

Comprendre l'effet d'atmosphère thermodynamique

Joseph E. Postma

(M.Sc. Astrophysics, Honours B.Sc. Astronomy)

source: http://www.tech-know.eu/uploads/Understanding_the_Atmosphere_Effect.pdf

Mars 2011

Cet article commence par un bref résumé de deux pages sur le développement théorique de l'« Effet de Serre ». Après plusieurs discussions avec des collègues, il est apparu évident que sa base théorique n'était pas largement comprise, même si la théorie semblait implicitement admise. Dans l'institution scientifique il est généralement attendu que les individus comprennent et croient les théories qu'ils soutiennent, plutôt que de savoir qu'elles existent et d'y croire. Donc il était curieux qu'il semble y avoir si peu de compréhension académique de la théorie de l'Effet de Serre, contrairement à la simple connaissance de son existence. Il doit être noté immédiatement que l'Effet de Serre est bien une théorie – ce n'est pas un simple fait empirique, comme l'existence du soleil, par exemple. Comme théorie il a un développement scientifique qui est ouvert à l'analyse et à la critique. Il est extrêmement curieux, d'un point de vue scientifique, que le mot « théorie » ne soit presque jamais associé au terme « Effet de Serre » dans les cercles publics et académiques. Indubitablement, ce fait est lié à la raison pour laquelle même les publics académiques ne sont pas familiarisés avec le développement théorique, sans parler de la connaissance de la théorie par le grand public. Donc, ce point acquis, l'« Effet de Serre » sera mentionné comme la « Théorie de la Serre », ce qui indiquera que c'est une proposition qui nécessite d'être soutenue par l'observation et qui demande aussi d'être compatible avec d'autres lois bien établies de la physique. Ceci est analogue à la gravité : comme l'atmosphère, personne ne met en doute que la gravité existe, évidemment. Ce que nous mettons en question c'est la théorie qui décrit comment elle fonctionne, et juste comme la théorie de la gravité d'Einstein qui s'écroule et échoue sous certaines conditions, et n'est pas compatible avec quelques autres parties de la physique, nous pouvons examiner si la Théorie de la Serre s'écroule et échoue sous les conditions qu'elle est supposée décrire. Cette distinction a besoin d'être soulignée parce que plusieurs scientifiques, qui vraiment devraient mieux savoir, déclareront que l'effet de la Théorie de la Serre est un « fait scientifique », alors que un scientifique devrait comprendre qu'il n'existe pas de chose telle qu'un fait scientifique, mais seulement des théories scientifiques. Celles-ci sont produites avec l'intention d'expliquer ou de décrire le fonctionnement et le comportement de données empiriques par ailleurs ordinaires. Par exemple, encore, il est hors de doute que la Terre a une atmosphère, que le temps varie, et que quelque force fait tomber les choses au sol ; ce sont des faits de la réalité, et il n'y a absolument aucune nécessité de les qualifier de l'adjectif « scientifique ». Personne ne met ces choses en question. Ces faits appartiennent et sont reconnus par tous et partout, indépendamment de la science. Ce que les scientifiques tentent de faire c'est produire des théories qui puissent décrire comment ces faits de la réalité fonctionnent, de façon logique, et de façon compatible avec d'autres théories scientifiques. Par exemple, vous pourriez souvent être témoin de quelqu'un insinuant que si vous doutez de la théorie de la gravité, vous devriez la tester en sautant par la fenêtre. C'est une chose extrêmement antiscientifique à dire, parce que bien sûr, les scientifiques doutent de la théorie de la gravité à cent pour cent ! Nous ne doutons pas que la gravité existe, mais nous doutons de la théorie scientifique qui décrit comment elle fonctionne. Et donc ce qui va de la même manière nous concerner ici, c'est d'interroger la Théorie de l'Effet de Serre.

La Théorie de la Serre est la proposition que l'atmosphère chauffe la surface de la Terre à une température plus élevée qu'elle ne serait sans une atmosphère, *via un processus* appelé « transfert radiatif infrarouge rétroactif ». C'est juste une façon sophistiquée de décrire l'idée que les gaz à effet de serre agissent comme une couverture autour de la Terre qui piège la radiation infrarouge, avec cette radiation la conduisant à être plus chaude qu'elle le serait, et ceci est supposé être grossièrement analogue au fonctionnement d'une serre de botaniste. Nous voulons examiner la proposition de la Théorie de la Serre et voir si c'est une théorie qui peut expliquer de façon satisfaisante nos observations de la température de surface de la Terre.

Le mot « radiatif » dans « transfert radiatif » signifie « de ou concernant la lumière » ; « transfert » se réfère au transfert d'énergie. Donc transfert radiatif signifie transfert d'énergie par la lumière. Dans cet article, le mot radiatif sera parfois remplacé par le mot « radiation », mais le type de radiation qui sera concerné sera toujours la radiation « radiative », signifiant encore lumière. Ce n'est pas le type de radiation que vous pourriez associer à la radioactivité, par exemple. En physique la lumière est aussi appelée radiation parce qu'elle « rayonne de l'énergie loin de sa source », que ce soit l'énergie lumineuse d'une allumette ou d'une étoile.

La raison pour laquelle il est important d'examiner la Théorie de la Serre c'est parce qu'elle soutient fondamentalement ce qui intéresse le « réchauffement global », parfois appelé « changement climatique anthropique (i.e. fait par l'homme) ». Ces deux expressions sont généralement interchangeables, mais sont quelque peu mutuellement ambiguës. Le changement climatique anthropique peut signifier tout type de changement climatique, qu'il soit réchauffement, refroidissement, plus de pluies, moins de pluies, etc., causé par l'homme pour n'importe quelle raison. Bien sûr, le changement climatique naturel s'est toujours produit au cours de l'histoire de la Terre, et donc le changement climatique anthropique doit être distingué de cela. En fait la seule constante climatique est que le climat change constamment, c'est pourquoi il n'y a jamais eu de périodes identifiables de climat stable au cours de l'histoire géologique de la Terre.

Le réchauffement global anthropique, d'autre part, signifie un réchauffement global de l'atmosphère théoriquement dû à une émission humaine de gaz carbonique (CO₂), qui est alors en théorie cause du

renforcement de l'effet de la Théorie de la Serre, qui est ce qui réellement entraîne le prétendu réchauffement. C'est cette dernière définition qui est plus fondamentale et qui est directement reliée à la Théorie de la Serre, parce que le réchauffement atmosphérique via le CO₂ peut être théorisé pour conduire à des changements variés du climat comme des changements de précipitations, etc. Et, il est aussi possible qu'un refroidissement local puisse s'établir, alors que la tendance moyenne au réchauffement général de l'atmosphère entière se maintient. Donc, « le réchauffement climatique anthropique » tombe sous la théorie du réchauffement global causé par l'émission anthropique de CO₂ et de l'effet de la Théorie de la Serre. Pour être parfaitement clair, nous l'appelons le réchauffement global « anthropique » (RGA=AGW) de façon à le distinguer du réchauffement naturel, par exemple venant des changements naturels de la brillance du Soleil, et des émissions naturelles de CO₂ de la biosphère (toute vie, telle que plantes, animaux, bactéries) de la lithosphère (toute l'activité géologique telle que volcan, érosion de roches comme le calcaire, les océans, etc.). Ainsi, le réchauffement global anthropique causé par l'émission anthropique de CO₂ dépend de la Théorie de la Serre pour produire vraiment le dit réchauffement anthropique. Et ceci se distingue du Réchauffement Global Naturel (RGN) qui pourrait théoriquement être dû à l'émission naturelle de CO₂ qui dépendrait aussi de la Théorie de la Serre pour produire vraiment le dit réchauffement naturel. En d'autres termes, la Théorie de la Serre établit qu'un accroissement du CO₂ atmosphérique (ou de tout autre gaz [à effet] de « serre », mais le CO₂ est celui qui nous concerne le plus), qu'il soit humain ou naturel, devrait causer un réchauffement atmosphérique global en moyenne par radiation infrarouge rétroactive, bien qu'il puisse exister aussi, en certains endroits, un refroidissement local à petite échelle. Ainsi, il y a deux parties dans l'analyse de la Théorie de la Serre : Est-ce que le transfert radiatif infrarouge rétroactif agit comme une couverture, et explique la température de surface de la Terre, de façon analogue au bâtiment d'une serre ; et est-ce que des changements du CO₂ atmosphérique entraînent des changements significatifs de la température atmosphérique via ce type de Théorie radiative de la Serre ?

Afin de répondre à ces questions nous devons entrer dans le développement physique et mathématique de quelques faits fondamentaux au sujet de la façon dont le Soleil et la Terre échangent réciproquement la radiation. Nous allons aborder un peu de math dans la section suivante, mais je veux insister sur une chose importante : je ne demande pas au lecteur de cet article de comprendre complètement ou de suivre tout le développement des équations mathématiques. Quand je lis un papier scientifique qui contient beaucoup de maths, usuellement je saute par dessus les maths et continue de lire le texte pour voir ce qui est le point d'ensemble. Sauf si un papier scientifique concerne spécifiquement le développement de nouvelles équations dont on n'est pas sûr, il est généralement suffisant de constater que l'équation a bien été écrite et montrée, mais vous n'êtes pas requis de la travailler par vous-même. Vous n'avez qu'à continuer à lire pour savoir de quoi il retourne. La raison pour laquelle je fais ce point et je parle ici au lecteur à la première personne, est parce que je réalise que tout le monde qui lit ceci n'a pas de diplôme en physique ou n'aime pas les mathématiques, et je ne voudrais pas qu'ils arrêtent la lecture quand je commence à en parler. La physique impliquée ici est celle que vous trouveriez en classe supérieure mathématique de lycée, et en première année de physique à l'université. S'il y a des décennies que vous avez fait des maths ou que la physique fut votre cours le plus exécuté à l'école, ne vous inquiétez pas ! Continuez seulement à lire, j'essayerai de décrire ce qui arrive avec assez de clarté de façon à ce que ceux qui veulent puissent aussi faire le travail par eux-mêmes.

Un concept doit être présenté avant que nous continuions avec quelques maths, il est appelé un « corps noir ». En physique, un corps noir est un outil conceptuel très important car son comportement est lié à des concepts fondamentaux de la physique, tels que les lois de la thermodynamique. Un corps noir est tout simplement ce qu'il dit être : un objet qui est complètement noir. La raison pour laquelle il est noir est parce qu'il absorbe 100% de toute la lumière qui le touche, et n'en réfléchit rien. Donc il paraît noir ! Ceci est un aspect du « comportement » auquel nous nous référons en discutant de corps noir : son comportement lorsqu'il est touché par de la lumière. Et ce comportement est qu'il l'absorbe complètement. Nous devons souligner que dans le monde réel, la plupart des objets réfléchiront une partie de la lumière incidente et absorberont le reste. Mais, même dans ce cas, beaucoup d'objets peuvent être considérés comme très proche d'un corps noir théorique, et pour ce faire il suffit d'enlever de la radiation, la fraction de lumière réfléchie. Par exemple, si 30% de la lumière est réfléchie, alors 70% est absorbée et vous en tenez compte dans le calcul.

