette surface n'atteindra l'espace et il en sera de même pour la couche juste supérieure même si l'épaisseur optique au-dessus d'elle est un peu plus faible ; mais de couches en couches, lorsqu'on s'approche du sommet de l'atmosphère, l'épaisseur optique τ diminuant, des photons arriveront à s'échapper dans l'espace et cela de plus en plus. Lorsque l'épaisseur devient mince, presque tous les IR émis par la couche s'échappent dans l'espace.

Quand il y a absorption totale dans l'atmosphère, les couches les plus internes ne contribuent pas au rayonnement sortant mais il y a, néanmoins et toujours, émission des couches externes. Camille Veyres précise que 80% des émissions de rayonnement IR thermique vers l'espace viennent de la pellicule externe (la peau) de l'atmosphère correspondant à une épaisseur optique de 1.07.

Le raisonnement sur l'augmentation de la température de la Planckienne à l'altitude zéro (niveau de la mer) ne tient donc pas.

Pour comprendre et expliquer la figure 4, il est plus facile de prendre le problème dans l'autre sens comme il est fait pour le soleil et les étoiles. Dans ce cas l'observateur est, en effet, à l'extérieur de l'astre et l'origine est le sommet de l'atmosphère (TOA – Top Of Atmosphere).

On compte alors l'épaisseur optique à partir de TOA. Pour qu'il n'y ait pas confusion, on préfère utiliser plutôt que l'épaisseur optique $\chi = \tau_{\lambda a} - \tau_{\lambda}$ appelé la profondeur optique qui décroît vers l'observateur et qui est nulle pour TOA. Et c'est aussi la façon de procéder, adoptée pour les équations de transfert radiatifs utilisés dans les cours et les modèles GCMs pour l'atmosphère terrestre⁵.

Intéressons-nous maintenant à notre planète.

Profondeur ou épaisseur optique de l'air ont généralement en infrarouge thermique des valeurs atteignant quelques dizaines ou quelques centaines ; et même dans la fenêtre atmosphérique, entre 8,5 et 12 μm , $\tau_{\lambda\alpha}$ n'est pas tout à fait nulle sauf dans les zones très sèches et sans nuage.

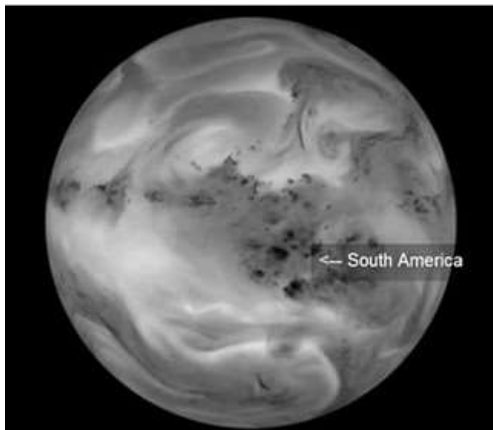


Figure 7 Vue de la terre à la longueur d'onde de 6,5 μm

Les émissions radiatives ne seront effectives que dans les dernières couches d'épaisseur optique $\tau < 5$. Cela est confirmé visuellement par la figure 7 qui est une vue infrarouge de la terre mise en ligne par James Tyrwhitt-Drake. Les niveaux de gris indiquent la puissance du rayonnement émis pour une longueur d'onde située en plein dans une plage d'absorption de la vapeur d'eau. Les limites précises du continent sud-américain ou la présence de nuages sont ici indiscernables alors qu'elles

seraient perceptibles sur une photo satellite en lumière visible.

Cette image provenant de satellites de la NASA montre que l'atmosphère est bien opaque aux infrarouges et ne commence à devenir transparente aux IR qu'à haute altitude. On voit aussi que la surface n'est pas lisse et l'altitude d'émission varie localement en fonction de la composition de l'atmosphère et en particulier de sa teneur en eau.

Cette figure confirme donc que le flux de rayonnement émis dans le cosmos vient des couches supérieures de l'atmosphère et que les couches de plus basse altitude, **ne contribuent pas** au rayonnement sortant dans l'espace.

⁵ mais pas dans les petits modèles présentés dans les rapports du GIEC !

