

Climatiser la Terre

par Alain Bonnier, Ph.D. (physique)
Octobre 2007



1. La physique du réchauffement climatique

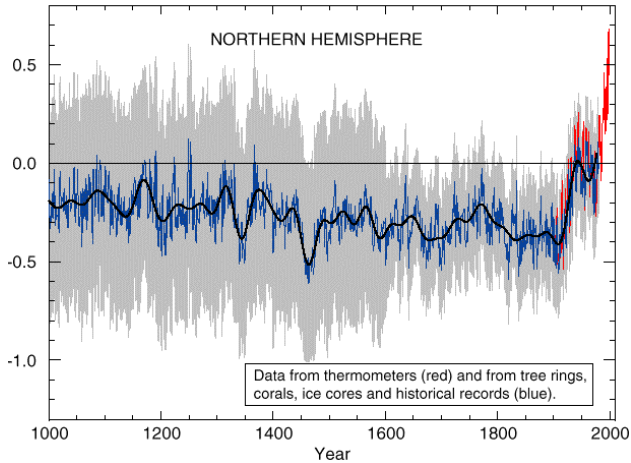
Lors de la présente causerie, nous allons tenter de mieux comprendre la physique du « réchauffement climatique ». Notre but ici n'est pas d'en rajouter par rapport au discours médiatique dominant qui verse souvent dans le catastrophisme concernant les conséquences de ce réchauffement ou dans l'évangélisme sur les actions à poser pour « sauver la planète ». La situation est grave. Mais restons calmes et lucides. C'est la meilleure façon de nous en sortir.

Nous vérifierons dans un premier temps si le climat se réchauffe vraiment. En comprenant la physique du phénomène, nous serons plus en mesure d'évaluer l'efficacité des solutions qui sont proposées, de reconnaître celles qui sont illusoire de celles qui sont réalistes.

À la fin, nous réfléchirons sur certaines pistes de recherche qui permettraient de véritablement « climatiser la Terre ».

2. Le climat se réchauffe-t-il vraiment ?

Jusqu'à la fin des années '90, on pouvait en douter tant les variations de températures observées se situaient à l'intérieur des marges d'erreur comme l'indique le graphique ci-bas donnant les différences de températures probables (en °C) durant le dernier millénaire dans l'hémisphère Nord par rapport à la température moyenne en 1975 qui était de 14°C environ ⁽¹⁾.



Sur ce graphique, on peut voir en rouge les valeurs mesurées avec des thermomètres et celles, en bleu, déduites d'analyses de cernes d'arbres, de coraux, de carottes de glace et d'archives diverses. La courbe noire représente la valeur moyenne la plus probable. La zone grise donne la plage des températures "possibles" (ou encore la marge d'erreur).

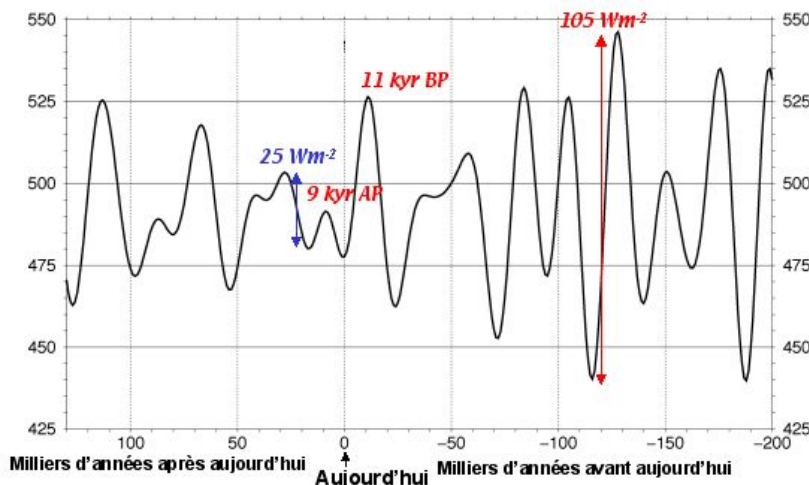
Ce graphique illustre deux faits importants :

- 1) L'augmentation récente est déjà nettement marquée par rapport à une tendance générale qui était stable, voire en très léger refroidissement.
- 2) Toutefois l'amplitude de ce réchauffement est du même ordre que l'incertitude liée aux méthodes d'estimation pour les années anciennes. Ce qui fait dire à certains que l'on ne peut pas encore éliminer complètement la possibilité que ce soit une variabilité "normale".