Quand un corps noir absorbe l'énergie d'une lumière et qu'il n'y a pas d'autres sources de chaleur ou de lumière à proximité pour le réchauffer, alors il chauffera jusqu'à une température possible tenant compte de la quantité d'énergie venant de la lumière absorbée. Si la source de lumière est constante, c'est-à-dire qu'elle brille avec la même brillance invariable tout le temps, alors le corps noir absorbant cette lumière chauffera jusqu'à une température maximale correspondant à l'énergie dans la lumière et pas plus haut. Quand cet état est atteint, il est appelé « équilibre thermique radiatif », qui signifie que l'objet a atteint une température stable constante en équilibre avec la quantité de radiation qu'il absorbe de la source de lumière. Ceci est distinct de l'« équilibre thermique » ordinaire, qui est celui atteint par deux objets en contact physique quand ils viennent à la même température, s'ils étaient partis de températures différentes. Dans équilibre thermique radiatif, l'objet absorbant la lumière ne viendra pas à la température de la source émettrice, mais en fait sera toujours plus froid car, la distance entre les deux objets réduit la densité du flux d'énergie de radiation de la source.

Ceci nous conduit à la deuxième partie de la loi des corps noirs ce qui les rends si importants. Quand un

corps noir a atteint l'équilibre thermique, il ne peut plus absorber plus de lumière pour s'échauffer et donc doit ré-émettre exactement la quantité d'énergie lumineuse qu'il absorbe. Parce qu'un corps noir ne peut pas seulement réfléchir la lumière, il doit la ré-émettre comme radiation thermique. Le spectre de cette lumière ré-émise suit une équation bien connue appelée loi de Planck de la radiation du corps noir, d'après le physicien allemand qui aida à sa découverte au début des années 1900. Cette loi nous autorise à calculer la quantité totale d'énergie dans un spectre de corps noir, et à quelle température exacte doit être un corps pour émettre cette quantité d'énergie. Nous pouvons déterminer exactement ce que les températures d'équilibre doivent être. Pour un corps du monde réel qui en réalité réfléchit un peu de lumière mais absorbe le reste, quand nous en tenons compte dans les équations, nous trouvons que l'objet suit de près le corps noir idéal, et ceci, bien sûr est confirmé par l'observation. Nous pouvons donc calculer la température « effective » que l'objet devrait avoir, s'il était un corps noir parfait émettant cette quantité de radiation. Ainsi, strictement parlant, bien que le corps noir absorbe toute la lumière qui l'atteint, il ne devrait pas être parfaitement noir à toutes les longueurs d'onde parce que l'énergie thermique qu'il ré-émet est aussi une forme de lumière. Mais il apparaît noir parce que cette lumière ré-émise est d'une énergie beaucoup plus faible que la lumière absorbée. Par exemple, si l'objet absorbe la lumière visible, alors il ré-émettra de la lumière infrarouge que nous ne pouvons pas voir, et donc il semble toujours noir. L'objet devrait s'échauffer à très haute température en effet pour ré-émettre une lumière visible ; un élément de four chauffé au rouge, par exemple, peut atteindre 1000 °C (mais il est chauffé par l'électricité qui le traverse). Et comme mentionné plus haut, dans le monde réel, beaucoup d'objets que vous n'attendriez pas nécessairement qu'ils se comportent comme des corps noirs, fonctionnent pourtant comme eux. Fondamentalement, chaque chose tente de se comporter comme un corps noir pour autant que les conditions physiques le permettent. Et ainsi, même les étoiles comme le soleil émettent une radiation très proche de celle d'un corps noir, en accord avec la loi de radiation du corps noir de Planck. Vous pouvez donc comprendre pourquoi le corps noir est un outil conceptuel si important en physique. Vous ne retrouverez que rarement un corps noir réellement parfait dans la nature ; mais partout où vous regarderez vous trouverez des choses qui se comportent de manière très semblable. Aussi étrange que cela paraisse, la seule chose qui en fait ressemble parfaitement à un corps noir, c'est l'univers tout entier lui-même ! Et probablement les trous noirs, mais c'est une discussion entièrement différente.

Pour finir, il y a une loi fondamentale de la physique qui concerne l'émission d'énergie thermique par un corps noir : il est absolument fondamentalement impossible pour un corps noir de se réchauffer lui-même par sa propre radiation. Ceci est en fait vrai pour *tous* les objets, mais nous ne nous référerons ici qu'aux corps noirs puisque c'est le sujet qui nous occupe. Par exemple imaginez un corps noir qui absorbe de l'énergie d'une source de lumière comme une ampoule, et qu'il s'est échauffé autant qu'il a pu jusqu'à atteindre l'équilibre thermique radiatif. Le corps noir ré-émettra juste autant d'énergie que l'énergie lumineuse qu'il absorbe. Cependant, puisque le corps noir ne s'échauffe pas à une température aussi élevée que la source de lumière, sa lumière infrarouge ré-émise vient d'une température plus faible et donc d'une plus faible énergie en comparaison de la lumière incidente qu'il absorbe. Maintenant voici l'argument conclusif : imaginez que vous preniez un miroir qui réfléchit la lumière infrarouge, et que vous réfléchissiez une partie de la lumière infrarouge émise par le corps noir vers lui-même. Qu'arrive-t-il alors à la température du corps noir ? On *pourrait* penser que puisque le corps noir absorbe maintenant plus de lumière, même si c'est sa propre lumière infrarouge, alors il devrait s'échauffer. Mais en fait il *ne* s'échauffe *pas* ; sa température reste exactement la même. La raison en est très simple à comprendre mais extrêmement importante pour la physique : le corps noir est déjà en équilibre radiatif avec une source plus chaude d'énergie, le spectre d'énergie radiative de la lumière de l'ampoule. Vous ne pouvez rendre quelque objet que ce soit plus chaud avec un objet plus froid, ou même à la même température ! Vous pouvez seulement chauffer un objet avec un objet plus chaud ! Cette réalité est centrale pour les lois de la Thermodynamique, et est si fondamentale en physique moderne qu'elle ne peut être exprimée avec trop de force. Pour rendre l'idée plus intuitive, imaginez un cube de glace. Même si c'est un cube à zéro degrés Celsius, il est encore à 273 degrés Kelvin au-dessus du zéro absolu et donc contient une grande quantité d'énergie, qu'il irradie comme énergie infrarouge thermique. Bien sûr nous ne ressentons pas cette radiation parce que nous sommes plus chauds que le cube de glace (heureusement !), et nous ne la voyons pas puisque nos yeux ne sont pas sensibles à cette faible fréquence de radiation lumineuse. Pourriez-vous alors simplement apporter un autre cube de glace à 0 °C et donc irradiant aussi sa propre énergie thermique à cette température, et donc chauffer le premier cube en plaçant le second près de lui ? Ou, pourriez-vous chauffer le premier cube en le plaçant dans un freezer à -10 °C ? Dans les deux cas, il y a beaucoup d'énergie thermique venant des sources secondaires qui atteint le premier cube, aussi cette énergie ne pourrait-elle pas entrer dans le cube et le réchauffer ? Bien sûr que non ! Vous ne pourriez chauffer le premier cube qu'en le présentant à quelque chose de plus chaud que lui, comme la paume de votre main, ou un verre d'eau à 10 °C, ou la radiation du soleil. Ou, imaginez l'exemple d'une bougie allumée : pourriez-vous utiliser un miroir pour renvoyer la lumière de la bougie sur sa flamme, et ainsi la rendre plus chaude ? De telles conjectures ne sont pas la façon dont fonctionne la réalité, et rappelez-vous que ces concepts sont vrais pour tout objet, pas seulement les corps noirs. Le point principal est : la chaleur coule naturellement du chaud vers le froid, que ce soit par conduction, convection ou radiation, et plus important, un corps ne peut élever sa propre température même si ses propres radiations devaient lui être renvoyées.

La Température d'Équilibre Radiatif de la Terre avec le Soleil

Nous allons entrer un peu dans la physique et découvrir que nous pouvons assez précisément prédire la température radiative de la Terre avec seulement une petite asperersion de lois de la physique. Dans les équations ci-dessous, il y aura quelques lettres entre parenthèses (ABC) directement à droite des équations. Ces lettres indiquent les unités des paramètres que les équations utilisent. Par exemple « W » signifie Watts, « m » signifie mètres, et (W/m^2) signifierait Watts par mètre carré. Ce sont les mêmes types de Watts que vous voyez en achetant une ampoule de 100 Watts, et en physique même la brillance du Soleil est mesurée par ces unités (par exemple, la puissance du Soleil est d'environ 385 millions de milliards de milliards de Watts !) Elles sont incluses pour garder une trace de la nature du processus physique en description. La brillance de surface d'un objet est appelé son flux (f), et il est mesuré en unités W/m^2 . La loi de Stefan-Boltzmann vient de l'analyse de spectres de corps noirs, et elle dit qu'un objet qui rayonne comme un corps noir a une brillance qui est proportionnelle à la température de l'objet (« T » en degrés Kelvin) à la puissance quatrième, comme ci-dessous :

$$f = \sigma T^4 \quad (W / m^2) \quad \{1\}$$

Le facteur de proportionnalité 'σ' est appelé 'constante de Stefan-Boltzmann' et a une valeur de $5,67 \times 10^{-8}$ ($W/m^2/K^4$).

Le Soleil (O est le symbole astronomique pour le Soleil) émet un rayonnement de manière très analogue à un corps noir. Nous connaissons la température solaire équivalent au corps noir ou « effective » à partir des observations de son spectre. Donc nous pouvons calculer la puissance totale émise, appelée Luminosité, du soleil en utilisant l'équation ci-dessus et en multipliant par la surface (A_{surfO}), du soleil qui évidemment est sphérique. Ainsi :

$$\begin{aligned} L_{\odot} &= f \cdot A_{surf\odot} \\ &= \sigma T_{\odot}^4 4\pi R_{\odot}^2 \quad (W) \end{aligned} \quad \{2\}$$

Ceci est la puissance totale émise par la surface entière du Soleil. Pour avoir le flux solaire à une distance donnée (d), nous devons reporter la luminosité de la surface sphérique du soleil sur une surface plus grande dont le rayon est égal à la distance (d) en question. En utilisant la distance de la Terre comme exemple (\oplus est le symbole astronomique de la Terre), et en divisant par la surface de la sphère plus grande ($4\pi d_{\oplus}^2$) nous avons :

$$\begin{aligned} F_{\odot} &= \frac{L_{\odot}}{4\pi d_{\oplus}^2} \\ &= \frac{\sigma T_{\odot}^4 4\pi R_{\odot}^2}{4\pi d_{\oplus}^2} \\ &= \sigma T_{\odot}^4 \frac{R_{\odot}^2}{d_{\oplus}^2} \quad (W / m^2) \end{aligned} \quad \{3\}$$

Notons que le facteur de projection sphérique 4π disparaît parce que nous reportons une petite sphère ($4\pi R_{\odot}^2$) sur une plus grande ($4\pi d_{\oplus}^2$). C'est le flux solaire sur la face intérieure d'une sphère centrée sur le Soleil, qui a un rayon égal à la distance de la Terre au Soleil. En d'autres mots, c'est l'intensité de l'énergie solaire qui atteint la Terre.