En partant du sommet de l'atmosphère, par conséquent, les longueurs d'onde fortement absorbées ne seront émises qu'à partir d'une altitude élevée donc à partir d'une zone froide ; c'est le cas de la zone d'absorption du CO₂ vers 15,4 μm (ou 650 cm⁻¹). Tandis qu'entre 8 et 12,5 μm (800-1200 cm⁻¹ soit pour la fenêtre atmosphérique) où l'absorptivité est très faible, l'émission se fera près du sol à une température élevée.

Ces deux points apparaissent très clairement sur les figures 4 et 8.

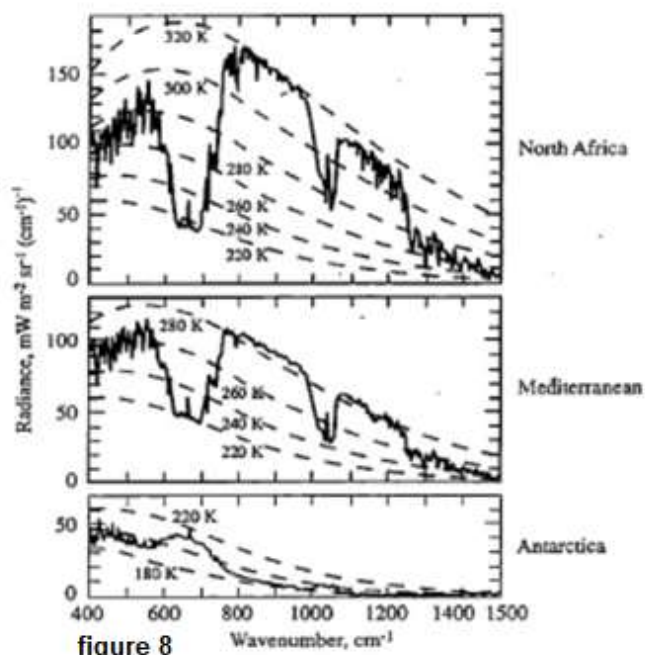
- La température dans la bande d'absorption du CO₂ est voisine de la température de la tropopause et de la basse stratosphère (soit -55°C ou 218 K), il ne s'agit donc pas d'indentation.
- Dans la bande correspondant à la fenêtre atmosphérique, son spectre approche celui d'un corps noir qui émettrait à la température moyenne de la surface terrestre (288 K).

Les rayonnement émis dans l'espace par la terre n'appartiennent donc pas à un seul spectre qui serait la planckienne à l'altitude zéro augmentée pour compenser la surface correspondant aux « indentations » dans les bandes de fréquences où il y a forte absorption

par les GES de l'atmosphère. Le spectre d'émission est au contraire, une addition de planckiennes et portion de planckiennes émises aux altitudes où il y a émission et correspondant à la température régnant à cette altitude.

La température et la puissance d'émission dépendent par conséquent de la longueur d'onde mais aussi comme on le voit sur la figure 8 du lieu d'émission (composition de l'atmosphère). Cela devient très compliqué.

Un moyen de simplifier qu'utilisent d'ailleurs les auteurs des GCMs français et étrangers est d'une part de moyenniser sur l'ensemble de l'astre concerné, les apports d'énergie, les concentrations, les températures etc. D'autre part puisque la loi de Planck n'est valable que pour un



rayonnement monochromatique et que les spectres émis par la Terre, le soleil ou les étoiles s'étendent sur plusieurs ordres de grandeur de valeur de longueur d'onde, d'avoir recours à **une profondeur optique simulée moyenne**.

Une telle grandeur est calculée en intégrant sur tout le spectre, raie par raie, et sur un hémisphère couche par couche, la transmittance monochromatique directionnelle⁶. On obtient ainsi grâce à cette « approximation », l'absorptivité moyenne et l'épaisseur optique de l'atmosphère considérée.

Il est alors plus facile, au prix d'un peu de perte sur la précision, d'appliquer les équations de transfert radiatif à l'atmosphère d'intérêt. Cette atmosphère possédant un seul coefficient non dépendant de la longueur d'onde, est appelée « atmosphère grise » ; l'atmosphère est un « corps gris ».