3. Le réchauffement climatique observé est-il « normal » ?

La température atmosphérique est déterminée essentiellement par trois facteurs :

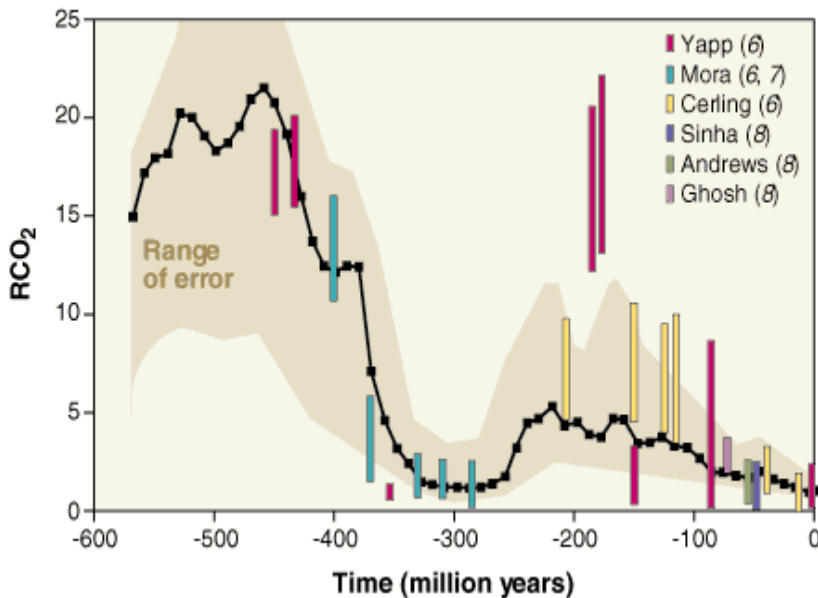
- a) Le flux d'énergie lumineuse venant du Soleil.
- b) L'albédo de la Terre (i.e. la fraction de lumière reçue par la Terre et qui est réfléchi ou diffusée la dans l'espace).
- c) L'effet de serre produit par certains gaz dans la haute atmosphère.



Or ces trois facteurs ont varié continuellement durant les 4,6 milliards d'années d'existence de la Terre. Le graphique ci-contre ⁽²⁾ donne la variation du flux moyen d'énergie solaire reçue sur la Terre au milieu du mois de juin, à la latitude 65° Nord, depuis 200 000 ans ainsi que les projections pour les 100 000 prochaines années. (Sur ce graphique, on remonte dans le temps en allant vers la droite.) Actuellement cette valeur est d'environ 480 watts/m² alors qu'il y a 11 000 ans, elle était

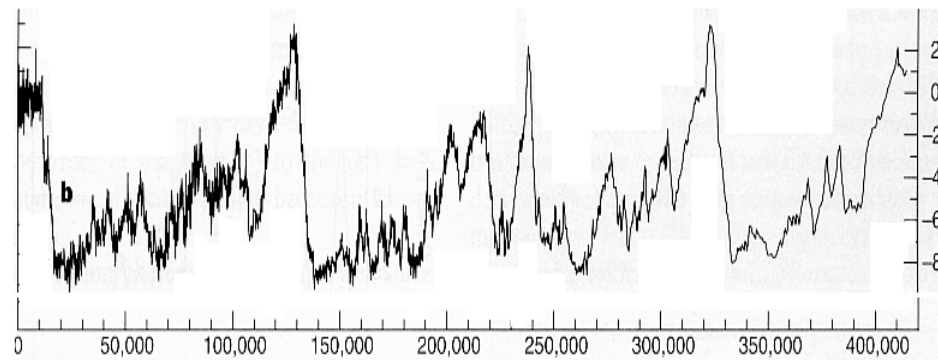
de 530. On voit qu'avant -100 000 ans, l'amplitude d'oscillation de ce flux lumineux était beaucoup plus forte qu'aujourd'hui à cause de deux effets astronomiques : (a) l'excentricité de l'orbite terrestre autour du soleil était plus forte et (b) l'effet dû à la précession de l'axe de rotation de la Terre était plus important qu'aujourd'hui. Ce flux oscille fortement avec une période d'un peu plus de 10 000 ans.

De même pour les gaz à effet de serre (GES) dont le principal est le CO₂, on peut voir au graphique ⁽³⁾ ci-contre la variation de sa concentration dans l'atmosphère depuis 600 millions d'années. Le



« RCO₂ » est le rapport entre la concentration préindustrielle en CO₂ (qui faisait un peu moins de 300 parties par million, soit 0,03% de l'atmosphère en volume) et celle existant dans le passé. Par exemple RCO₂ = 5 signifie que la concentration est alors de 5*300 = 1500 ppm ou encore que le CO₂ occupe alors 0,15% de l'atmosphère. À l'époque des dinosaures (-230 millions d'années à - 65 millions d'années) l'atmosphère avait de 2 à 5 fois plus de CO₂ qu'à l'époque préindustrielle, et donc l'effet de serre était plus important (mais l'activité solaire était plus faible, de telle sorte que la température moyenne de la planète n'était pas considérablement au-dessus de

l'actuelle). Mais cette courbe ne dit pas ce qui se passe quand le CO₂ est multiplié par 2 à 4 en un siècle, ce qui n'est peut-être jamais arrivé naturellement.