Nous pouvons maintenant déterminer la puissance totale interceptée par la Terre. Prenons simplement le flux solaire à la distance de la Terre que nous venons de calculer, et multiplions-le par la surface d'interception de la terre, qui est un disque de rayon terrestre (πR_{\oplus}^2):

$$\begin{aligned} L_{\odot int.} &= F_{\odot} \cdot \pi R_{\oplus}^2 \\ &= \sigma T_{\odot}^4 \frac{R_{\odot}^2}{d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2 \quad (W) \end{aligned} \quad \{4\}$$

Cependant, toute l'énergie interceptée par la Terre n'est pas réellement absorbée par elle, parce qu'une certaine partie est réfléchié directement dans l'espace extérieur. Ce type de réflexion directe est ce qui nous permet de voir chaque planète ou même sa surface ! La capacité d'une surface de réfléchir la radiation lumineuse incidente est appelée albédo (α), qui est un facteur sans unité qui va de 0 à 1 (0% à 100%), 0

pour sans réflexion du tout et 1, réflexion totale. Tous les corps ont en général un albédo et pour la planète Terre sa valeur moyenne est $\alpha_{\oplus} = 0.3$, ce qui signifie que la Terre, atmosphère incluse, réfléchit 30% de la lumière solaire incidente, mais absorbe les autres 70% dans l'atmosphère et le sol. Donc, si nous voulons savoir quelle quantité de la puissance solaire la Terre et son atmosphère absorbe réellement la faisant chauffer, nous devons multiplier dans l'équation ci-dessus par le facteur 70%, ou $(1 - \alpha_{\oplus})$:

$$\begin{aligned} L_{\odot_{abs.}} &= L_{\odot_{irr.}} \cdot (1 - \alpha_{\oplus}) \\ &= \sigma T_{\odot}^4 \frac{R_{\odot}^2}{d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2 (1 - \alpha_{\oplus}) \quad (W) \end{aligned} \quad \{5\}$$

Et ainsi, nous sommes finalement arrivés à la formule qui nous dit combien d'énergie solaire la Terre et son atmosphère absorbent, et elle n'est vraiment pas très compliquée. C'est le point de départ pour déterminer combien de chaleur la Terre et son atmosphère vont réellement obtenir du Soleil par chauffage radiatif. Pour déterminer cette température nous postulons simplement que, puisque le Soleil a brillé sur la Terre depuis des milliers, des millions et des milliards d'années, il a maintenant chauffé la Terre et son atmosphère autant qu'il était possible et qu'il ne la chauffera pas plus désormais. Cet état est appelé équilibre thermique radiatif. Maintenant, il est vrai qu'il y a constamment des variations de court terme de la brillance du Soleil et de l'albédo de la Terre, et que certains lieux terrestres sont toujours en cours de passage du jour à la nuit, et que le bilan radiatif Soleil-Terre est généralement en dehors de l'équilibre thermique radiatif local au cours de telles périodes. Cependant, nous sommes simplement intéressés par les moyennes à long terme, et ainsi donc nous pouvons examiner les valeurs moyennes de la brillance solaire et de l'albédo de la Terre pour atteindre une estimation de la température moyenne d'équilibre thermique radiatif, parce que, sur le long terme, ces variations s'annulent dans les moyennes.

Il est vraiment très simple de déterminer quelle est cette température car l'équation dont nous avons besoin est une de celles que nous avons déjà utilisées. Avant, nous avons besoin de faire état d'une autre loi de la physique appelée Loi de Kirchhoff de la radiation thermique. Elle dit : « à l'équilibre thermique radiatif, l'émissivité d'un corps égale son absorptivité. » Autrement dit la Terre émet exactement la quantité d'énergie radiative qu'elle absorbe quand elle se trouve en équilibre thermique radiatif avec le Soleil. Si elle ne le fait pas c'est qu'elle ne doit pas être en équilibre radiatif, mais nous devons certainement attendre qu'elle le soit en moyenne au long cours car le Soleil l'illumine bien depuis une très longue durée. Nous avons déjà déterminé une formule de la quantité de radiation du Soleil absorbée effectivement par la Terre (équation {5}), donc nous sommes maintenant à la moitié du chemin.

La dernière pièce du puzzle consiste à considérer qu'à l'équilibre thermique un objet émet généralement l'énergie thermique suivant un spectre du corps noir. Nous savons déjà exactement comment un corps noir irradie, nous l'avons vu dans les équations {1} et {2}. L'énergie totale émise (Luminosité) par un corps noir c'est sa brillance de surface (σT^4), où T est la température de l'objet) multipliée par l'aire de sa surface (A_{surf}), ou $L = \sigma T^4 \cdot A_{surf}$ qui est ce que nous avons vu dans l'équation {2}. Pour la Terre, l'énergie émise est donc :

$$L_{\oplus_{emit.}} = \sigma T_{\oplus}^4 \cdot A_{surf_{\oplus}} \quad (W) \quad \{6\}$$

Pour terminer l'équation {6} nous devons déterminer la surface correcte à utiliser, et il y a trois possibilités suivant que l'on considère que la Terre émettant comme un disque, un hémisphère, une sphère :

$$A_{surf_{\oplus}} = \begin{cases} 1\pi R_{\oplus}^2 & \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ (disk)} \\ 2 \text{ (hemisphere)} \\ 4 \text{ (sphere)} \end{array} \right. \end{cases} = \pi R_{\oplus}^2 \cdot \begin{cases} 1 \\ 2 \\ 4 \end{cases} \quad \{7\}$$

De l'équation {7} nous pouvons voir que des aires circulaires impliquent toujours le terme mathématique πR^2 . Cependant, il y a un facteur de projection « p » de 1, 2, ou 4, suivant qu'il s'agit de l'aire d'un disque, d'un hémisphère ou d'une sphère. Donc en utilisant le facteur de projection « p », nous obtenons pour l'équation {6} :

$$L_{\oplus_{emit.}} = \sigma T_{\oplus}^4 \pi R_{\oplus}^2 \cdot p \quad (W) \quad \{8\}$$

Et maintenant, il ne nous reste plus qu'une étape. Si nous voulons connaître la température d'équilibre radiatif de la Terre, par la loi de Kirchhoff, nous pouvons simplement rendre égales l'énergie émise et l'énergie solaire absorbée par la Terre et résoudre l'équation pour la variable inconnue T_{\oplus} :

$$L_{\oplus \text{entr.}} = L_{\oplus \text{abr.}}$$

$$\sigma T_{\oplus}^4 \pi R_{\oplus}^2 \cdot p = \sigma T_{\odot}^4 \frac{R_{\odot}^2}{d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2 (1 - \alpha_{\oplus})$$

$$T_{\oplus}^4 = \frac{\sigma T_{\odot}^4 \frac{R_{\odot}^2}{d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2 (1 - \alpha_{\oplus})}{\sigma \pi R_{\oplus}^2 \cdot p}$$

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt[4]{\frac{R_{\odot}^2 (1 - \alpha_{\oplus})}{d_{\oplus}^2 p}} \quad \{9\}$$

Il y a quelques remarques intéressantes à propos de ce résultat. Un, c'est relativement simple et facile à calculer. Deux, tous les paramètres dans l'équation sont connus ou assez faciles à déterminer. Et, le plus important est que le facteur numérique de surface πR_{\oplus}^2 disparaît en fait, et que la seule dépendance est pour la distance de l'objet au Soleil et son facteur de projection « p », et ainsi cette équation peut être utilisée pour tout objet circulaire tant que vous connaissez son facteur de projection (et son albédo). Pour la planète Terre entière prise comme un tout, nous devons considérer qu'à la fois la face éclairée et la face obscure de la Terre émettent une radiation thermique. Il est vrai que seulement un côté de la Terre à la fois reçoit la radiation solaire, mais ce sont les deux faces qui ré-émettent la radiation thermique. Donc, en moyenne la Terre et son atmosphère doivent être traitées comme une sphère $p = 4$, si vous voulez la température théorique moyenne de la sphère entière. En utilisant les valeurs de paramètre ci dessous :

$$T_{\odot} = 5778 \text{ (K)}$$

$$R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ (m)}$$

$$d_{\oplus} = 1.496 \times 10^{11} \text{ (m)}$$

$$\alpha_{\oplus} = 0.3$$

nous pouvons calculer que la température moyenne d'équilibre radiatif de la Terre avec le Soleil est :

$$T_{\oplus} = 255 \text{ K} = -18^{\circ} \text{ C} \quad \{10\}$$

Cette température théorique calculée est-elle confirmée par la température radiative de la Terre réellement observée ? Nous répondrons à cette question définitivement dans un moment mais d'abord quelques points doivent être discutés.

Il est de la plus haute importance de comprendre que cette température calculée 1) est seulement une température moyenne, et *ne sera pas* observée généralement en tous lieux ; 2) est seulement la température d'équilibre radiatif de l'objet entier, et donc la rotation de la terre passant du jour (recevant et émettant de l'énergie thermique) à la nuit (seulement émettant de l'énergie), produira en continu des variations de petite échelle de l'équilibre thermique à la fois en plus chaud et en plus froid ; 3) n'est pas la température moyenne à la surface réelle au niveau de la mer, car la plupart de la radiation thermique émise par la Terre vient de la haute atmosphère et donc, c'est la température trouvée à cet endroit.

Comme exemple des différences que l'on peut trouver, imaginez que vous ayez une pièce de 10 cents que vous auriez peinte de façon à avoir un albédo égal à celui de la Terre. Orientez la pièce face au soleil. Cet objet a un facteur de projection $p = 1$ (disque), et donc la température d'équilibre thermique de la face de la pièce exposée au soleil calculée par l'équation {9} est 360K, ou 87°C ! Bien, vous pourriez placer cette pièce sur le sol quand le soleil est juste à la verticale, le sol local peut être considéré comme un disque et donc atteindre aussi 87°C.

Les variations locales d'albédo créent aussi des différences par rapport à la moyenne. L'eau océanique est en fait très sombre et a un très faible albédo, descendant à $a_{\text{océan}} = 0.03$ quand le soleil est exactement à la verticale. Utilisant cette valeur d'albédo pour calculer la température d'équilibre local quand le Soleil est à la verticale sur l'océan, la température obtenue est 391K ou 118°C ! (Nous y reviendrons dans un moment pour nous demander pourquoi ces températures élevées ne sont pas réellement trouvées à la surface de la Terre.)