Cela conduit à des équations plus simples qui montrent que dans le cas d'une couche mince, l'émissivité (la puissance d'émission) est proportionnelle au volume, tandis que dans le cas d'une couche épaisse totalement absorbante, elle est proportionnelle à la surface.

⁶ La valeur de l'absorptivité pour chaque longueur d'onde est d'abord pondérée par le flux du rayonnement émis par la surface à cette longueur d'onde puis sommer sur toutes les longueurs d'onde et enfin ce résultat est divisé par le flux total émis par l'objet considéré.

Ainsi, dans le cas d'une atmosphère totalement absorbante qui peut être assimilée à un milieu semi-infini, l'augmentation de l'absorptivité n'a pas d'influence sur sa température ; la formule donnant la température à son sommet est totalement indépendante de la profondeur optique et les couches situées près de sa surface émettent un rayonnement dont l'intensité est la planckienne à la profondeur optique unité (Loi d'Eddington Barbier).

Cette planckienne correspond aussi à la température effective T_{eff} définie par l'égalité des flux entrant et sortant (intensité émise égale à la fonction source). Pour le soleil par exemple, on a la température d'équilibre du corps noir/gris $T_{\text{eff}}=5778$ K. Le changement d'absorptivité par ajout de gaz n'a aucun effet sur ces températures et cela en raison de la saturation du phénomène d'absorption.

En revanche, l'épaisseur optique moyenne actuelle de notre atmosphère τ_a déterminée par les logiciels spécialisés n'est que de 1,868 valeur que retrouve d'ailleurs théoriquement à 0,1% près Ferenc Miskolczi [4] physicien hongrois spécialisé en transfert radiatif atmosphérique qui a travaillé à la NASA.

Notre atmosphère est donc semi-transparente et les approximations faites pour les étoiles ne sont plus applicables. Pour résoudre le problème on peut si on dispose des logiciels correspondants et de gros ordinateurs, faire appel à des résolutions numériques exactes soit utiliser les équations de Miskolczi [4].

Les valeurs de température ainsi déterminées au niveau de la tropopause (\approx TOA) restent voisines de 217 K ou -56 °C.

Mais contrairement au cas d'une atmosphère très absorbante, la température au sommet est (un peu) sensible à ce qui se passe en dessous et varie avec les changements de τ_a et donc à l'augmentation de concentration de gaz absorbant.

Ce comportement était prévisible à partir des courbes de la figure 5, donnant les coefficients d'absorption de la vapeur d'eau et du CO_2 : on voit que ceux-ci varient de plusieurs ordres de grandeur en fonction de la longueur d'onde. Il y aura bien sûr, saturation pour les pics d'absorption très élevés mais à la base de ces pics (figure 6) correspondant à des valeurs faibles de coefficient d'absorption et donc des valeurs faibles d'épaisseur optique, il n'y a plus saturation ; une augmentation des concentrations de gaz se traduira par une augmentation d'absorption dans ces bandes de fréquences. Cela revient à refermer un peu plus la fenêtre atmosphérique qui n'était déjà qu'entrouverte.

Il est alors nécessaire d'évaluer quantitativement ces modifications pour en déterminer l'impact sur un éventuel réchauffement. Les calculs de transfert radiatif confirment alors qu'un doublement de la concentration de CO_2 n'augmente que très légèrement, la température de la tropopause et que donc l'augmentation de CO_2 ne peut être rendue responsable du réchauffement passé ou attendu dans le futur.

Mais bien entendu personne (si on excepte dans les vols long courrier) ne vit au niveau de la tropopause et ce qui nous intéresse c'est la température près du niveau de la mer. Or tout le monde le reconnaît : « *Le profil de température dans la troposphère n'est pas déterminé par les échanges radiatifs.* » Le recours à l'utilisation de modèles ou d'équations de transfert radiatif seuls n'est alors plus admissible.

Variation de la température en fonction de l'altitude

C'est là que la thermodynamique commence à intervenir.