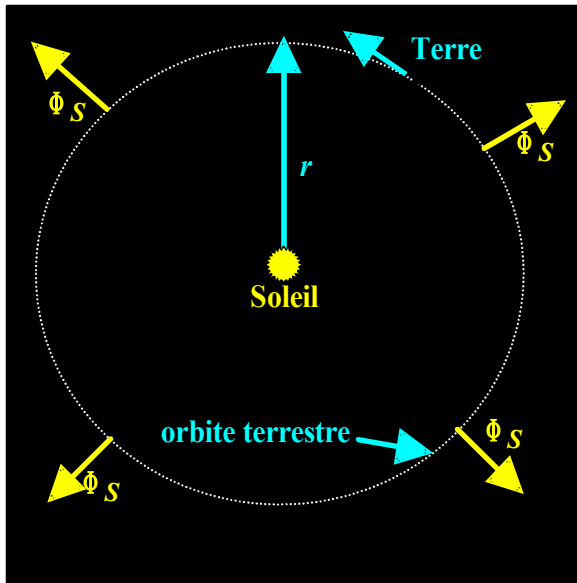
Ces variations de flux solaire et de concentration de GES ont donc entraîné les variations de température telles qu'illustrées dans la figure ci-contre ⁽⁴⁾ donnant l'évolution durant les 400 000 dernières années, de la température moyenne (en °C) de l'Antarctique. Le 0 de l'axe vertical de droite correspond à la valeur actuelle (cette courbe montre donc les écarts à la valeur actuelle). Cette variation de température est légèrement plus élevée que celle de la planète dans son ensemble. (Cette courbe se lit aussi à l'envers : plus on va vers la droite, plus on remonte dans le temps.) Le fait que les oscillations soient plus importantes à gauche (donc récemment) tient à la meilleure précision des mesures quand on se rapproche de l'époque contemporaine.

4. Le flux d'énergie venant du Soleil

La principale source d'énergie de la Terre provient de la lumière solaire. Les autres sources d'énergie :

- l'énergie lumineuse venant des autres étoiles,
- l'énergie cinétique des rayons cosmiques ou du vent solaire,
- l'énergie solaire réfléchi vers la Terre par la Lune ou les planètes
- l'énergie provenant du refroidissement du noyau de la Terre et de la radioactivité,
- l'énergie gravitationnelle de la Lune et du Soleil dissipée en chaleur par les marées,
- l'énergie libérée par les combustibles, etc.

représentent au total moins d'un millièrme de l'énergie lumineuse venant du Soleil.



Le Soleil est un immense réacteur thermonucléaire dégageant en lumière une puissance $P = 3,84 \times 10^{26}$ watts. Cette lumière s'étale dans tout le spectre des ondes électromagnétiques avec un pic d'intensité dans le jaune. Cette puissance P du Soleil est irradiée sphériquement dans l'espace. À une distance r correspondant à la distance Terre-Soleil, cette puissance P est alors répartie uniformément sur une surface sphérique $S = 4\pi r^2$. Le flux solaire Φ_S à cette distance r est alors égal à P/S . Avec $P = 3,84 \times 10^{26}$ W, $r = 1,496 \times 10^{11}$ m, on obtient $S = 2,81 \times 10^{23}$ m² et

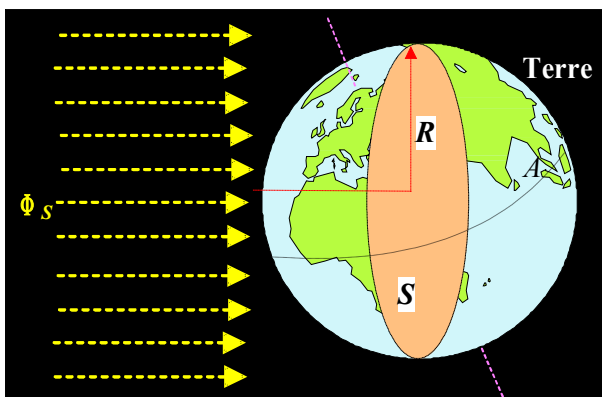
$$\Phi_S = 1368 \text{ W/m}^2.$$

Le symbole « Φ » s'appelle « phi ». C'est un « F » grec qu'on emploie en physique pour symboliser un Flux d'énergie et qui s'exprime en W/m². On appelle parfois cette grandeur Φ_S : « constante solaire ». Mais le nom est mal choisi puisque cette grandeur est loin d'être constante.

Le Soleil n'émet pas d'une façon constante (sa puissance a augmenté légèrement au cours du XX^e siècle) et de plus cette « constante » dépend de la distance par rapport au Soleil (sur Mars, par exemple, la « constante solaire » ne vaut plus que 622 W/m²). Pour ces raisons, je préfère plutôt l'expression « flux d'énergie solaire incident sur Terre » ou tout simplement « flux solaire » quand il est clair que l'on parle de la Terre.

En décrivant une orbite elliptique autour du Soleil, la distance Terre-Soleil varie quelque peu durant l'année : elle est de $147,1 \times 10^9$ m à son périhélie (vers la fin décembre) et monte à $152,1 \times 10^9$ m à son aphélie (qui arrive vers la fin juin). Comme le flux lumineux varie à l'inverse du carré de la distance, le flux solaire incident oscille durant l'année entre 1323 (en juin) et 1414 W/m² (en décembre). Le Soleil nous paraît ainsi 7% plus brillant en hiver (dans l'hémisphère Nord) qu'en été.

5. Répartition du flux solaire sur la surface de la Terre



Φ_S : flux d'énergie lumineuse venant du Soleil
 R : rayon de la Terre
 $S = \pi R^2$: aire de la section terrestre
perpendiculaire aux rayons solaires
 $A = 4\pi R^2$: aire de la sphère terrestre

La Terre dont le rayon moyen R est de $6,367 \times 10^6$ m, présente une section S perpendiculaire aux rayons solaires égale à πR^2 . La puissance P_T interceptée par la Terre est donc égale à $S \times \Phi_S$ soit

$$P_T = 1,27 \times 10^{14} \text{ W.}$$

Pour se faire une idée de cette puissance, on peut traduire en dollars l'énergie reçue du Soleil. Au coût de 10¢ par kW-h, cela représente 3,5 millions \$ par seconde ou 304 milliards \$ par jour.