Ces sortes de variations de la moyenne pourraient être considérées comme un problème pour confirmer si notre calcul de la moyenne radiative globale dans l'équation {10} est correcte ou non. Bien, il y a en vérité une solution très simple. Puisque ce que nous avons calculé est la température d'équilibre radiatif entre le Soleil et la Terre, nous n'avons besoin de vérifier que la température radiative de la Terre (et de son

atmosphère) ! Et ceci est réalisé de la même façon que nous avons utilisée pour le Soleil : nous évaluons le spectre de radiation émis en l'observant à partir de l'espace. Le spectre radiatif du Soleil ressemble de près au spectre du corps noir, et celui de la Terre aussi et à cause de cela nous pouvons calculer la température réelle de corps noir requise pour produire le spectre observé. Evidemment, les températures de nuit et de jour de la Terre sont généralement différentes, et donc ont des spectres différents. Cependant, puisque c'est le spectre moyen que nous voulons pour le comparer à la température moyenne que nous avons calculée, nous prenons les spectres sur toutes les faces et nous faisons simplement la moyenne des résultats.

Dans une nouvelle confirmation étonnante de la puissance des lois de la Thermodynamique, spectres du corps noir et loi de la radiation de Kichhoff, Le spectre moyen de la radiation thermique de la Terre (et de son atmosphère) ressemble en effet au corps noir à -18°C ! Et donc la température d'équilibre radiatif de la Terre est mesurée comme étant juste celle que nous avons calculée ! La Terre n'est ni plus chaude ni plus froide qu'elle devraient être suivant les lois de la physique. Telle est la puissance de la physique moderne et des mathématiques élémentaires et c'est vraiment très étonnant.

La température de surface au niveau de la mer

Par les équations {1} et {3} il peut être calculé qu'une sphère d'un corps noir parfait entourant le Soleil d'un rayon de une unité astronomique (1 u.a., distance de la Terre au Soleil) s'échaufferait à une température d'équilibre de 121°C . C'est la température maximum concevable qu'un objet puisse atteindre par chauffage radiatif solaire, elle correspond à la densité de flux d'énergie radiative solaire à cette distance. Les Lois de la Thermodynamique nous disent qu'il ne peut pas y avoir de ré-échange naturel de cette radiation pouvant produire un réchauffement supplémentaire. Quand le Soleil est à la verticale sur une partie de la Terre, le sol local est comme un disque et donc peut atteindre cette température, mais des variations locales d'albédo et l'absorption atmosphérique entraîneront une diminution de cette température.

Examinons un exemple qui devrait être intuitif pour la plupart des gens. Le sable a une gamme d'albédo de un peu moins de 20% à plus de 40%, pour un sable de plage nous prendrons une valeur moyenne de 30%. Cela convient car c'est la même valeur moyenne que pour la Terre entière. Par un jour chaud et ensoleillé, à la plage, au milieu de l'été, le Soleil est très proche de la verticale pendant quelques heures autour du midi solaire. Pendant ce temps, par l'équation de Stefan-Boltzmann on calcule que la température d'équilibre locale est 87°C . Nous sommes familiers de la traversée en courant pour essayer de ne pas cuire nos pieds nus, mais le sable n'est pas près de 87°C , et vraiment plus près de 45°C - 55°C . Quelle est ici la source de désaccord ?

En astronomie, la mesure de la brillance d'une étoile est appelée photométrie. Il est bien connu des astronomes depuis des centaines d'années que la brillance d'une étoile est réduite quand sa lumière passe de l'espace extérieur vide à travers l'atmosphère jusqu'au sol où se trouve le télescope. A la base, nous pouvons imaginer l'atmosphère de la Terre fonctionnant comme un brouillard, qui ainsi réduit la brillance d'une source lumineuse en comparaison de ce qu'elle serait sans brouillard. La première étape de calcul d'un astronome pour déterminer la brillance de l'étoile qu'ils mesurent est d'appliquer ce qui est appelé la « correction photométrique » aux données de brillance mesurées. Il y a plusieurs méthodes de mesure pour déterminer les valeurs de cette correction, que nous n'avons pas besoin d'étudier ici, mais après que cette correction soit appliquée aux données, l'astronome possède ce qui est appelé la brillance « outre atmosphérique » d'une étoile. Cet effet d'atmosphère est un fait numérique identique à celui qui voit l'éclairage des phares d'un véhicule réduit en distance lors d'une conduite dans une nuit de brouillard. En astronomie et en physique ce phénomène est généralement appelé « extinction atmosphérique ».

Il est souvent affirmé que l'atmosphère terrestre est transparente aux longueurs d'onde de la lumière visible, impliquant que *toute* la lumière visible du Soleil arrive jusqu'au sol. Cette interprétation simple est physiquement inexacte. Bien sûr le Soleil est une étoile et les effets de l'extinction atmosphérique s'appliquent également à lui. Les longueurs d'onde dans le jaune supportent environ 25% d'extinction quand le Soleil est à la verticale, avec les ondes plus courtes plus réduites et les plus longues moins ; l'extinction moyenne pondérée sur toutes les longueurs d'onde est en gros de 25%, mais cela peut être légèrement supérieur ou inférieur en fonction de la transparence de l'air. La quantité d'extinction est aussi accrue si la lumière traverse plus d'atmosphère, ce qui arrive quand l'étoile n'est pas directement à la verticale. La lumière voyage alors à travers l'atmosphère jusqu'à votre emplacement sous un angle. Bien sûr, s'il y a des nuages, alors, à peine quelques rayons passent au travers.

Le résultat net est que de la totalité de l'énergie radiative qui atteint le sommet de l'atmosphère, seulement 75% arrive réellement à la surface quand le Soleil est directement à la verticale. Les autres 25% de l'énergie solaire sont perdus dans l'atmosphère par l'extinction. Si nous symbolisons l'extinction par la lettre grecque epsilon (ϵ), nous pouvons facilement modifier l'équation {9} pour en tenir compte et nous pouvons alors prédire la température d'équilibre radiatif de la surface. Nous incorporons simplement l'extinction (ϵ) de la même façon que nous l'avons fait pour l'albédo et la nouvelle équation devient :

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt[4]{\frac{R_{\odot}^2 (1 - \alpha_{\oplus})(1 - \epsilon_{\oplus})}{d_{\oplus}^2 p}} \quad \{11\}$$

Qu'est ce que cette équation prédit pour la température du sable d'une plage par un beau jour chaud d'été ? Utilisant les paramètres listés plus haut et avec $\epsilon_{\oplus} = 0,25$, le calcul de la température du sable donne 62°C , et c'est très près de ce que nous attendrions. Si la journée est très claire et que l'extinction est réduite, elle peut, s'élever à peut-être cinq degrés au-dessus de cela, sur le sable. Si l'albédo est réduit parce que vous marchez sur de l'asphalte, alors, cela peut être encore plus chaud ! L'air qui vous entoure par de tels jours n'est pas aussi chaud, mais peut atteindre habituellement 35°C . La raison pour laquelle l'air n'est pas aussi chaud que le sable, même s'il est en contact avec lui, est qu'il circule continuellement, l'air en contact direct montant instantanément et donc se dilatant et se refroidissant, l'air froid du dessus tombant pour prendre sa place. Cette montée et dilatation de l'air chaud et cette retombée de l'air froid est appelée « convection » atmosphérique. S'il n'y avait pas ce refroidissement convectif continu, la température de l'air sur la plage s'élèverait de façon insupportable et ce seraient les endroits les plus fuis de la planète.

La fraction de l'énergie solaire radiative qui est directement absorbée par l'atmosphère (approximativement 25% via l'extinction) ne contribue pas à la température de l'air de surface dans l'exemple ci-dessus. Il y a deux raisons à cela. La première est que l'air n'absorbe que 25% de l'énergie solaire par rapport aux 45% que le sol absorbe (après déduction de l'albédo moyen). Donc mécaniquement l'air ne sera pas autant chauffé que le sol par la radiation. Et, bien sûr une chose qui est plus froide ne peut transmettre de chaleur à une chose plus chaude, que ce soit par conduction ou radiation, en accord avec les Lois de la Thermodynamique. La seconde raison est que l'atmosphère est un volume, pas une surface, et il y a donc beaucoup plus de « matériau » qui doit être chauffé. Ou, en d'autres termes l'énergie solaire est dispersée dans une grande quantité de matière dans l'atmosphère, et est donc diluée. Une surface physique comme le sol voit toute l'énergie solaire concentrée directement sur une surface donc à deux dimensions alors que l'atmosphère l'absorbe dans un volume donc à trois dimensions. Si vous pouviez traiter l'atmosphère locale comme un disque absorbant 25% de la radiation incidente du Soleil, alors sa température d'équilibre serait d'environ 6°C . Cependant, ceci est encore une approximation trop simple dans ce cas, car les courants de convection de l'air au dessus du sol transporterait la chaleur haut dans l'atmosphère. Il y aurait aussi le chauffage radiatif du sol plus chaud dans l'atmosphère plus froide, mais ces effets seraient complètement dominés par les processus physiques beaucoup plus efficaces de conduction et convection.

Quelle est l'aire de la surface de la Terre ayant le Soleil exactement à la verticale pouvant donc être assimilée à un disque ? La surface de la Terre est évidemment courbe, donc nous pouvons décider que nous considérerons une déviation maximale de 10% par rapport à un disque plat dans cette approximation. Par la trigonométrie de base nous trouvons qu'une aire circulaire de 5747 km de diamètre serait à plus de 90% assimilable à un disque, étant donnée le rayon terrestre de 6371km. Ceci équivaut à une surface d'environ trente six millions de kilomètres carrés, ce qui est un tiers plus grand que le continent nord américain ! Prenons cette surface dans l'Océan Pacifique. S'il n'y avait pas de nuages sur cette surface circulaire, alors l'albédo serait en moyenne 5% et l'extinction toujours voisine de 25%. Si nous réduisons aussi le flux dans l'équation de Stefan-Boltzmann de 10%, nous calculons alors une température d'équilibre d'au moins 80°C , et aussi élevée que 89°C , pour cette tellement énorme quantité d'eau ! Si vous ajoutez les nuages et un albédo moyen de 30%, alors vous avez encore au moins 54°C et jusqu'à 62°C pour toute surface de la Terre avec le Soleil directement à la verticale, y compris sur le sol. Bien sûr, dans les océans, l'énergie solaire incidente n'est pas entièrement absorbée à la surface de l'eau, mais la majorité l'est dans quelques douzaines de mètres et qui n'atteignent donc pas ce niveau de chaleur. L'eau océanique la plus chaude est trouvée dans l'océan indien où certaines parties atteignent 28°C . Vous avez aussi les courants océaniques continus qui font circuler l'eau des tropiques vers les pôles et l'eau froide de ceux-ci vers les tropiques. L'important de tout ceci est de comprendre qu'il y a une vraiment énorme surface de la Terre qui recueille une vraiment énorme quantité d'énergie solaire, et ceci même en ayant déduit la perte d'énergie due à l'extinction [atmosphérique]. Et nous pouvons aussi inférer que la seule vraie façon de modifier la quantité de chaleur dans l'océan est de modifier la quantité de lumière qui l'atteint. Ceci peut se produire seulement par un changement de brillance du Soleil lui-même, ou peut-être par une modification à très long terme de l'extinction atmosphérique, parce que l'albédo de l'eau de l'océan est peu susceptible de se modifier. Il n'y a pas de transfert net de chaleur de l'atmosphère à l'océan, étant donné qu'il la domine entièrement à la fois en terme de quantité d'énergie solaire qu'il absorbe à chaque instant en raison de son faible albédo, et de la capacité thermique beaucoup plus grande de l'eau par rapport à l'air. Le flux de chaleur est dominé par la perte de chaleur par évaporation de l'océan vers l'atmosphère de nuit comme de jour.