L'énergie interne d'un petit volume de gaz dans une colonne d'air est la somme de son énergie thermique et de son énergie potentielle gravitationnelle : $U = C_p T + gh$ où U est l'énergie interne, C_p la capacité calorifique du gaz, T sa température, g l'accélération de la pesanteur de notre planète, et h la hauteur du petit volume de gaz considéré.

La différentiation de cette équation conduit à : $dU = 0 = C_p \cdot dT + g \cdot dh$ d'où on tire

$dT/dh = -g/C_p$ qui donne la variation de la température en fonction de l'altitude h .

En air sec cela conduit à une valeur du gradient thermique adiabatique égal à $\Gamma = -9.74$ °C/km. En air humide, il faut tenir compte du changement de composition de l'atmosphère dû à la présence de la vapeur d'eau qui lorsqu'elle se condense restitue l'énergie empruntée pour sa

vaporisation, on a alors $\Gamma = -g/(C_p + C_h)$ pour une atmosphère standard -6.5 et -5 °C/km pour une atmosphère saturée.

Connaissant par le calcul la température de la troposphère ($\approx -56,5$ °C à 11 km vérifiée par l'observation), il résulte de ces valeurs que la température à l'altitude zéro d'une atmosphère standard sera très proche de 15°C ($-56,5 + 11 \times 6,5$) qui est aussi la température moyenne (TMAG) donnée par les instituts.

Cela implique aussi que les changements de température dans la troposphère seront uniformes sur toute sa hauteur : pas d'augmentation de la variation de température ΔT avec l'altitude, pas de « hot spot » ce qui est en total accord avec les mesures mais en contradiction avec ce qu'affirme le GIEC !

Il faut cependant aussi tenir compte du fait que l'ajout de gaz dans l'atmosphère augmente son volume et son épaisseur puisqu'on y ajoute de la matière. Cet ajout provoquera une augmentation de l'altitude de la tropopause. Mais pour le CO₂, un gaz plus rare dans l'atmosphère que les gaz rares, un doublement de concentration n'entraîne qu'une variation d'épaisseur de 4 à 6 m, ce qui traduit en température par 2,6 à 4 centièmes de degré, augmentation non susceptible d'être à l'origine des réchauffements dramatiques dont on nous parle.

Certes les variations de teneur en vapeur d'eau, gaz pour lequel on est assez loin de la saturation optique, conduisent à des variations de températures plus importantes à la fois pour des raisons radiatives et de changement d'altitudes mais « en même temps » ces variations entraînent **un changement des valeurs du gradient vertical Γ** , changement **qui s'oppose** (rétroaction négative) à la variation originelle et en limite et va même jusqu'à en inverser les conséquences. Cela peut être observé lors des épisodes el Nino/La Nina, qui provoquent des variations de températures très importantes au-dessus du Pacifique Sud qui après quelques oscillations se stabilisent. L'effet d'un changement de composition d'atmosphère ne peut alors être obtenu par le calcul qu'après un certain nombre d'itérations. La température à la surface de la planète s'explique donc **sans aucunement faire** appel au rétro-rayonnement d'infrarouge fondement de toutes les définitions données par le GIEC de l'EDS.

De plus, en dehors de changements catastrophiques, notre atmosphère peut être considérée climatisée et sa température régulée.

Précisions et Discussion

Bien que la variation de la température de notre atmosphère avec l'altitude soit parfaitement démontrée par la thermodynamique et confirmée par l'observation et que par ailleurs tout le monde peut constater que le travail associé aux changements de pression d'un gaz peuvent chauffer ou refroidir (exemple de la pompe à vélo et du réfrigérateur), on peut néanmoins s'étonner que l'effet de la pesanteur sur notre atmosphère étant statique, nous puissions nous en servir pour expliquer la température au niveau du sol sur notre planète.

Remarquons d'abord que sans pesanteur, la température de l'atmosphère⁷ serait isotherme et de 255 K ou -18 °C. Or avec pesanteur, sa température moyenne est **toujours** de -18°C, elle est seulement répartie différemment (-56 °C à la tropopause et 14.5 °C au niveau de la mer). Il n'y a donc pas de variation d'énergie ou de chaleur de l'ensemble du système.