Comme la Terre tourne sur elle-même, cette puissance P_T se répartit sur toute sa surface $A = 4\pi R^2$. Ce qui donne pour l'ensemble de la Terre un flux moyen reçu

$$\Phi_M = 342 \text{ W/m}^2.$$

Mais ce flux d'énergie Φ_M ne sert pas entièrement à chauffer la Terre. Une partie retourne dans l'espace, réfléchi ou diffusé par les nuages, les océans et le sol. C'est l'albédo de la Terre.

6. L'albédo de la Terre



L'albédo de la Terre est de 31,3%. Ce qui signifie que 31,3% du flux solaire incident à la Terre est directement réfléchi ou rediffusé vers l'espace : 20 à 21 % le sont par les nuages et les aérosols, 6% par les diverses couches de l'atmosphère et 4 à 5% par la surface de la terre (qui inclut notamment les calottes glaciaires particulièrement réfléchissantes). Quand ces calottes rétrécissent comme on l'a observé récemment, l'albédo de la Terre diminue et celle-ci renvoie moins d'énergie dans l'espace. Ce phénomène peut produire un emballement du réchauffement climatique -- une sorte d'effet Hygrade -- puisque plus les calottes glaciaires rétrécissent, plus l'atmosphère et l'eau se réchauffent et plus ils se réchauffent, plus les calottes glaciaires rétrécissent.

Le reste du flux d'énergie reçu (soit 68,7%) est absorbé par les divers composants de notre planète (sol, océans, atmosphère), puis est finalement réémis vers l'espace sous forme de rayonnement thermique infrarouge. C'est ce flux

$$\Phi_A = 235 \text{ W/m}^2$$

absorbé en moyenne par l'atmosphère et l'ensemble de la surface terrestre qui détermine sa température.

7. La température de la Terre sans l'effet de serre

Quand un corps a une température constante, on dit qu'il est en équilibre thermique. Il émet alors autant d'énergie qu'il en absorbe. Ce n'est pas tout à fait le cas de la Terre qui est plutôt en léger déséquilibre thermique présentement. Le flux absorbé Φ_A est de 235 W/m² alors que celui émis Φ_E est d'environ 234 W/m². La différence entre Φ_A et Φ_E est plus précisément de 0,85 W/m² selon les plus récentes mesures de la NASA faites en 2005. C'est ce qui explique que la Terre se réchauffe depuis quelque temps.

Si la Terre émet un flux d'énergie thermique Φ_E de 234 W/m², quelle doit être sa température à la surface ?

Il y a une règle d'or en thermodynamique, découverte à la fin du XIX^e siècle : Un corps dont la surface est à la température T doit rayonner dans l'espace un flux d'énergie Φ_E tel que

$$\Phi_E = \sigma T^4.$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann (du nom des deux physiciens qui ont découvert la loi) :

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}.$$

À partir de cette loi, on peut en déduire que la température T de Terre devrait être

$$T = \left[\frac{\Phi_E}{\sigma} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

Avec $\Phi_E = 234 \text{ W/m}^2$, on trouve $T = 253 \text{ °K}$ ou -20 °C . (Chez certains auteurs, on trouve environ -18 °C en supposant l'albédo égale à 30% au lieu de 31,3%.) (L'échelle de température kelvin est la même que l'échelle celsius mais avec le zéro décalé de 273,1 degrés : $0 \text{ °K} = -273,1 \text{ °C}$. Il ne peut pas y avoir de température inférieure à 0 °K : c'est le froid absolu.)

La température moyenne sur Terre est pourtant de $+15 \text{ °C}$ présentement. Qu'est ce qui explique cette différence de 35 degrés ?

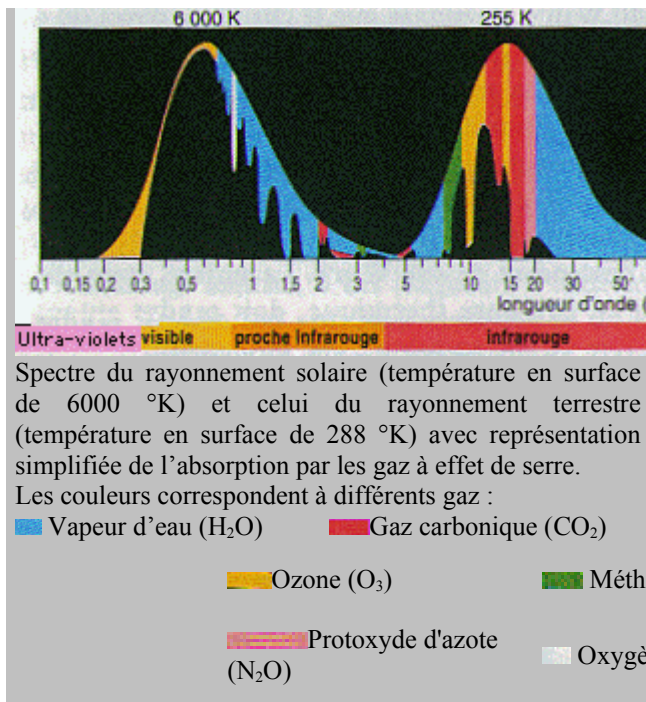
8. L'effet de serre des gaz atmosphériques

Si la température est $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ au lieu de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, c'est grâce à la présence de gaz dans la haute atmosphère qui créent un effet de serre. Qu'entend-on par là ?