La même analyse peut être appliquée aux déserts et aux zones tropicales avec une bonne précision. Comme nous l'avons vu, avec un albédo de 30% et une extinction de 25%, il y a plus qu'assez d'énergie solaire incidente pour chauffer la surface à une température très élevée. La majorité de cette énergie est absorbée dans le chauffage de l'océan, mais sur les terres une grande part va dans la vapeur d'eau. Eau liquide et eau vapeur ont toutes deux des capacités thermiques très élevées, ce qui signifie qu'elles peuvent contenir beaucoup d'énergie sans s'échauffer beaucoup. Ou bien encore, que quand de l'eau liquide ou vapeur se sont réchauffées, elles conserveront cette énergie pendant longtemps avant que la chaleur n'en soit rayonnée au loin. Un très bon exemple de ceci est la comparaison des températures de nuit dans les déserts et les zones [inter] tropicales. Dans un désert, la quantité de vapeur d'eau atmosphérique est extrêmement faible ; dans une forêt pluviale [inter] tropicale, elle sera la plus élevée que l'on puisse trouver

naturellement sur Terre. C'est pour cette raison que la chute de température dans un désert équatorial [tropical] du maximum au minimum pourra atteindre 60°C entre le jour et la nuit, alors que dans la forêt tropicale [équatoriale] la température pourra ne baisser que de 5°C à 10°C. La forêt pluviale se refroidit beaucoup plus lentement que le désert parce qu'il y a beaucoup plus de vapeur d'eau dans l'air, ce qui est efficace pour conserver la chaleur. Pour être clair il est incorrect de dire que la vapeur d'eau « est la cause » du réchauffement de l'air dans la nuit intertropicale [= équatoriale] ; ce qui est correct du point de vue de la physique est de dire que la vapeur d'eau a un taux de refroidissement très faible, et donc garde la chaleur plus longtemps. Mais vous pouvez être assuré que, si le Soleil ne se levait plus, la forêt pluviale équatoriale comme le désert tropical se refroidiraient tous les deux jusqu'à seulement quelques degrés au dessus du zéro absolu.

Passons à une surface plus grande, l'hémisphère de la Terre qui est éclairé par le Soleil a un facteur de projection « $p=2$ » dans l'équation de Stefan-Boltzmann. Si vous appliquez un albédo moyen de 30% et que vous tenez compte de l'ensemble atmosphère+surface, et de plus, n'excluez pas le facteur d'extinction, alors la température d'équilibre radiatif calculée est d'environ 30°C. Donc l'hémisphère *entier* de la Terre, qui fait face au Soleil, peut s'échauffer à une température moyenne élevée ! Quand vous vous déplacez de l'équateur aux pôles nord et sud, l'angle que fait la lumière solaire avec le sol croît de plus en plus et ceci réduit l'énergie solaire par mètre carré, ou la densité de flux énergétique, qui réduit donc la température d'équilibre radiatif. Un modèle mathématique simple, cosinus dépendant, devrait prédire que la température aux pôles serait près du zéro absolu [$\sim -273^\circ\text{C}$], car à quatre-vingt dix degrés du zénith solaire le sol ne recevrait pas du tout d'énergie solaire. Bien entendu, les courants aériens et marins recueillent la chaleur incidente dans les régions chaudes et la transportent vers les pôles, ainsi leur température ne descend que vers -40°C à -50°C , au cours de leurs plus froides saisons hivernales.

Ce modèle mathématique simple, fondé uniquement sur l'équilibre énergétique radiatif prédirait en effet que la périphérie tout entière de l'hémisphère, la totalité de la frontière entre le jour et la nuit, devrait être près du zéro absolu. Et comme le côté obscur de la planète ne reçoit aucune radiation solaire, l'équation d'équilibre de Stefan-Boltzmann [avec l'irradiation solaire] ne peut pas même s'appliquer directement. Cependant, les régions équatoriales qui passent du jour à la nuit (ou de la nuit au jour) sont toujours plus chaudes que les régions polaires, la raison de cela est évidente : la rotation terrestre « projette » essentiellement la chaleur collectée par les océans et les terres du côté jour vers et au dessus du côté nuit. Et même dans un désert, où le refroidissement nocturne est le plus rapide en raison de l'absence de vapeur d'eau, la rotation de la Terre est assez rapide pour que, avant qu'il ne fasse trop froid, le Soleil se lève à nouveau et relance le processus de réchauffement quotidien. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet du chauffage hémisphérique dans notre analyse de la théorie de la serre, car c'est très important.

Revenons, pour finir à la Terre dans son ensemble plutôt que dans ses plus petites parties. Nous avons vu que, aux échelles de temps courtes, des zones localisées de la surface terrestre tendent vers l'équilibre thermique avec l'énergie solaire incidente et peuvent ainsi atteindre des températures très élevées. Il était très important de développer cette compréhension de la raison et de l'origine de la chaleur du jour localement, avant de terminer cette partie par une analyse thermodynamique complète de la moyenne globale de l'ensemble de la planète entière. Nous utiliserons un facteur de projection de ' $p=4$ ' dans l'équation d'équilibre radiatif de Stefan-Boltzmann de façon à calculer quelle devrait être la température moyenne d'équilibre radiatif de la Terre entière. Comme dans les exemples que nous venons de discuter, la température d'équilibre radiatif globale, calculée par l'équation de Stefan-Boltzmann est celle confirmée par l'observation : un spectre du corps noir à 255K ou -18°C . Maintenant, qu'arrive-t-il si nous tentons de calculer la température d'équilibre de la surface à long terme en enlevant les 25% d'énergie perdue par l'extinction atmosphérique ? Nous calculons alors une température de surface de l'ensemble de la Terre de -45°C . Ou, si vous appliquez les 25% de l'énergie solaire au chauffage direct de l'atmosphère par l'extinction, alors la température de l'air est seulement de -76°C . Ces températures ne sont pas ce qui est réellement mesuré pour les moyennes à long terme, et la raison en est très importante à comprendre : c'est seulement sur le long terme que vous pouvez avoir un calcul exact de la température pour le système Terre tout *entier*. Sur le court terme, vous pouvez distinguer les effets de l'extinction atmosphérique et très précisément déterminer les températures de la surface du sol à la verticale du Soleil. Mais à long terme, toute la chaleur se trouve répandue alentour autant qu'il est possible, et alors la possibilité de distinguer entre l'atmosphère et le sol disparaît. Sur le long terme, la thermodynamique ne se soucie pas de l'endroit où la chaleur s'étale. La surface de la Terre plus son atmosphère environnante constituent un système thermodynamique intégré et quand vous voulez considérer la température d'équilibre de l'ensemble à long terme, ce qui est ce que nous faisons quand nous enlevons seulement l'albédo, alors la température d'équilibre radiatif que nous calculons s'applique à l'ensemble de ce système intégré. Donc, quand nous parlons de la température d'équilibre de la Terre à long terme, nous ne nous référons pas seulement à la surface de la Terre, mais plutôt au système de la surface entière (incluant la mer) plus l'atmosphère. La moyenne thermodynamique calculée de -18°C ne s'applique qu'au système entier intégré à long terme, et ce système que nous observons quand nous confirmons la température d'équilibre par des mesures du spectre de la Terre à partir de l'espace.

A la lumière de ceci, il peut être compris que l'équation d'équilibre radiatif que nous avons utilisé ne nous dit rien par elle-même de l'endroit où nous devons nous rendre pour localiser réellement cette température d'équilibre. Tout ce que nous savons c'est que, quelque part dans le système intégré de la surface plus

l'atmosphère, la température d'équilibre s'établit toute seule dans quelque lieu moyen. Avec une meilleure compréhension des Lois de la Thermodynamique, cependant, nous pouvons vraiment avoir cette réponse. Mais d'abord, bien sûr, nous devons comprendre quelques concepts thermodynamiques.

Prenons un barreau solide d'or à une température stable de 255K ou -18°C . La distribution des atomes dans le barreau est homogène, ce qui signifie qu'ils sont répartis au hasard dans le barreau et que la densité est complètement homogène, partout dans le barreau. Quand nous disons que le barreau est à -18°C , cela signifie en terme de thermodynamique que c'est la température moyenne, ou la plus commune, des atomes dans le barreau. Si le barreau émettait des radiations thermiques comme un corps noir, alors le spectre de cette radiation aurait un pic maximum d'intensité correspondant à -18°C . Cependant, cela ne signifie pas que chaque atome dans le barreau vibre avec une énergie correspondant à -18°C ; c'est seulement le taux de vibrations moyen ou le plus commun. Ce qui se produit réellement c'est qu'il y a des atomes répartis au hasard qui vibrent plus vite et d'autres plus lentement. Ce qui correspond, pour ces atomes à des températures plus élevées et plus faibles, et qu'ils émettent respectivement des radiations thermiques plus hautes et plus basses. Maintenant, les atomes qui spontanément vibrent plus vite et plus lentement sont distribués dans l'espace, le temps et l'identité complètement au hasard et donc vous ne pourrez jamais distinguer les atomes qui vibrent plus vite et ceux qui le font plus lentement. Cela se produit seulement au hasard car dans un très grand nombre d'atomes vibrant tous à la fois, certains rebondiront plus vite et certains moins. Ce sont les atomes plus rapides et plus lents qui émettent la radiation thermique des fréquences plus élevées et plus courtes autour du pic de -18°C du spectre du corps noir. Même si vous pouviez faire en sorte que chacun des atomes d'un barreau d'or vibre exactement au même rythme que les autres et à la même température – ce qui mathématiquement serait appelé une « fonction de distribution delta » - en quelques millisecondes la distribution se reconstruirait de telle sorte que l'émission de radiations thermiques corresponde au spectre du corps noir.

