

Climatiser la Terre

ou comment pourrait-on VRAIMENT
contrôler la température de la Terre

Alain Bonnier, Ph.D. (physique)

octobre 2007 / révisé en décembre 2009



1. La physique du réchauffement climatique
2. Le climat se réchauffe-t-il vraiment ?
3. Le réchauffement climatique observé est-il « normal » ?
4. Le flux d'énergie venant du Soleil
5. Répartition du flux solaire sur la surface de la Terre
6. L'albédo de la Terre
7. La température de la Terre sans l'effet de serre
8. L'effet de serre des gaz atmosphériques
9. Bilan global des flux d'énergie dans l'atmosphère
10. Le forçage radiatif des GES
11. La réduction des émissions de GES empêchera-t-il le réchauffement ?
12. Que faire alors pour « climatiser » la Terre ?
13. Opération Albédo
14. Opération Parasol
15. Simple lubie ?
16. Période de questions

1. La physique du réchauffement climatique

Depuis quelque temps, on dit que la Terre se réchauffe et que cela aura des conséquences graves sur les écosystèmes au cours des prochaines années. Une des causes de ce réchauffement est l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) qu'on envoie dans l'atmosphère. Dans l'espoir de stopper l'augmentation de température prévue, les experts sur le climat ont donc proposé de réduire nos émissions de GES. Ce qui a donné lieu à différents accords internationaux visant à réduire ces émissions dont celui de Kyoto en 1995 et celui plus récent de Copenhague en 2009.

Mais est-ce la bonne solution ?

Nous le verrons lors de cette causerie : même si on arrêta complètement demain matin, partout sur Terre, d'émettre des GES (ce qui est virtuellement impossible), on n'empêcherait pas la température d'augmenter d'au moins 2 °C d'ici la fin du siècle. Pourquoi ? Tout simplement parce qu'une fois rendus dans l'atmosphère, ces GES y perdurent longtemps avant de retomber au sol puis être absorbés dans la croissance végétale ou dissous dans la mer. La durée de présence dans l'atmosphère du CO₂, par exemple, est de plusieurs siècles; celle de certains halocarbures, de plusieurs millénaires. La « solution » Kyoto ou Copenhague est donc illusoire si on pense ainsi stopper l'augmentation de température avant un ou deux siècles.

Alors que faire d'autre pour stopper ce réchauffement ?

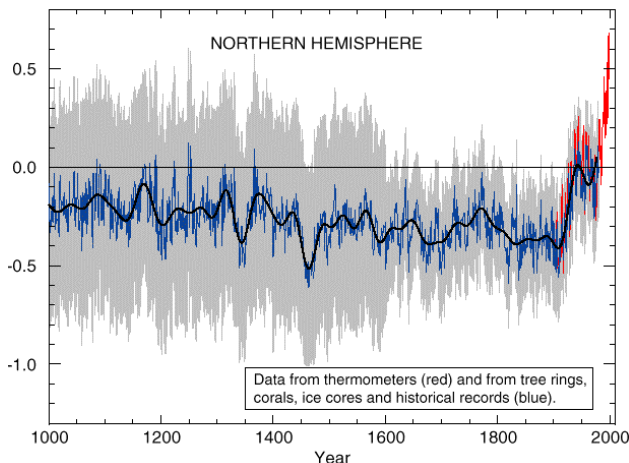
Avant de répondre à cette question, nous regarderons ce qui nous a amenés à penser que le climat se réchauffe. Ce n'est pas évident. Mesurer la température moyenne de la Terre avec une précision d'un centième de degré celsius afin de détecter des variations de quelques dixièmes de degrés sur un siècle est déjà tout un exploit technologique en soi. Ce n'est que depuis une vingtaine d'années à peine qu'on y est parvenu et qu'on s'est convaincu que la température avait augmenté de 0,74 °C durant le dernier siècle et qu'il y avait donc manifestement un réchauffement climatique en cours.

Et si réchauffement il y a, quelle en est la cause ?

Les GES jouent un rôle, bien sûr, mais ce n'est pas le seul facteur qui intervient dans ce réchauffement. Pour mieux comprendre le mécanisme en jeu et mesurer l'importance relative de ces facteurs, nous ferons appel à quelques notions de physique portant sur la lumière, les flux d'énergie, la température, etc.