Le Soleil nous envoie de la lumière dont le pic intensité correspond à une longueur d'onde de 600 nm , autour du jaune, dans la partie visible du spectre électromagnétique. Avec une température moyenne au sol de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, la Terre émet de son côté un rayonnement dont le pic d'intensité correspond à une longueur d'onde de $17\text{ }\mu\text{m}$ qui se situe en plein dans l'infrarouge. Pour caricaturer, on peut dire que le Soleil nous envoie des photons jaunes et que la Terre renvoie dans l'espace des photons infrarouges.

Or certains gaz (comme le CO_2 ou le CH_4) ont la propriété d'être transparents au rayonnement solaire mais opaques aux rayons infrarouges. Ils jouent pour notre planète le même rôle que les vitres d'une serre. Ils n'empêchent pas la lumière solaire d'arriver jusqu'à nous mais empêchent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol de repartir vers l'espace. Ils font ainsi office de "couverture" en retenant prisonnière, en quelque sorte, l'énergie et permet de maintenir le sol à une température plus élevée que s'ils étaient absents.

Ces gaz ont donc a priori un effet bénéfique. Avec une température moyenne de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la surface de la Terre, presque toute l'eau serait gelée et la vie serait difficilement possible. En élevant la température de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, ces gaz ont rendu la planète habitable.



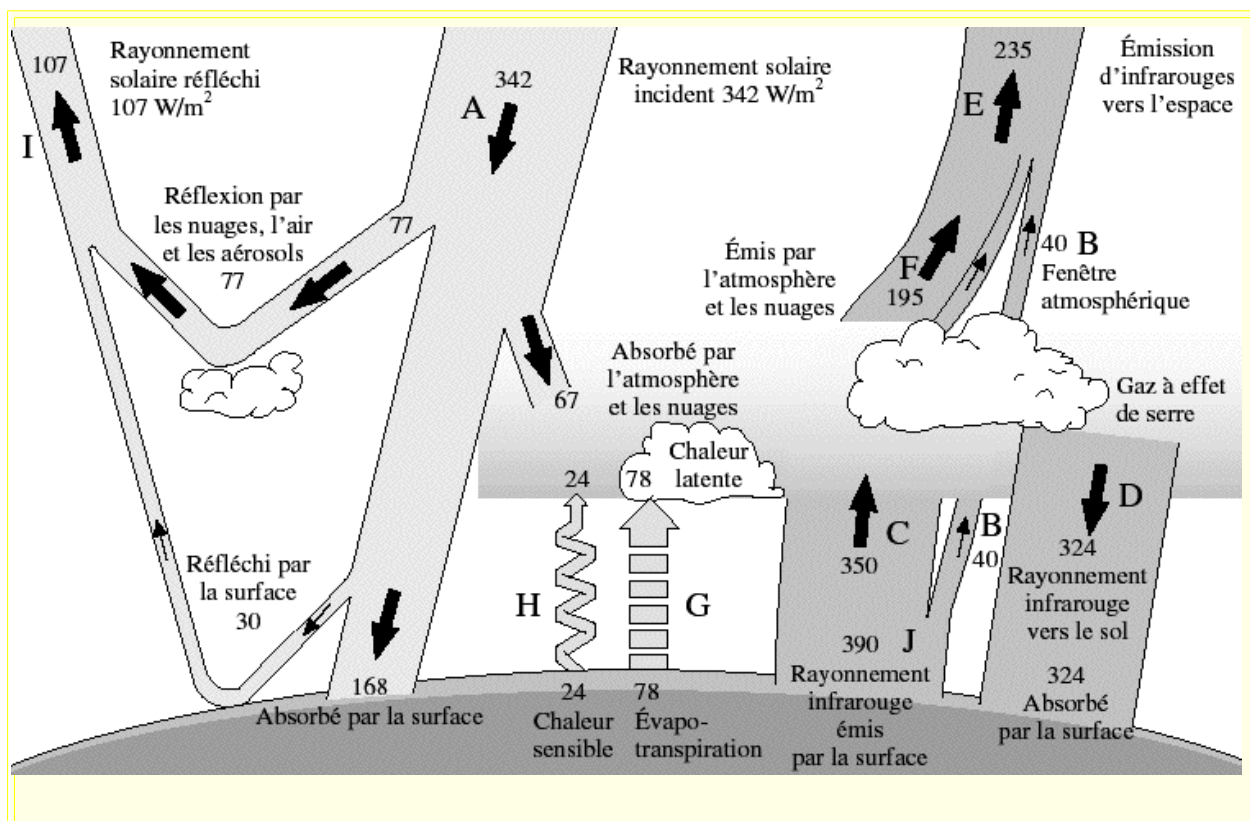
a) que le pic du rayonnement solaire est dans le visible (les gammes : ultraviolet, visible, proche infrarouge, infrarouge lointain, sont indiquées en bas du diagramme), alors que la Terre n'émet rien d'autre que de l'infrarouge lointain,

b) que les infrarouges reçus du soleil sont des proches infrarouges, qui ne sont pas les mêmes - et sont moins absorbés - que ceux émis par la Terre,