Maintenant, voyons la distribution des molécules dans l'atmosphère. Elles ne sont pas distribuées au hasard, et en fait sont d'autant plus densément disposées qu'elles sont près de la surface. Évidemment nous avons à faire à la pression atmosphérique : au sommet de l'atmosphère il y a très peu de gaz et la pression est très basse ; à la base de l'atmosphère il y a beaucoup de gaz et la pression est très élevée. A la base de l'atmosphère, il y a la surface et c'est une solide frontière physique. Il est bien connu que plus vous vous élevez en altitude, plus il fait froid, et donc c'est à la base de l'atmosphère, à la frontière avec la surface qu'il fait le plus chaud. En raison du système thermodynamique, il y a certaines zones qui sont plus chaudes que la moyenne et d'autres qui sont plus froides, nous pouvons conclure que la température d'équilibre thermodynamique devrait se trouver quelque part entre la surface, qui est la plus chaude et plus haut dans l'atmosphère, où il fait le plus froid. La moyenne, et plus commune température de -18°C ne pourrait pas être près de la surface, ni non plus au sommet de l'atmosphère, elle ne peut être qu'entre les deux. Incidemment, si vous allez trop haut au dessus de la Terre, les lois usuelles thermodynamiques des gaz parfaits ne s'appliquent pas à cause des interactions avec le vent solaire et des effets d'ionisation qui y sont liés. La température dans ces régions peut atteindre des milliers de degrés. Cependant, comme il y a si peu de gaz dans la zone la plus élevée, la quantité de chaleur qu'elle contient est négligeable. Les vaisseaux spatiaux traversent ces régions continuellement sans aucun problème. La partie de l'atmosphère qui nous concerne, dans le système d'équilibre thermodynamique, est la plus basse appelée troposphère, et c'est celle où les lois habituelles de la thermodynamique continuent de s'appliquer. La troposphère contient environ 90% de la masse de l'atmosphère et à une altitude inférieure à environ 17km. Au dessus le gaz est si peu dense qu'il contient à peine un tout petit peu de chaleur.

Donc à l'inverse du barreau d'or, la compression gravitationnelle du gaz de l'atmosphère crée qualitativement une distribution des températures. Dans le barreau d'or nous ne pouvions pas identifier quand, où, ou lesquels des atomes seraient plus chauds ou plus froids que la moyenne de l'atmosphère. Dans l'atmosphère cependant, nous pouvons identifier où sont les plus chauds et les plus froids : les plus chauds sont à la base, les plus froids au sommet, en moyenne pondérée par le volume et la densité. La chose vraiment agréable avec la thermodynamique est que vous pouvez utiliser les équations les plus simples pour prédire l'état de systèmes complexes, comme nous l'avons vu pour la température d'équilibre thermodynamique du système surface + atmosphère terrestre. Le calcul correspond parfaitement à l'observation. Nous pouvons faire exactement la même chose pour la distribution des températures d'un gaz dans un champ gravitationnel.

Prenons une colonne verticale de gaz ou d'air dans l'atmosphère. En moyenne sur le long terme, cette colonne de gaz sera en équilibre thermique avec l'énergie solaire incidente, et contiendra donc une énergie totale finie et constante. Quand elle a atteint cet état, l'énergie interne de la colonne sera composée d'énergie thermique et d'énergie gravitationnelle potentielle. L'énergie thermique est l'énergie de la chaleur, l'énergie gravitationnelle potentielle est l'énergie due à la hauteur au dessus de la surface. Quand s'est établi un équilibre thermique stable, la distribution des températures n'est pas homogène, comme nous l'avons discuté. Bien qu'il y ait une distribution non uniforme des températures, la colonne de gaz est en équilibre thermique parce que la non uniformité provient simplement de la densité décroissante de l'atmosphère avec l'altitude. L'énergie interne d'une petite portion de l'air de la colonne peut s'exprimer par une somme des énergies thermique et potentielle. Nous pouvons alors écrire une équation qui décrit la situation thermodynamique ainsi :

$$U = C_p T + gh \quad \{12\}$$

Dans cette équation, « U » est l'énergie totale, « Cp » est la capacité thermique du gaz, « T » est la température de la portion d'air, « g » est la force de gravité à la surface de la Terre, et « h » est la hauteur de la portion au dessus de la surface. A l'équilibre, l'énergie totale « U » sera constante, et ainsi, si nous dérivons l'équation ci-dessus nous obtenons :

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{g}{C_p} \quad (K / km) \quad \{14\}$$

Nous pouvons facilement la ré-arranger pour avoir la distribution des températures avec la hauteur :

$$dU = 0 = C_p \cdot dT + g \cdot dh \quad \{13\}$$

Les valeurs de « g » et « Cp » sont positives, et donc l'équation {14} nous dit que la distribution de la température d'un gaz dans un champ gravitationnel, comme l'atmosphère autour de la Terre, a une pente négative. Ceci signifie que la température décroît quand la hauteur au dessus de la surface croît et ceci correspond exactement à ce que nous avons déjà prévu. Le rapport de « g » sur « Cp » est appelé généralement « gradient adiabatique » [lapse rate], et pour l'air sec aurait la valeur de 9,8K/km (Kelvin par kilomètre), mais pour l'air humide sa moyenne est 6,5K/km. Nous pouvons résoudre l'équation {14} sous la forme d'une simple équation linéaire, qui prend la solution ci-dessous :

$$T = \frac{-g}{C_p}(h - h_0) + T_0 \quad (K) \quad \{15\}$$

Cette équation est identique à la forme simple de « y = mx+b », qui, pour la plupart des gens devrait être familière. Les termes « h₀ » et « T₀ » (prononcés h-zéro et T-zéro) établissent le point zéro de l'équation pour l'altitude et la température ; essentiellement nous devons trouver les valeur pour « h₀ » et « T₀ » qui se correspondent, et ceci peut être fait par l'observation. Nous avons déjà établi un point zéro pour la température (T₀) quand nous avons calculé la température moyenne d'équilibre global du système surface + atmosphère, à -18°C. Nous devons donc simplement trouver l'altitude moyenne (h₀) correspondant à l'endroit où cette température est trouvée le plus souvent, ce qui est la surface moyenne d'équilibre thermique radiatif. Cette altitude est située à environ 5km au dessus de la surface par l'observation. Ainsi, l'équation {15} peut être écrite comme :

$$T = -6.5(h - 5) - 18 \quad (°C) \quad \{16\}$$

La température moyenne en degrés Celsius, à la base de l'atmosphère à la hauteur zéro (h = 0) au dessus de la surface, est alors calculée comme étant : **+14,5°C**. Cette température moyenne de l'air à la surface est aussi exactement ce qui est observé ! N'est-ce pas tout à fait étonnant ce qu'une compréhension et une application adéquates des Lois de la Thermodynamique peuvent faire pour décrire la réalité qui nous entoure ! Si le gradient d'air sec de 9,8K/km est utilisé dans l'équation, par exemple au-dessus d'un désert, alors il en résultera des températures plus élevées.

Le cas de Vénus

Il y a beaucoup de confusion dans la comparaison de la Terre et de Vénus, en ce qui concerne l'effet de serre. Plusieurs personnes se focaliseront sur la température élevée de la surface de Vénus qui serait une sorte de confirmation de l'idée de serre atmosphérique. Ceci est incorrect. En s'intéressant à la température de surface très élevée de Vénus, qui est 460°C, nous devons aussi prendre en considération trois faits très éclairants.

Premièrement, Vénus est plus proche du Soleil, ce qui veut dire qu'elle reçoit beaucoup plus de radiations solaires, et donc plus de chaleur. Cependant, Vénus a aussi une couche nuageuse d'acide sulfurique qui réfléchit une très grande quantité de radiation solaire incidente, de telle sorte qu'elle a en réalité une température d'équilibre radiatif plus faible que celle de la Terre. L'albédo de Vénus est égal à 0.67, et sa distance [au Soleil] vaut 72.3% de celle de la Terre et donc sa température d'équilibre radiatif est calculée vers -25°C, ce qui est juste un petit peu plus froid que celle de la Terre. Et aussi comme la Terre, Vénus a un chauffage maximum sous le Soleil au zénith d'environ 80°C, même avec son albédo élevé.

Deuxièmement, Vénus a un jour *extrêmement* long, Ce qui signifie qu'elle tourne sous le Soleil très, très lentement. Le jour de Vénus en fait dure deux cent quarante trois (243) jours de la Terre ! Avec une rotation aussi lente, il y a beaucoup de temps pour que l'hémisphère faisant face au Soleil collecte une grande quantité d'énergie qu'il distribue autour sous forme de chaleur avant qu'il ne quitte la vue du Soleil maintenant ainsi son atmosphère très épaisse. L'atmosphère épaisse fait circuler de manière très efficace la chaleur collectée du côté jour vers le côté nuit, ainsi l'hémisphère sombre de Vénus ne refroidit pas

réellement beaucoup par rapport à sa situation quand il est éclairé par le Soleil.

Troisièmement, et ceci est le point très important qui relie le tout ensemble, l'atmosphère de Vénus est quatre-vingt douze fois plus dense à sa surface si on la compare à la Terre ! Ce niveau de pression n'est trouvé qu'à environ 1 kilomètre de profondeur sous la surface de l'océan sur Terre, là où même les sous-marins nucléaires d'attaque modernes les plus sophistiqués seraient écrasés. En fait, des températures et des pressions semblables à celles de la Terre sont trouvées dans l'atmosphère de Vénus à une altitude d'environ 50 kilomètres ; et au dessous la température et la pression augmentent en raison de la compression et du réchauffement adiabatique. Et ceci sert de point zéro pour déterminer la température au sol de Vénus par la même équation adiabatique que nous avons utilisée pour la Terre. La composition atmosphérique de Vénus est très différente de celle de la Terre, mais son gradient adiabatique est cependant très semblable autour de 9K/km. Ainsi, la température atmosphérique vénusienne à 50km d'altitude est voisine de 15°C, donc à 50 km de profondeur à la surface du sol, l'équation adiabatique dérivée ci-dessus donnerait 465°C, ce qui est en réalité très près de ce qu'est en fait la température du sol de Vénus.

Nous pouvons maintenant comprendre ce qui est entendu par l'expression « emballement de l'effet de serre », quand elle est utilisée pour décrire la situation sur Vénus. Tout d'abord, la température sur la surface de Vénus est exactement ce qu'elle est supposée être : l'appeler effet d'« emballement » est un tour de passe-passe pour une chose qui n'est pas supposée être. Deuxièmement, la température sur Vénus est plus élevée que le maximum de chauffage possible en raison de la lumière reçue, alors que sur Terre, la température maximale mesurée au sol est beaucoup *moindre* que le maximum possible, étant donnée la densité d'énergie du flux de lumière solaire incident. Ainsi, sur Terre, nous voyons que l'atmosphère a un effet net de refroidissement, parce que la température moyenne du sol est moindre que la température maximum que le Soleil peut produire à son zénith. Mais sur Vénus, l'atmosphère rend la température moyenne de surface plus chaude qu'elle pourrait l'être du fait du chauffage solaire, non à cause d'un piégeage radiatif par l'atmosphère, mais simplement à cause de son pouvoir massif de chauffage adiabatique. L'atmosphère de faible densité de la Terre en fait se comporte à l'opposé de l'atmosphère de très haute densité de Vénus en terme de régulation de la température de surface de la planète. Et ainsi, l'aspect pseudo « emballement » de Vénus renvoie simplement à son atmosphère de densité très élevée et très profonde [épaisse], qui rend la surface plus chaude que ce qui est possible par la quantité de radiation solaire qu'elle absorbe, et ceci n'a absolument rien à faire avec le piégeage d'un radiation indisponible près de la surface. Ceci implique que la seule façon réelle d'accroître la température de surface de la Terre par un gaz à « effet de serre » est d'augmenter la densité de notre atmosphère. Cependant, nous serions confrontés avec le problème de trouver plus d'air pour réaliser cela ! Bien sûr, la quantité de variation du CO₂ dans l'atmosphère est négligeable en concentration, et son effet sur la pression atmosphérique est trop petit pour même être mesuré.