Ce qui nous permettra de voir ensuite comment on pourrait 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'incertitude. Le graphique ci-contre montre l'évolution de la température dans l'hémisphère Nord durant le dernier millénaire par rapport à la température en 1975 qui était de 14°C environ ⁽¹⁾⁽⁷⁾. 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'incertitude).

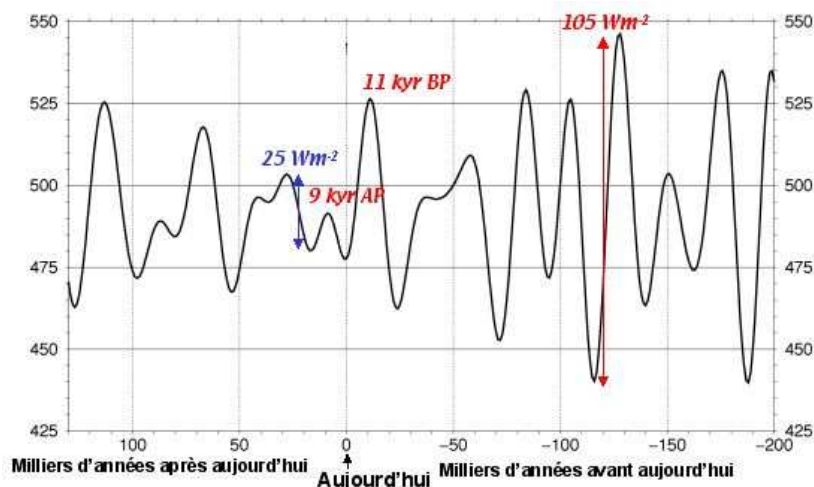
Ce graphique illustre deux faits importants :

- 1) L'augmentation observée depuis 1900 est 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 faisait dire à certains jusqu'à tout récemment que l'on ne pouvait pas éliminer complètement la possibilité que ce soit une variation "normale".

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

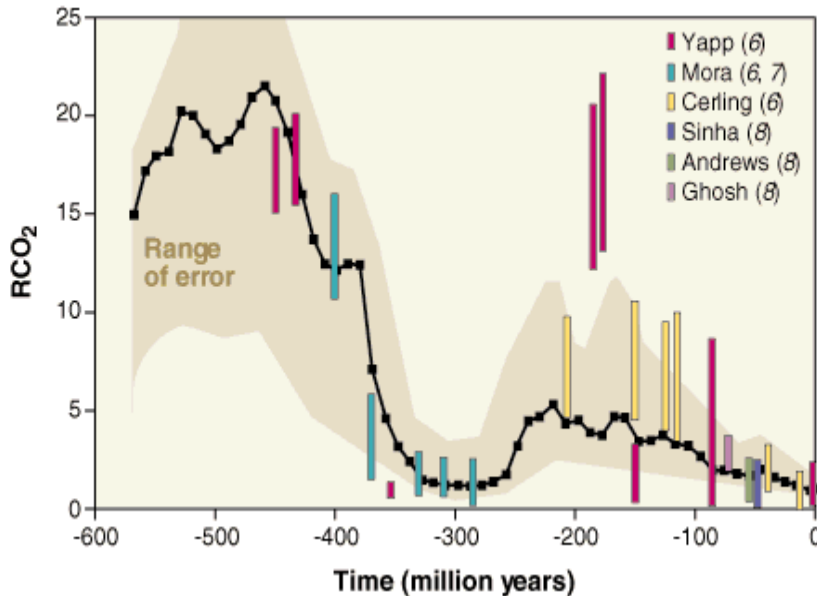
La température atmosphérique est déterminée essentiellement par trois facteurs :

- 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 réfléchié ou diffusée dans l'espace).
- c) L'effet de serre produit par certains gaz dans la haute atmosphère.