- c) que le rayonnement ultraviolet du soleil est quasiment totalement arrêté par l'ozone (à gauche), grâce à quoi nous sommes en vie,
- d) que la lumière visible du soleil est très peu interceptée par l'atmosphère (ce qui se constate facilement),
- e) que tout rayonnement émis par la Terre est partiellement ou totalement absorbé par un GES (il y a "de la couleur" sous chaque longueur d'onde), au sein desquels c'est de loin la vapeur d'eau qui en arrête le plus (bleu clair à droite),
- f) que c'est bien parce que les longueurs d'onde arrêtées par les divers GES sont différentes (en première approximation) que les effets des gaz se cumulent : si tous les GES agissaient sur les mêmes plages de fréquence, cela "saturerait" très vite sur ces fréquences mais laisserait le rayonnement repartir sans encombre pour le reste,
- g) enfin que de rajouter des GES a un impact d'autant plus important que la proportion du rayonnement déjà absorbé par ce gaz est faible : l'effet est d'autant plus important qu'il reste "du noir vers le bas" et que la bande d'absorption est large sur la courbe.

9. Bilan global des flux d'énergie dans l'atmosphère terrestre

On peut regrouper maintenant tous ces facteurs (flux solaire incident, albédo, GES) en un seul schéma comme celui-ci⁽⁷⁾ donnant le bilan global des flux d'énergie dans l'atmosphère terrestre :



Dans ce schéma, les chiffres représentent la moyenne annuelle, exprimée en W/m^2 , des flux d'énergie sur la surface entière de la planète. Le mécanisme du chauffage atmosphérique peut se résumer ainsi :

a) On a d'abord le premier flux **A** qui représente le flux solaire incident de 342 W/m^2 . Ce flux constitue donc l'input énergétique total venant du Soleil. Si la Terre est en équilibre thermique (autrement dit : si sa température est constante), son output énergétique doit être égal à son input. Elle retournera donc dans l'espace ce même flux de 342 W/m^2 . Si la Terre se réchauffe, l'output énergétique sera inférieur. Les plus récentes mesures semblent indiquer que la différence entre l'input et l'output énergétique de la Terre serait de $0,85 \text{ W/m}^2$.

De ce flux incident de 342 W/m^2 , un flux d'environ 107 retourne dans l'espace sans être absorbé, c'est l'albédo de la Terre (le flux **I** dans le schéma). De ce flux de 107 W/m^2 , environ 77 est réfléchi ou diffusé par les nuages, l'air et les aérosols et 30 par le sol. Ce qui laisse finalement un flux total absorbé de 235 W/m^2 dont 67 par l'atmosphère et les nuages et un dernier 168 W/m^2 absorbé par le sol.

S'il n'y avait pas de GES, ce flux de 168 W/m^2 serait réémis sans entrave dans l'espace sous forme d'infrarouge et la température de la Terre avoisinerait les -20°C . Mais à cause de la présence de ces gaz, l'atmosphère retourne présentement vers le sol 324 W/m^2 (flux **D**). La température au sol s'est donc élevée, au fil des millénaires, à $+15^\circ\text{C}$. Et comme conséquence de ce réchauffement, ce sol émet plutôt un flux infrarouge de 390 W/m^2 (flux **J**) au lieu de 168 . Ajouté au 24 W/m^2 en chaleur sensible (flux **H**) et au 78 W/m^2 en évapo-transpiration (flux **G**), c'est donc 492 W/m^2 au total qui provient du sol.

De ce flux infrarouge de 390 W/m^2 (flux **J**), un flux de 40 W/m^2 (flux **B**) passe carrément à travers l'atmosphère sans entrave et se retrouve dans l'espace. Le reste du flux **J** (le flux **C** de 350 W/m^2), ajouté au 24 et 78 W/m^2 des flux **H** et **G** respectivement ainsi qu'au 67 W/m^2 issu du flux **A** font un total de 519 W/m^2 , donc, qui est absorbé par l'atmosphère (qui comprend ici : l'air, les nuages et les GES).

L'atmosphère, chauffé par ces 519 W/m^2 , réémet à son tour sous forme d'infrarouge 195 W/m^2 (flux **F**) vers l'espace et 324 W/m^2 (flux **D**) vers le sol qui l'absorbe et le chauffe.