Théorie de l'Effet de Serre vs Effet Thermodynamique d'Atmosphère

Maintenant que nous avons développé une compréhension convenable de la façon dont l'atmosphère se comporte en relation avec les Lois de la Thermodynamique, nous pouvons comparer cette compréhension avec la Théorie de l'Effet de Serre.

La théorie de l'effet de serre dit que la raison pour laquelle le sol est plus chaud que -18°C est parce que l'atmosphère via les gaz à effet de serre comme le CO₂, ré-émettent de la radiation vers le sol et donc augmentent la chaleur du sol de -18°C à $+15^{\circ}\text{C}$.

La thermodynamique dit qu'aucun objet dans l'univers ne peut se réchauffer lui-même par sa propre radiation, ni ne peut établir un flux de chaleur du froid vers le chaud. La thermodynamique explique la température au sol, en moyenne, comme le résultat de la distribution adiabatique de la température d'un gaz dans un champ gravitationnel, étant donné qu'un équilibre thermique radiatif s'établit nécessairement dans l'atmosphère en altitude. Ceci correspond à ce que nous comprenons des moyennes thermodynamiques de températures : il doit y avoir certaines parties d'un système complexe intégré qui sont plus chaudes et certaines qui sont plus froides, mais la plupart seront à la moyenne. Les plus chaudes seront au sol, les plus froides seront trouvées en hauteur dans l'atmosphère. Cela n'a pas d'importance que de l'énergie soit ré-émise vers le bas jusqu'au sol, car il n'en aura jamais assez pour se chauffer lui-même.

La théorie de l'effet de serre dit que c'est la température de surface de la Terre qui devrait être en équilibre avec l'énergie venant du Soleil à -18°C , mais que les gaz à effet de serre élèvent cette température au-dessus de la température d'équilibre.

La thermodynamique dit que c'est seulement la moyenne de l'ensemble du système surface du sol + atmosphère qui devrait être en équilibre avec le Soleil, à une température moyenne de -18°C , et que cette température *ne* serait justement *pas* observée au sol, mais bien au-dessus, dans l'atmosphère. La température moyenne au sol serait plus élevée que la température moyenne d'équilibre, avec ou sans gaz à effet de serre. Il est fondamentalement incorrect de comparer la température d'équilibre radiatif de -18°C à la température du sol, parce que ce ne sont pas les mêmes concepts de physique. La température au sol est a priori une métrique différente de la température d'équilibre radiatif, et les comparer est incorrect du point de vue de la physique.

La théorie de la serre ne peut expliquer une journée ensoleillée à la plage

La thermodynamique explique aisément une journée ensoleillée à la plage via l'échauffement venant du soleil à travers l'extinction atmosphérique et l'albédo au sol.

Les théoriciens de la serre traitent la Terre entière dans leurs modèles comme un disque pleinement illuminé (sans nuit) avec au mieux -18°C de chauffage solaire. Ceci requiert un quart de flux solaire incident pour s'ajuster au facteur de correction pour le passage de la surface sphérique ($p=4$) à la surface d'un disque ($p=1$)

La thermodynamique dit que ceci est un modèle physiquement incorrect, même comme une approximation. Il peut sembler mathématiquement équivalent de réduire le flux solaire par un facteur de 4, mais ce n'est pas physiquement équivalent car la Terre réelle, qui est une sphère, n'atteindrait qu'en moyenne -59°C avec le quart de l'énergie solaire. Ce n'est évidemment pas ce qui est observé !

Non seulement ce modèle est physiquement incorrect, même comme approximation, mais il requiert de toutes les températures au sol supérieures à -18°C (ou est-ce -59°C , ... ils ne spécifient pas) de provenir d'une auto-amplification radiative. Il ne décrit pas, par exemple, la surface de Terre plus grande que l'Amérique du nord continuellement chauffée par le Soleil chaque seconde de chaque jour [qui] serait potentiellement quelque part entre 40°C et 80°C , ou bien l'hémisphère entier de la Terre exposé au soleil qui a une température d'équilibre de 30°C . Clairement, la source réelle de chauffage est déjà expliquée comme venant du Soleil et de la distribution atmosphérique de la température adiabatique moyenne.

Les théoriciens de la serre moyennent l'énergie solaire incidente sur la surface entière de la Terre.

* C'est le même point que celui discuté juste ci-dessus, en utilisant un facteur de projection de $p=4$. Mais plus clairement : la surface totale de la Terre n'est pas illuminée simultanément par l'énergie solaire incidente, mais seulement une moitié de la Terre est vraiment illuminée. Quand le chauffage solaire incident est incorrectement moyenné sur la Terre tout *entière*, il n'y a pas assez de densité de flux d'énergie radiative pour expliquer pourquoi la température s'élève au dessus de -18°C . Donc, une théorie de la serre doit être proposée pour expliquer pourquoi la température au sol est $+15^{\circ}\text{C}$.

Cependant, si l'énergie solaire est correctement moyennée sur un seul hémisphère qui en fait reçoit physiquement la lumière, la température s'élève à $+30^{\circ}\text{C}$ pour cet hémisphère (et beaucoup plus immédiatement en dessous du soleil à son zénith, comme nous l'avons vu). La moyenne de $+15^{\circ}\text{C}$ sur l'ensemble jour et nuit est beaucoup plus faible que $+30^{\circ}\text{C}$ et est alors facilement comprise comme simplement due au fait que le côté nuit est plus froid. Bien sûr, le côté nuit doit être plus froid puisqu'il ne reçoit pas d'énergie solaire, mais il ne refroidit pas très rapidement en raison de la capacité thermique des océans, du sol et de l'atmosphère [+inertie thermique ?]. La température moyenne de l'ensemble jour nuit des deux hémisphères s'établit alors à $+15^{\circ}\text{C}$, qui est *moins* que le chauffage solaire incident, pas plus.

Il n'est donc pas surprenant que dans le premier cas, nous ayons besoin de théoriser l'effet de serre qui se termine en violant les lois de la physique, parce que, tout d'abord, la température incorrectement calculée n'est pas basée sur une moyenne vraiment physique. Il est simplement faux de dire que l'énergie se disperse instantanément sur la surface entière à la fois et réduit l'intensité du chauffage par un facteur 4. Ce n'est pas la situation physique.

D'autre part, dans le deuxième cas, la thermodynamique standard, l'influx chauffant solaire, la capacité thermique et la compression adiabatique, expliquent complètement la température et il n'y a pas besoin d'inventer une nouvelle théorie radiative auto amplificatrice qui viole la thermodynamique. Une approximation non physique conduit à la violation des lois de la thermodynamique, alors qu'une approximation physique explique complètement la température sur la Terre. Seulement un hémisphère de la Terre est chauffé à la fois par le Soleil, tandis que l'autre côté se refroidit toujours.

La théorie de l'effet de serre dit que si les gaz à effet de serre augmentent, la Terre va devenir plus chaude.

*La thermodynamique dit que la seule source de réchauffement est le Soleil, avec les lois de la thermodynamique disposant une distribution de la température allant du chaud au froid au-dessus du sol, et une température moyenne évidemment trouvée quelque part entre le sol et l'espace extérieur. La Terre ne peut pas être à long terme en dehors d'un équilibre avec le Soleil car le Soleil est la seule source de chaleur pour l'ensemble sol + atmosphère (en assumant des effets géothermiques négligeables). La Terre ne peut pas émettre plus d'énergie, ni moins, qu'elle n'en absorbe sur le long terme. Le seul moyen pour chauffer ou refroidir la Terre sur le long terme est de changer la quantité d'énergie solaire qui est absorbée. Ceci ne peut être obtenu que par un changement de la brillance du Soleil, un changement de l'albédo de la Terre ou du coefficient d'extinction de l'atmosphère, un changement des paramètres orbitaux de la Terre, etc. La thermodynamique ne dit pas que cela puisse être fait par les gaz à effet de serre, parce que ces gaz ne changent pas l'énergie incidente. Si vous ne changez pas l'influx énergétique absorbé, vous *ne pouvez pas* changer l'énergie émise, et les augmentations de « gaz à effet de serre » ne changent pas la quantité d'énergie incidente absorbée.

La théorie de la serre dit que les gaz à effet de serre agissent comme une serre autour de la Terre.

* Une serre réelle devient chaude parce que les parois de verre empêchent la convection atmosphérique. Comme le sable sur la plage, les surfaces intérieures de la serre s'échauffent à partir de l'énergie solaire. L'air qui est en contact avec les surfaces internes s'échauffe aussi par conduction, et essaie de s'élever et de se dilater et refroidir. Les parois de verre l'empêchent cependant et donc l'air reste dans la serre. La serre s'échauffera donc jusqu'à la température correspondant à la quantité d'énergie solaire absorbée par les surfaces intérieures. Et ainsi, en fait, une vraie serre prévient en réalité ce que l'atmosphère veut

naturellement faire, qui est se refroidir. Nous construisons des serres parce qu'elles réalisent le *contraire* de ce que fait l'atmosphère.

Donc, appeler l'amplification radiative rétroactive un « effet de serre » n'est d'abord pas et en aucune façon, un nom correct de cette théorie. Les prétendus gaz à effet de serre dans l'atmosphère extérieure ne reproduisent pas le comportement des parois de verre d'une serre, ni ne causent de réchauffement par piégeage radiatif. L'effet de serre atmosphérique est donc basé sur une théorie que les vraies serres ne suivent pas ! Les abus logiques de cette théorie offensent la raison. Si les parois de verre complètement opaques aux infrarouges d'une serre réelle ne produisent pas le réchauffement à l'intérieur en réfléchissant une radiation infrarouge piégée, alors pourquoi une absorption infrarouge simplement partielle, par un gaz sous forme de traces (le CO₂ correspond à seulement 0.04% de l'atmosphère) dans une atmosphère turbulente et libre, serait-elle capable de faire ce qu'une vraie serre ne peut réaliser ?