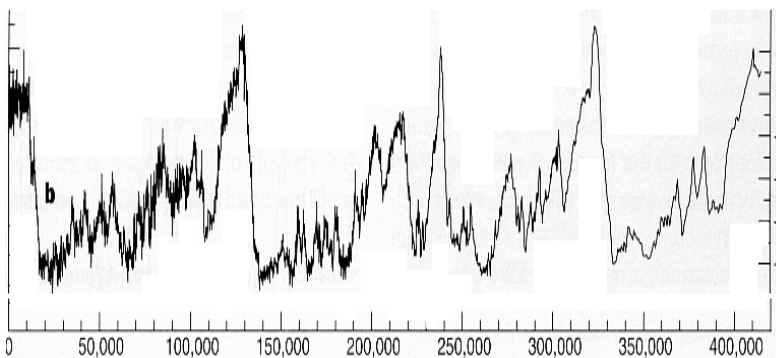
Or ces trois facteurs ont varié continuellement durant les 4,6 milliards d'années d'existence de la Terre. Le graphique ci-contre ⁽²⁾⁽⁷⁾ donne la variation du flux moyen d'énergie solaire reçue sur la Terre au milieu du mois de juin, à la latitude 65° Nord, depuis 200 000 ans ainsi que les projections 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 $480 W/m^2$ 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. Pour se faire une idée de l'ampleur de ces variations, on peut comparer celle de 105 W/m² qui s'est produite il y a 120 000 ans avec celle d'environ 8 W/m² qu'on appréhende d'ici la fin du siècle.



De même pour les gaz à effet de serre (GES) dont le principal est le CO₂, on peut voir au graphique ⁽³⁾⁽⁷⁾ 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 ppmv et celle existant dans le passé. Par exemple RCO₂ = 5 signifie que la concentration est de 5×300 = 1500 ppmv ou encore que le CO₂ occupe alors 0,15% de l'atmosphère en volume. 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).



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⁾⁽⁷⁾ 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

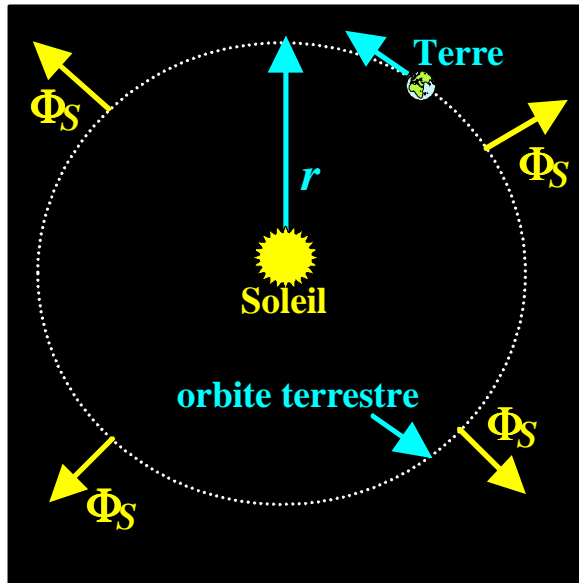
de température est légèrement plus élevée que celle de la planète dans son ensemble. (Cette courbe se lit aussi à l'envers : plus on va vers la droite, plus on remonte dans le temps.) Le fait que les oscillations soient plus importantes à gauche (donc récemment) tient à la meilleure précision des mesures 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 réfléchiée 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 millièème 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

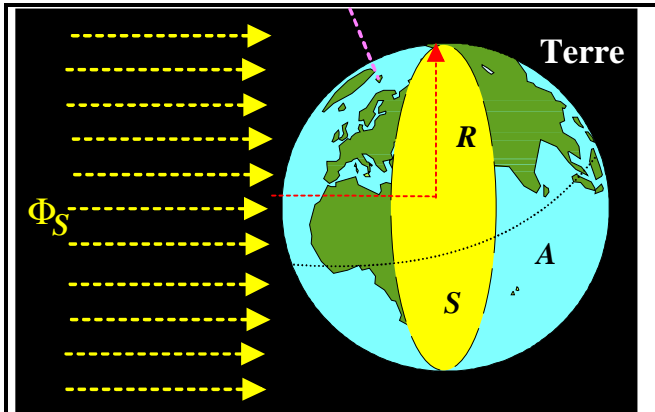
$$\Phi_S = 1368 \text{ W/m}^2. \quad (\text{Éq. 1})$$

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). Le flux lumineux variant comme l'inverse du carré de la distance, le flux solaire incident oscille donc durant l'année entre 1323 W/m² (en juin) et 1414 (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

$$P_T = 1,74 \times 10^{17} \text{ W.} \quad (\text{Éq. 2})$$

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 4,8 G\$ par seconde.