Comment alors expliquer la valeur (390-400 W/cm²) de la fonction source c'est-à-dire de l'émission radiative de notre planète au niveau de la mer issue des relevés de température. Le sol ne reçoit, en effet, du soleil que 161 W/m², apport⁸ compensé pour environ au moins 124 W/m² par l'évaporation et la convection à la surface.

On a ignoré jusqu'ici une évidence : l'air chaud monte et l'air froid descend ! L'atmosphère transporte donc l'énergie calorifique de la surface de la terre à son sommet dans un processus cyclique, consistant en un air ascendant, en expansion se refroidissant et un air descendant, en compression se réchauffant. Ainsi, lorsque on se déplace de la tropopause

⁷ à condition de pouvoir l'empêcher de s'échapper

⁸ on néglige l'apport de la géothermie (≈ 0.07 W/m²)

vers la surface de la planète, il y a compression dont l'énergie correspondante peut être calculée (voir l'annexe).

L'application numérique pour l'atmosphère terrestre donne pour le travail de la pesanteur qui transforme l'énergie cinétique de l'air sec en énergie calorifique, environ 370 W/m².

Toute l'énergie cinétique ou presque (compression par l'attraction terrestre) est donc bien, dans ce cas, transformée en énergie calorifique.

Au total on a donc environ 370+(161-124)=407 soit une valeur très proche des dernières valeurs du GIEC compte tenu des incertitudes et imprécisions sur les données de base.

En effet on vient de voir que lorsque on se déplace de la tropopause vers la surface de la planète, il y a compression et libération d'une énergie d'environ 370 W/m² qui correspond au travail de la pesanteur qui transforme l'énergie cinétique de l'air sec en énergie calorifique.

L'accord entre la valeur de la fonction source (flux émis d'environ 400 W/m²) et la valeur totale de l'énergie interne de 407 W/m² calculée à la surface est plus qu'acceptable compte tenu des incertitudes et imprécisions en particulier sur la vitesse ascensionnelle moyenne⁹ et le refroidissement en surface lié à l'évaporation.

Il n'y a donc plus lieu de s'étonner, comme nous l'avons fait à la fin du premier chapitre sur les diagrammes, que, même si la surface de notre planète reçoit du soleil 161 W/m², sa température soit voisine de 15 °C ce qui correspond à une émission de corps noir de 390 à 400 W/m² mais cette émission qui serait mesurée par un thermomètre Infra-rouge ne correspond en aucun cas à un transfert de chaleur qui nous l'avons vu plus haut est une différence entre deux flux radiatifs, un flux net.

Nous avons vu également que l'augmentation de la teneur en eau de l'atmosphère conduit à un refroidissement de la troposphère et s'opposera à tout réchauffement (forçage) quel qu'en soit l'origine, radiatif ou océanique.

L'atmosphère fonctionne comme un climatiseur ; on peut remarquer que la thermodynamique d'un climatiseur ou d'un réfrigérateur requiert un compresseur qui dans le cas de l'atmosphère est joué par la gravitation qui cause la compression de l'air descendant.

Finalement, diagrammes, modèles et équations conduisent au même résultat : **L'effet de Serre ne peut être la cause ni de la température de surface de la terre ni du réchauffement du passé ou futur.** Et plus particulièrement l'augmentation de concentration du CO₂ dans l'atmosphère ne peut avoir qu'un effet négligeable sur l'atmosphère et le climat. Ce qui précède montre que quelle que soit la composition quantitative et qualitative d'une atmosphère semi-transparente, sa température moyenne, pour le même éclairement du soleil, restera constante ; seule sa distribution dans l'espace variera.

On ne peut nier cependant que si les gaz dit GES perdaient partiellement ou totalement leur pouvoir d'absorber les IR, le climat sur terre serait différent et les températures de surface plus faibles. Mais plutôt que de se comparer à une situation sans ces gaz (ce qui est fait habituellement), imaginons comme le fait Fred Hoyle dans un de ses romans de Science-fiction que l'azote de l'atmosphère disparaisse au point que son épaisseur passe de 11 à 9 km. Si on fait l'hypothèse que rien d'autre ne change et que les quantités de vapeur d'eau et de CO₂ conservent leurs valeurs actuelles, alors la TMAG au niveau de la mer serait d'environ +2°C soit une baisse de température de 13 °C.