La théorie de la serre dit que les gaz à effet de serre piègent la radiation infrarouge, et que celle-ci chauffe alors la surface.

* La thermodynamique dit que l'atmosphère est chauffée principalement par conduction et convection, et que la radiation infrarouge émise du sol ne pourrait chauffer qu'une petite fraction des gaz radiativement actifs de l'atmosphère, et que plus de flux de chaleur ne peut être produit ou renvoyé au sol pour ensuite le réchauffer par cette radiation. En outre, la direction du flux de chaleur est toujours du chaud (le sol), vers le froid (l'atmosphère supérieure), et ensuite par radiation dans l'espace extérieur. L'énergie infrarouge quitte l'atmosphère en quelques millisecondes, même si elle se trouve dispersée quelque temps par les gaz, mais cette radiation infrarouge est le résultat de la température existant plus bas, non la cause de cette température, et donc ne peut produire de chauffage supplémentaire de sa propre source. Il est instructif de comparer une bouteille thermos scellée sous vide et une autre scellée avec du CO₂ : cette dernière se refroidira *beaucoup* plus vite que celle scellée sous vide – le CO₂ ne « piège » pas de chaleur radiée.

La théorie de la serre dit que la surface de la Terre chauffe l'atmosphère par transfert radiatif.

* La thermodynamique dit que l'atmosphère est partiellement chauffée par le Soleil via l'extinction, mais qu'elle est principalement chauffée par conduction et convection à partir du sol plus chaud. La radiation issue du sol peut contribuer à quelque chaleur dans l'atmosphère, mais ceci ne peut constituer qu'une très petite quantité comparée à celle de la conduction et convection puisque la distribution adiabatique de la température décrit déjà la température atmosphérique, sans qu'il soit besoin d'un forçage radiatif. Ceci simplement parce que la radiation émise dans l'atmosphère est le *résultat* de sa température, *non la cause*. De plus, le CO₂ n'absorbe qu'une faible partie de l'énergie infrarouge venant du sol, et une telle absorption partielle de radiations près du sol ne peut simplement pas produire la même quantité (et encore moins une plus grande !) de chaleur que la conduction par contact avec le sol et la convection n'en produisent déjà. La température près de la surface du sol est déterminée par l'énergie solaire incidente au sol, et ensuite par la conduction et convection de l'air au-dessus du sol. La radiation infrarouge ambiante et toute dispersion radiative postérieure est un résultat simple de la température du sol et de l'air produit par le chauffage solaire, et toute argumentation contraire viole la causalité et la thermodynamique. C'est seulement en haute altitude, là où la température cinétique serait en fait très froide, qu'une absorption radiative très partielle du CO₂ pourrait réellement avoir un effet de réchauffement de la molécule, plus grand que celui qu'elle aurait déjà acquis par collisions. Mais ceci ne se produirait nécessairement qu'à des températures basses et à haute altitude, et ne pourrait avoir aucun effet de rétroaction sur le sol très loin au-dessous, qui est déjà beaucoup plus chaud, et la source originelle de cette radiation. Près du sol, où le transfert de chaleur est dominé par la conduction et la convection, l'harmonique oscillatoire de vibration de la molécule de CO₂ aurait été déjà excitée par les collisions physiques, et ainsi la résonance entre cette oscillation et le champ électro-magnétique infrarouge ambiant constitue bien un effet de dispersion, qui n'est pas un effet de chauffage. En fait, il est vraisemblable que les molécules de CO₂ de haute altitude oscillent déjà en mode vibratoire de toute façon, et ainsi même la résonance en haute altitude entre le CO₂ et l'énergie infrarouge serait encore déjà un effet de dispersion. Si la concentration en CO₂ augmentait, le résultat serait bien une élévation de la hauteur de sa distribution de concentration, avec une augmentation de l'altitude de dispersion par le CO₂ de la longueur d'onde correspondante ; mais ceci n'aurait aucun effet sur la température à cet endroit, ni beaucoup plus bas.

La théorie de la serre dit que la radiation thermique de l'atmosphère est la *cause* de la température de l'atmosphère

* Les lois de la thermodynamique disent que la radiation thermique de l'atmosphère est le *résultat* de la température de l'atmosphère. La radiation peut seulement causer du chauffage la première fois qu'elle est absorbée à partir du Soleil, et ensuite, aucun chauffage n'est possible à partir d'aucune ré-émission ou ré-échange de cette énergie, en accord avec les lois de la thermodynamique. Et ainsi, la radiation infrarouge étant émise et transférée à l'intérieur de l'atmosphère est simplement le résultat de la température, non la cause de la température, et tout argument contraire viole la causalité.

La théorie de la serre dit que toute radiation additionnelle à la radiation initiale absorbée du Soleil peut causer ensuite du réchauffement, même s'il s'agit bien d'énergie radiative réfléchie émise par la surface ayant été chauffée par le Soleil en premier lieu.

* La thermodynamique dit que seule une énergie avec une plus grande densité de flux peut produire un réchauffement. Elle dit aussi que les lois de transfert de la chaleur s'appliquent à la radiation autant qu'à la conduction et la diffusion. La proposition de la théorie de la serre du transfert de chaleur suppose que toute addition d'énergie à un système le conduira à s'échauffer. Cependant, ceci est immédiatement compris comme une violation des lois de la thermodynamique, parce que bien qu'un seau plein d'eau à 5°C contienne beaucoup d'énergie, cette énergie ne s'additionnera pas à la chaleur d'une baignoire à 40°C. Seul un seau d'eau à plus de 40°C pourrait ajouter de la chaleur à la baignoire. Même si c'était un très petit seau avec très peu d'énergie totale comparée à celle de la baignoire, la petite quantité d'eau dans le seau serait toujours capable de chauffer la baignoire, un petit peu. C'est parce que l'eau dans le seau a une densité de flux d'énergie plus élevée, même s'il pouvait avoir une énergie totale plus faible. De la même façon, la radiation thermique émise par un cube de glace ne réchauffera pas un objet qui a déjà été chauffé par le Soleil. Même toute la radiation émise par le sol, rétro-réfléchi, ne pourrait pas chauffer plus le sol que le Soleil (la source de la chaleur) l'a déjà fait. Nous savons pourquoi les serres se réchauffent, et que cela n'a rien à voir avec les parois de la serre réfléchissant ou piégeant la radiation infrarouge (même totalement !), et donc, par extension, nous savons que l'atmosphère ne pourrait le faire non plus. Et nous savons aussi que la simple proposition d'un tel schéma viole les Lois de la Thermodynamique.

La théorie de la serre dit que la température de la surface de Vénus est due à un emballement de l'effet de serre venant du piégeage de la radiation.

* La thermodynamique dit qu'à cause du très fort albédo de Vénus, il n'y a simplement pas assez de radiation absorbée au départ qui pourrait peut-être expliquer la température très élevée de sa surface. Quelle pourrait être la source chauffante radiative à la surface de Vénus si la radiation initiale est insuffisante en premier lieu ? Bien entendu, tout comme sur la Terre, les Lois de la Thermodynamique requièrent que la radiation de surface de Vénus soit le *résultat* de la température trouvée, non la cause. La *cause* de la température trouvée à la surface de Vénus est la même que sur celle de la Terre : compression adiabatique et chauffage, après qu'un équilibre radiatif se soit établi avec le Soleil, dans l'atmosphère, quelque part en altitude. Mais avec une atmosphère quatre-vingt dix fois plus dense que celle de la Terre, Vénus a une profondeur atmosphérique beaucoup plus épaisse et donc un réchauffement de compression adiabatique *beaucoup* plus fort. En fait, le cas de Vénus est la preuve la plus forte que l'on peut présenter en *réfutation* de la théorie de la serre, plutôt qu'un support pour elle. Si Vénus réfléchit autant de radiation solaire incidente en raison de son albédo, il n'est simplement pas possible pour la petite quantité de radiation réellement absorbée de produire la température, et la quantité de radiation thermique qui en résulte à la surface de Vénus. Ce serait une violation évidente de la loi de conservation de l'énergie de la thermodynamique, et même un cours introductif de physique du lycée montrerait que c'est impossible. Aussi, encore une fois nous voyons que la théorie de l'effet de serre est basée sur une idée à laquelle les autres atmosphères planétaires, en fait, n'obéissent pas.

Conclusion

Nous voyons que, dans chaque comparaison, la Théorie de l'Effet de Serre paraît contredire ce que les Lois de la Thermodynamique doivent dire dans exactement la même situation. C'est très curieux parce que, comme théorie scientifique, elle devrait être en accord avec les lois préétablies de la physique. Il se pourrait que la Théorie de la Serre soit correcte, mais, cela requerrait que les Lois de la Thermodynamique ne soient pas correctes. Cependant, si la science ne comprend pas les Lois de la Thermodynamique, alors c'est une pure coïncidence que les ingénieurs aient créés de telles choses que des réfrigérateurs, des engins à combustion interne, des centrales atomiques, des panneaux solaires, et des machines à vapeur, pour ne donner que quelques exemples. Ceci ne paraît pas vraisemblable. Cela ne serait pas non plus nécessaire quand on voit que ce sont exactement les mêmes lois de la physique qui ont permis la création de ces exemples de/par notre technologie moderne, qui peuvent déjà facilement expliquer nos observations de la température du sol et de l'atmosphère. Nous devons donc conclure, qu'il n'existe pas une chose telle qu'un effet de serre radiatif atmosphérique, et que la théorie qui le décrit est une théorie défailante. Ce que nous avons c'est une Théorie de l'Effet Thermodynamique d'Atmosphère, et c'est ce nom ou quelque chose qui y ressemble qui devrait être utilisé pour décrire les températures observées sur Terre et dans l'atmosphère à partir de maintenant.

La conclusion de cet article est très simple : il n'existe pas une notion telle qu'une théorie radiative de l'Effet de Serre, pas dans les vraies serres, et certainement pas dans aucune atmosphère planétaire connue de l'homme. Le vrai rôle de l'atmosphère, sur Terre, est qu'elle refroidit le sol et ne le réchauffe pas. Donc, il n'existe pas de choses telles que le Réchauffement Global Anthropique ou le changement climatique induit par le CO₂ anthropique, parce que cette supposition est basée sur la fausse Théorie de l'Effet de Serre. Toute dépense monétaire ou débat politique sur ce sujet peut donc s'arrêter. Maintenant. Ou, il ne doivent subsister que s'ils ont pour objectif d'éradiquer la fausse science.

Je voudrais remercier l'organisation de scientifiques connue comme les « slayers » [tueurs] pour leur support, leur perspicacité et, ce qui est plus important, leur inspiration. Votre travail et vos règles intellectuelles sont les représentations les plus élevées et les plus proches des idéaux de notre philosophie naturelle, qui s'est étendue sur les milliers d'années de notre développement humain. Un remerciement spécial à Hans Schreuder, pour ses corrections au manuscrit, pour son support moral et pour son amitié. *Ad veritas, ad victorium.* J.E.P.