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

$$\Phi_M = \frac{1}{4}\Phi_S = 342 \text{ W/m}^2. \quad (\text{Éq. 3})$$

Mais ce flux d'énergie Φ_M ne sert pas entièrement à chauffer la Terre. Une partie retourne directement 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 (que nous noterons par le symbole : α) 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 % l'est 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 elles 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

$$\Phi_A = (1 - \alpha) \Phi_M = 235 \text{ W/m}^2 \quad (\text{Éq.4})$$

absorbé en moyenne par l'atmosphère et l'ensemble de la surface terrestre qui constitue l'intrant énergétique de la Terre.

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

Quand la température d'un corps est 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/m^2 alors que celui Φ_E émis dans l'espace est d'environ 234 W/m^2 . La différence entre Φ_A et Φ_E est plus précisément de $0,85 \text{ W/m}^2$ selon les plus récentes mesures de la NASA faites en 2005. ⁽⁵⁾ C'est ce qui explique que la Terre se réchauffe depuis quelque temps. Pour la suite, nous supposerons pour simplifier que $\Phi_E \approx \Phi_A = 235 \text{ W/m}^2$.

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 un flux d'énergie thermique Φ_T tel que

$$\Phi_T = \sigma T^4. \quad (\text{Éq.5})$$

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

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}. \quad (\text{Éq.6})$$

On exprime ici la température en degrés kelvin. L'échelle de température Kelvin est la même que l'échelle Celsius mais avec le zéro décalé de 273,1 degrés. Ainsi $0^\circ\text{K} = -273,1^\circ\text{C}$. C'est une échelle de température plus « naturelle » puisqu'elle est directement reliée au carré de la vitesse moléculaire moyenne. Il n'y a donc pas de température inférieure à 0°K . C'est le froid absolu.

À partir de cette loi, on peut en déduire la température T d'un corps à partir du flux d'énergie thermique Φ_T qu'il émet :

$$T = \left(\frac{\Phi_T}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (\text{Éq.7})$$

En résumé, la Terre absorbe un flux d'énergie Φ_A . À l'équilibre thermique, ce flux est réémis intégralement à partir de sa surface sous forme de flux thermique Φ_T . En l'absence de GES, ce flux Φ_T traverse alors intégralement l'atmosphère et est égal au flux d'énergie Φ_E émis dans l'espace. On a donc ici :

$$\Phi_A = \Phi_T = \Phi_E = 235 \text{ W/m}^2. \quad (\text{Éq.8})$$

Et on trouve à partir de l'Éq.7 que la température de la Terre devrait être dans ce cas $T = 254 \text{ }^\circ\text{K}$ ou

$$T = -19 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (\text{Éq.9})$$

Chez certains auteurs, on trouve -18°C en supposant l'albédo égal à 30% au lieu de 31,3%.

La température moyenne sur Terre est pourtant de $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ présentement. Qu'est ce qui explique cette différence de 34 degrés ?

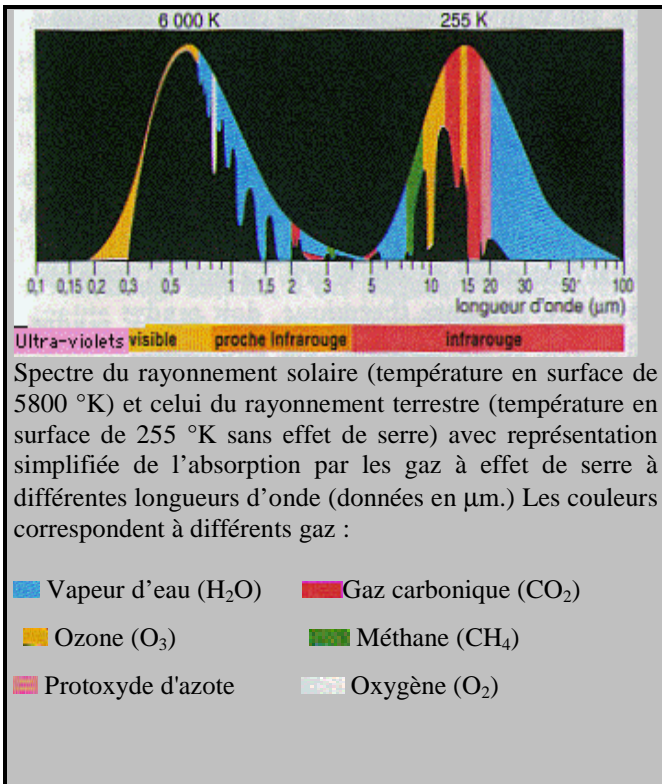
8. L'effet de serre des gaz atmosphériques

Si la température est +15 °C au lieu de -19 °C, c'est grâce au *forçage radiatif* dû à la présence de certains 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 d'intensité correspond à une longueur d'onde de 500 nm, autour du jaune-vert, dans la partie visible du spectre électromagnétique. Avec une température moyenne au sol de 15°C, la Terre émet de son côté un rayonnement dont le pic d'intensité correspond à une longueur d'onde de 10 µm qui se situe 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.