Une suppression totale de l'oxygène et de l'azote de notre planète conduirait toutes choses demeurant égales par ailleurs) à une température au niveau du sol de -17°C. Et si on supprimait la vapeur d'eau et qu'il ne reste que le CO₂ actuel, en supposant que cela ne changerait que l'épaisseur de l'atmosphère, la température serait pratiquement égale à sa température d'équilibre du corps noir soit -18°C.

Ceci n'est pas une fiction car c'est le cas de la planète Mars : cette planète a, en effet, une atmosphère 200 fois moins dense que la nôtre mais composée de 96% de CO₂ (au lieu de 0.04 % sur terre). Cette forte proportion fait que l'atmosphère de Mars contient, près de 30 fois plus de CO₂ que celle de la Terre.

⁹ Il suffit en effet de prendre pour cette vitesse, moyennée sur toute la hauteur de la troposphère, 4.85 au lieu de 5 mm/s, pour avoir un excellent accord.

L'application des équations pour une Mars sans du tout atmosphère conduit à une température surface de -63°C soit exactement la température moyenne observée pour cette planète.

La présence de cette quantité de gaz carbonique (plus importante que celle de notre atmosphère) devrait, s'il y avait un effet de serre, être plus chaude de 4 à 5°C (soit $\approx -59^{\circ}\text{C}$). La présence de gaz carbonique bien qu'en quantité très proche de la saturation, n'a donc aucun effet décelable sur la température de surface.

On peut donc conclure que la masse totale de l'atmosphère a une influence beaucoup plus importante que celle attendue de l'absorption !

Conclusion

Les images peuvent certes être très utiles pour illustrer et expliquer (un bon dessin vaut parfois mieux qu'un long discours). Mais leur utilisation comme preuve doit toujours être prise avec circonspection en physique comme dans tous les autres domaines (médiatique, économique, politique...) Même de bonne foi, il est trop facile d'être induit en erreur par exemple par un effet d'échelle surtout si ce qui est montré semble aller dans le sens attendu. C'est ce que nous venons de voir avec les figures 1, 2 et 4 à première vue très convaincantes.

Finalement si la température à la surface de notre planète est agréable, c'est bien plus grâce à l'existence de la pesanteur et à l'importance de notre atmosphère qu'à la présence du gaz absorbants comme le gaz carbonique ; la présence de ceux-ci est certes nécessaire mais pas suffisante pour augmenter la température au niveau de la mer.

On constate aussi que l'introduction de la thermodynamique dans le système d'équations permet une très bonne cohérence avec les phénomènes observés et un bon accord des calculs avec les valeurs mesurées contrairement aux prévisions faites à partir de l'EDS. L'Effet de Serre est un mécanisme qu'il ne faudrait plus évoquer en physique et qu'il faudrait bannir du vocabulaire climatique.

Références

[1] J.L Dufresne et J. Treiner « *L'effet de serre : plus subtil qu'on ne le croit* » La météorologie N° 72 Février 2011

[2] Jean-Marc Bonnamy « La terre se rechauffe-t-elle ? Le réchauffement climatique est-il réel, Le CO₂ en est-il responsable ? 5 Mars 2018

[3] Raymond T Pierrehumbert Infrared Radiation and Planetary Temperature, Physics Today January 2011

[4] Ferenc Miskolczi; "Greenhouse effect in semi-transparent planetary atmospheres IDŐJÁRÁS *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, Vol. 111, No. 1, January–March 2007, pp. 1–40*

[5] Claes Johnson Climate thermodynamics, Computer Science and Communication, KTH, SE-10044 Stockholm, Sweden October 13, 2010

ANNEXE

Première et deuxième loi de la thermodynamique et la température de surface

Sur les diagrammes des figures 1 et 2, les seuls transferts non radiatifs pris en compte sont ceux liés à l'évaporation et à la turbulence

Un phénomène qui, en revanche, semble complètement oublié ou occulté par les physiciens du GIEC est que l'air chaud monte et, bien sûr qu'en contrepartie, l'air froid descend. Même si l'air s'élève lentement, ce mouvement et la présence de l'attraction terrestre ont des répercussions sur les transferts d'énergie au moins au sein de la troposphère.