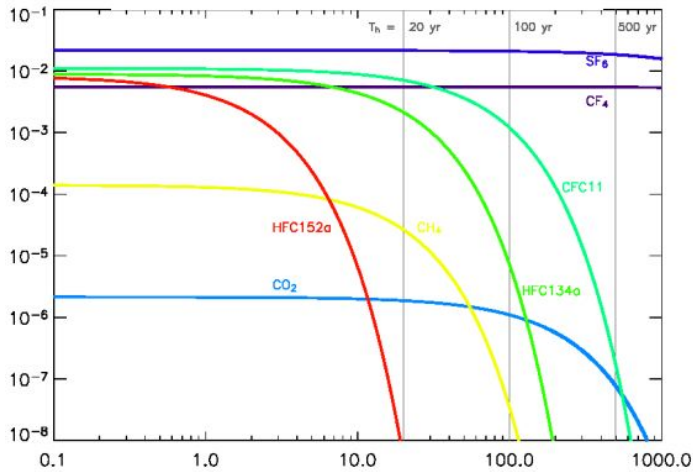
Ce flux **F** de 195 W/m^2 s'ajoute au flux **B** de 40 W/m^2 pour former le flux **E** de 235 W/m^2 . Ce flux **E** constitue l'émission infrarouge de la Terre vers l'espace.

Finalement, ce flux **E**, ajouté au flux **I** de 107 W/m^2 , forme l'output énergétique total de 342 W/m^2 égal à l'input énergétique total de 342 W/m^2 du flux **A**. La boucle est ainsi bouclée.

10. La réduction des émissions de GES empêchera-t-il le réchauffement ?

La réponse à cette question cruciale est hélas **non**.

La durée de la présence des GES dans l'atmosphère est très longue, notamment pour le principal d'entre eux, le gaz carbonique (CO_2), qui a une durée de présence dans l'atmosphère de l'ordre du siècle.

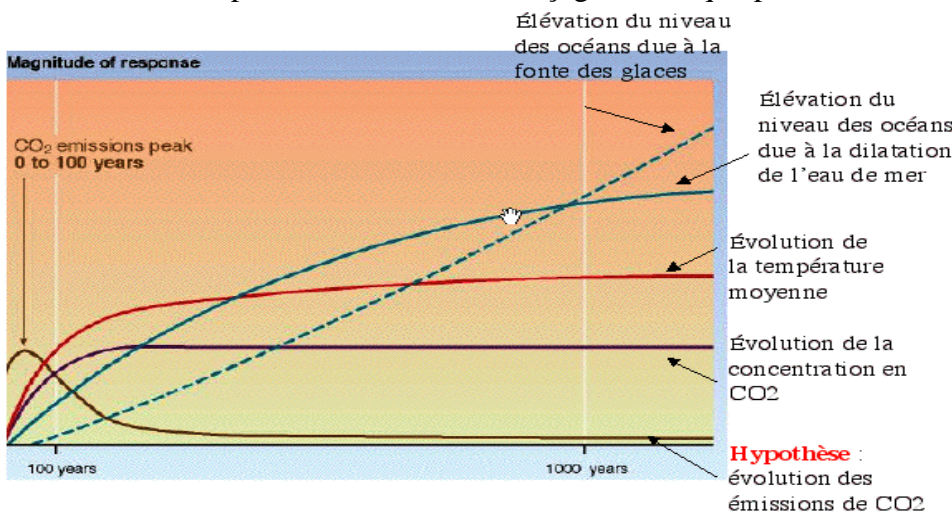


Le graphique ci-contre⁽⁸⁾ montre la concentration résiduelle dans l'atmosphère d'un surplus de GES après son émission. Il représente en W/m^2 , le forçage radiatif résiduel au cours du temps, provenant d'une tonne de gaz émise à l'instant 0. On voit qu'il faut attendre de l'ordre du siècle avant que le CO_2 ne commence à être évacué de l'atmosphère, de l'ordre de 10 ans pour le méthane, mais que certains halocarbures (comme le CF_4 , en haut du diagramme) n'ont toujours pas commencé à s'épurer significativement de l'atmosphère au bout de 1000 ans.

Si nous arrêtons totalement les émissions demain matin (y compris la respiration !), cela aurait pour seul effet de stabiliser la teneur en GES de l'atmosphère à son niveau actuel, puis de la faire lentement décroître. Or ces gaz continuent à jouer le rôle de couverture (ou de vitre de serre) tant qu'ils sont présents. **Quoi que nous fassions aujourd'hui, le réchauffement issu des gaz que l'homme a mis dans l'atmosphère depuis 1750 se poursuivra donc encore pour quelques siècles.**

L'accord de Kyoto demande aux différents pays de ramener leurs émissions de GES au niveau de 1990. Les émissions de CO_2 qui étaient de $3,87 \times 10^{12}$ kg en 1990 sont passées à $7,91 \times 10^{12}$ kg en 2004, soit plus du double de 1990 ! Mais même si nous réussissions à ramener nos émissions au niveau de 1990, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère continuerait de croître. Cette concentration était de 280 parties par million (ppm) en 1880. Elle est aujourd'hui de 380 ppm 125 ans plus tard, soit une augmentation de 36%. Au rythme de 1990, cette concentration augmenterait encore au rythme d'au moins une ppm par année.

Par ailleurs, la "réponse" de l'océan au forçage thermique prend des siècles, et la réponse des calottes glaciaires des pôles prend des millénaires.