Dans ce qui suit qui est pour une bonne part une traduction libre de l'article de Claes Johnson¹⁰ « Climate Thermodynamics » d'octobre 2010 [5] nous allons nous attacher à décrire et quantifier ce phénomène

L'atmosphère, en effet, transporte l'énergie calorifique de la surface de la terre à son sommet dans un processus cyclique, consistant en

- un air ascendant, en expansion, se refroidissant. Cet air est chauffé à sa base par la surface de la planète et par l'atmosphère qui absorbe l'énergie du soleil sous forme de rayonnement visible et UV
- un air descendant, en compression, se réchauffant. Cet air est refroidi en altitude par les rayonnements sortant dans l'espace, combiné avec l'évaporation à basse altitude et la condensation en haute altitude.

Sans l'entropie, on peut formuler à partir de la deuxième loi de la thermodynamique et en utilisant les quantités physiques de bases :

- dans le cas particulier où il y a absence d'apport extérieur de chaleur :

$$\dot{K} = W - D \quad \dot{E} = -W + D \quad K' = W - D \quad E' = -W + D$$

$$\text{Avec } K(t) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \rho u(x,t) dx, \quad P(t) = \int_0^t \int_{\Omega} g \rho u(x,s) dx ds, \quad E(t) = \int_{\Omega} c_v \rho u T(x,t) dx, \text{ le travail}$$

$$W(t) = \int_{\Omega} p \nabla \cdot u(x,t) dx \quad Q(t) = \int_{\Omega} q(x,t) dx,$$

$K(t)$ est l'énergie cinétique instantanée totale, $P(t)$ l'énergie potentielle, $E(t)$ l'énergie calorifique interne, $W(t)$ le travail par unité de temps et $D(t) \geq 0$ est le taux de dissipation turbulente (Les flux légèrement visqueux développent toujours des turbulences) :

L'apostrophe indique la différentiation par rapport au temps.

Avec $D > 0$, la 2^{ème} loi exprime ainsi un transfert irréversible d'énergie cinétique en énergie calorifique, tant que l'énergie totale $\epsilon = E + K$ reste constante comme le montre la somme des 2 équations : $\epsilon' = K' + E' = 0$

On voit que le travail W transforme l'énergie calorifique en énergie cinétique ou l'énergie cinétique en énergie calorifique selon le signe de W :

- En expansion $W > 0$, l'énergie calorifique se transforme en énergie cinétique,
- En compression $W < 0$, l'énergie cinétique se transforme en énergie calorifique.

- avec un apport d'énergie extérieure, $Q(t)$ taux de chaleur fournie au système, la 2^{ème} loi de la thermodynamique prend alors la forme : $K' + P' = W - D \quad E' = -W + D + Q$

En additionnant ces deux équations on trouve que le changement d'énergie totale ($K + P + E$) est équilibré par l'apport de chaleur extérieure :

$$\frac{d(K + P + E)}{dt} = Q, \text{ que l'on peut considérer comme exprimant la 1^{ère} loi de la}$$

thermodynamique concernant la conservation de l'énergie totale.

On peut faire le calcul suivant pour l'atmosphère en appliquant, avec les données typiques mais approximatives ci-dessous.

- vitesse d'ascension moyenne sur la troposphère = 0.005m/s,
- masse volumique moyenne = 0.69 kg/m³,
- altitude moyenne effective de TOA = 11000,
- $C_p = 1006 \text{ J/K.kg}$

¹⁰ Computer Science and Communication, KTH, SE-10044 Stockholm, Sweden.

- $\Gamma \approx -9.74$ °C/km gradient adiabatique et $\Gamma \approx -6.5$ °C/km gradient environnemental observé¹¹
- évaporation ≈ 4 mm/jour,
- chaleur de vaporisation de l'eau : 2200 kJ/kg,
- taux de dissipation liée à la turbulence : 0.001 à 0.002 w/kg,

Utilisons en complément, les valeurs du diagramme de la figure 2 provenant du rapport WG1-AR5 du GIEC : la surface de la terre reçoit 161 W/m² en provenance du soleil, l'atmosphère en absorbe 79 w /m². L'énergie totale entrante en provenance du soleil est 239 W/m² (240-1 *imbalance*), et l'énergie sortante « OLR » est aussi égale cette valeur. On a donc à l'équilibre et sans apport de chaleur (forçage radiatif où autres), **Q=0**.

Pour le mouvement ascendant (donc en expansion) d'une colonne d'air sur 1 m² :

- l'énergie potentielle $\dot{P} \approx 0,005 \times 0,69 \times 11000 \times g = 372$ w,
- L'énergie calorifique interne $\dot{E} \approx -0,005 \times 0,69 \times 1006 \times 11000 \times 6.5/1000 \approx -248$ W.

On a aussi $W - D = \dot{P} = 372$ w et comme $\dot{E} = -W + D + Q$ soit $\dot{E} = -\dot{P} + Q = -372 + 120 = -250$ W. on retrouve donc à peu de chose près la valeur de \dot{E}

Mais notons puisque à l'équilibre l'apport net de chaleur au système est nul $Q=0$, on devrait avoir $\dot{P} + \dot{E} = Q = 0$ or on a $\dot{P} + \dot{E} = 120$ à 124

Comment expliquer cette différence ?

Notons d'abord que si on était en air suffisamment sec pour ne pas avoir de condensation dans l'atmosphère, le phénomène d'expansion en fonction de l'altitude serait adiabatique et le gradient (qu'on peut dans ce cas qualifier effectivement d'adiabatique) est donné par la thermodynamique ($\Gamma=9,74$ °C/km).

La valeur calculée est alors pour $\dot{E} \approx -0,005 \times 0,69 \times 1006 \times 11000 \times 9.74/1000 \approx -372$ W.

On a bien $\dot{P} = -\dot{E}$ et $\dot{P} + \dot{E} = 0$ et $Q=0$.

Dans le cas réel, l'air en s'élevant se détend et cette expansion refroidit la troposphère. Plus l'air est froid moins il peut contenir de vapeur d'eau. Lorsque l'altitude est suffisante son humidité relative atteint ou dépasse 100 %, l'air est alors saturé et la condensation de l'eau va commencer. Il est évident que la chaleur latente qui accompagne ce changement de phase doit être ajoutée au bilan énergétique. Avec la condensation/précipitation, il y a donc apport d'énergie qui restitue dans la troposphère, celle utilisée pour l'évaporation et il suffit de bien détailler les figure 1 et 2 pour voir que cet apport d'énergie est signalé par la mention « latent heat » (dans un nuage). On peut ajouter aussi la flèche de 20 W baptisée « thermals ou sensible heat » qui désignent les échanges liés à la turbulence de l'air. Les données précédentes permettent d'estimer indépendamment ces transferts d'énergie

- pour le changement de phase de $2,2 \times 10^6 \times 10^3 \times 0,004/86400 \approx 102$ W soit plus que ce qu'indique les figures 1 et 2 (78 à 84 pour l'évapo-transpi-respiration)
- pour la turbulence environ $0.0015 \times 11000 \approx 16.5$ (20 à 24 selon les figures 2 et 1) soit un apport total d'environ $Q \approx 120$ W.

Le transfert d'énergie peut aussi être donné par $(9,74-6.5)/6,5 \times \dot{E} \approx 124$ W. Ces différentes valeurs sont tout à fait cohérentes avec la valeur de $\dot{P} + \dot{E}$ trouvée plus haut.

Bien entendu, lorsque on se déplace de la tropopause vers la surface de la planète, le contraire se produit. Il y a compression et l'énergie mécanique est transformée en chaleur. Les 372 W correspondent alors au travail de la pesanteur qui transforme l'énergie cinétique de l'air sec en énergie calorifique

¹¹ Le gradient expérimental dit environnemental ou humide en raison de la présence de vapeur dans l'atmosphère (6,5 °C/km) peut être vu comme la combinaison du gradient adiabatique sec de 9.74 °C/km et du changement de phase et de la dissipation turbulente qui réduisent effectivement la chute de température avec l'altitude.