Le graphique ci-contre⁽⁹⁾ illustre le délai incompressible qui s'écoule entre un maximum d'émission CO_2 (courbe marron, tout en bas, culminant en 2050 environ sur cet exemple) et un maximum des conséquences : la montée des températures perdure pendant plusieurs siècles après décroissance forte des émissions, et le niveau de la mer monte pendant plusieurs millénaires. Si le maximum des émissions de CO_2 intervient plus tard, les courbes sont décalées vers la droite mais l'enchaînement général reste le même. Et bien sûr, l'ampleur de la réponse des diverses composantes du système climatique dépend du niveau auquel le CO_2 se stabilise et donc de la date et du niveau du maximum des émissions.

11. Que faire alors pour « climatiser » la Terre ?

Il est clair qu'en faisant porter tous nos efforts (physiques et économiques) sur la seule réduction des GES, nous nous illusionnons grandement sur les effets escomptés. Tout au plus, comme nous venons de le voir, allons-nous différer l'inévitable augmentation de température de quelques décennies. Alors que faire d'autre ?

Une partie des centaines de milliards \$ que les états prévoient consacrer à limiter les émissions GES devrait être investie dans la recherche de solutions plus efficaces visant à contrôler la température sur Terre. L'idée de base est de réduire le flux d'énergie Φ_A de 235 W/m^2 présentement absorbé par l'atmosphère et le sol. Chaque réduction $\Delta\Phi_A$ de ce flux absorbé, entraînera une diminution ΔT de la température moyenne sur Terre, suivant l'expression :

$$\Delta T = 4\sigma T^3 / \Delta\Phi_A.$$

Si on réussit à réduire Φ_A de 1 W/m^2 , on réduira la température de $5,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ou on empêchera l'effet de serre de l'augmenter de $5,4 \text{ }^\circ\text{C}$. C'est beaucoup. C'est environ l'augmentation de température prévue pour la fin du siècle si on réduit nos émissions de GES au niveau de 1990.

Donc, objectif : **Réduire le flux d'énergie Φ_A de 1 W/m^2 .**

Deux pistes de recherche peuvent être envisagées :

- (1) celle qui vise à modifier l'albédo de la Terre et
- (2) celle qui vise à réduire l'apport d'énergie entrant dans l'atmosphère.

12. Opération « Blancheur » ou Opération « Miroir »

La première piste de recherche (qu'on pourrait baptiser « Opération Blancheur » ou « Opération Miroir ») entend profiter du fait que l'atmosphère est pratiquement transparente à la lumière visible, pour renvoyer dans l'espace le plus d'énergie possible dans cette partie du spectre.

On pourrait y arriver en blanchissant ou en rendant réfléchissantes certaines surfaces. Comment ? Je lance quelques idées qu'il faudrait bien sûr explorer, analyser et expérimenter :

- Répandre sur les océans ou sur les calottes glaciaires une substance blanche ou miroitante (flocons de polystyrène, silice vitrifiée, etc.).
- Développer par des OGM des mousses, des lichens ou des plantes blanches (sans chlorophylle) et voir si on peut les ensemercer dans la toundra, les déserts ou à la surface des océans.

Il faudrait évaluer également le coût de chaque solution et son efficacité à réduire le flux d'énergie absorbé par la Terre.

13. Opération « Parasol »

La deuxième piste de recherche (qu'on pourrait appeler « Opération Parasol ») vise à diminuer le flux d'énergie Φ_M de 342 W/m^2 que reçoit la Terre. On pourrait y arriver en bloquant une partie de la lumière solaire. Comment ? Voici une idée à explorer :

- Placer en orbite autour de la Terre des « parasols » en mylar. On peut fabriquer du mylar ayant une épaisseur de 0,1 mm très opaque au rayonnement. Une tonne de mylar a un volume d'environ 1 m^3 et peut couvrir une surface de 10^4 m^2 . Il faudrait en mettre 50 000 tonnes en orbite autour de la Terre pour couvrir 0,1% de la surface terrestre et réduire d'environ 1 W/m^2 le flux d'énergie solaire incident. Pour élever 50 000 tonnes à 100 km de hauteur et lui impartir une vitesse de 10 km/s, il faudrait 3×10^{15} joules d'énergie. À 10¢ le kW-h, ça coûterait 80 million \$.

Quand on compare aux centaines de milliards \$ qu'on s'apprête à dépenser pour réduire les émissions de GES sans même espérer empêcher la température d'augmenter de 4 à 5 °C d'ici la fin du siècle, dépenser 80 million \$ pour climatiser la Terre, semble une bagatelle !

Je vous laisse réfléchir à tout ça.

Sources bibliographiques

- ⁽¹⁾ *Climate Change, the Scientific Basis*, GIEC, 2001.
(Le GIEC est un Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat sous l'égide de l'ONU.)
- ⁽²⁾ Intervention au Symposium du Collège de France, André Berger, 2004
- ⁽³⁾ Berner, *Science*, 1997
- ⁽⁴⁾ Petit & al., *Nature*, Juin 1999
- ⁽⁵⁾ Goddard Institute for Space Studies / NASA, avril 2005
- ⁽⁶⁾ Robert Sadourny, *Le climat de la Terre*, Éd. Flammarion
- ⁽⁷⁾ Schéma tiré de *L'avenir climatique*, de Jean-Marc Jancovici, Éd. Seuil, mars 2002
- ⁽⁸⁾ D. Hauglustaine, LSCE
- ⁽⁹⁾ *Climate Change, the Scientific Basis*, GIEC, 2001