Quand un corps est à une température T , il émet un rayonnement qui s'étale dans tout le spectre électromagnétique avec un pic d'intensité centré sur une longueur d'onde $\lambda^* \cong 2900/T$ quand on exprime λ^* en µm et T en °K. À 5800°K (la température à la surface du Soleil), le pic d'intensité se situe dans la partie visible du spectre, autour de $\lambda^* = 0,5 \mu\text{m}$ et correspond à la couleur jaune-vert. À 254°K (ou -19°C, la température à la surface de la Terre s'il n'y avait pas d'effet de serre), le pic d'intensité se situerait dans l'infrarouge autour de $\lambda^* = 11,4 \mu\text{m}$. Et à 288 °K (ou 15°C), le pic se situe autour de $\lambda^* = 10 \mu\text{m}$.

Or certains gaz (comme le CO₂ ou le CH₄) 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 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 -19°C à la surface de la Terre, presque toute l'eau serait gelée et la vie serait difficilement possible. En élevant la température de 34°C, ces gaz ont rendu la planète habitable.



Le schéma ci-contre⁽⁶⁾⁽⁷⁾ représente l'absorption de la lumière solaire (pic de gauche) et l'absorption du rayonnement thermique terrestre (pic de droite) en fonction de la longueur d'onde par les principaux gaz à effet de serre (GES) dont la vapeur d'eau (H₂O), le gaz carbonique (CO₂), l'ozone (O₃), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'oxygène (O₂). (À noter que l'échelle sous le graphique est un peu décalée vers la gauche puisque le pic de gauche devrait être vis-à-vis 0,5 µm et celui de droite vis-à-vis 11,4 µm.)

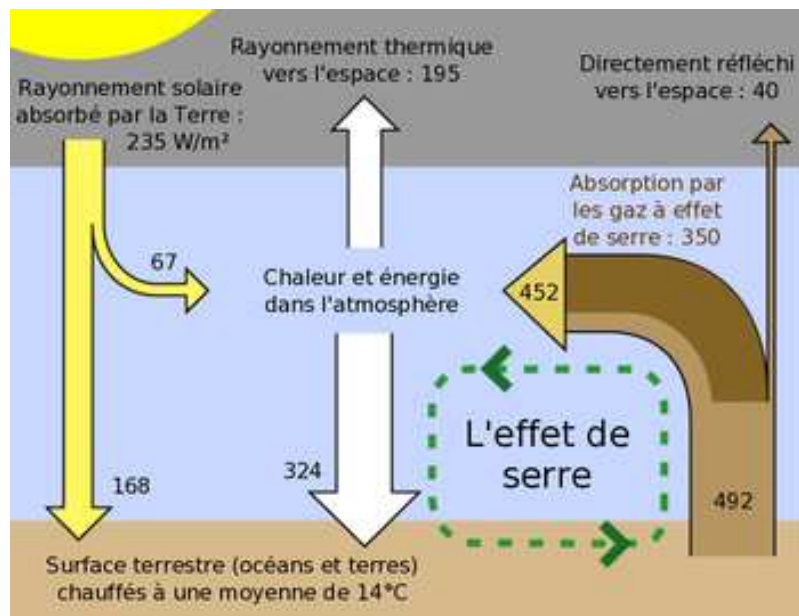
Les bandes de couleur représentent la proportion de l'énergie rayonnée qui est interceptée par les différents GES à différentes longueurs d'onde. Chaque couleur correspond à un des six principaux GES. En fait, il y a quelques recouvrements, mais ils ne sont pas représentés sur le schéma pour simplifier les choses. En regardant ce diagramme, on constate assez facilement⁽⁷⁾ :

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), limitant l'effet néfaste de ces rayons sur les molécules du vivant,
- 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 :



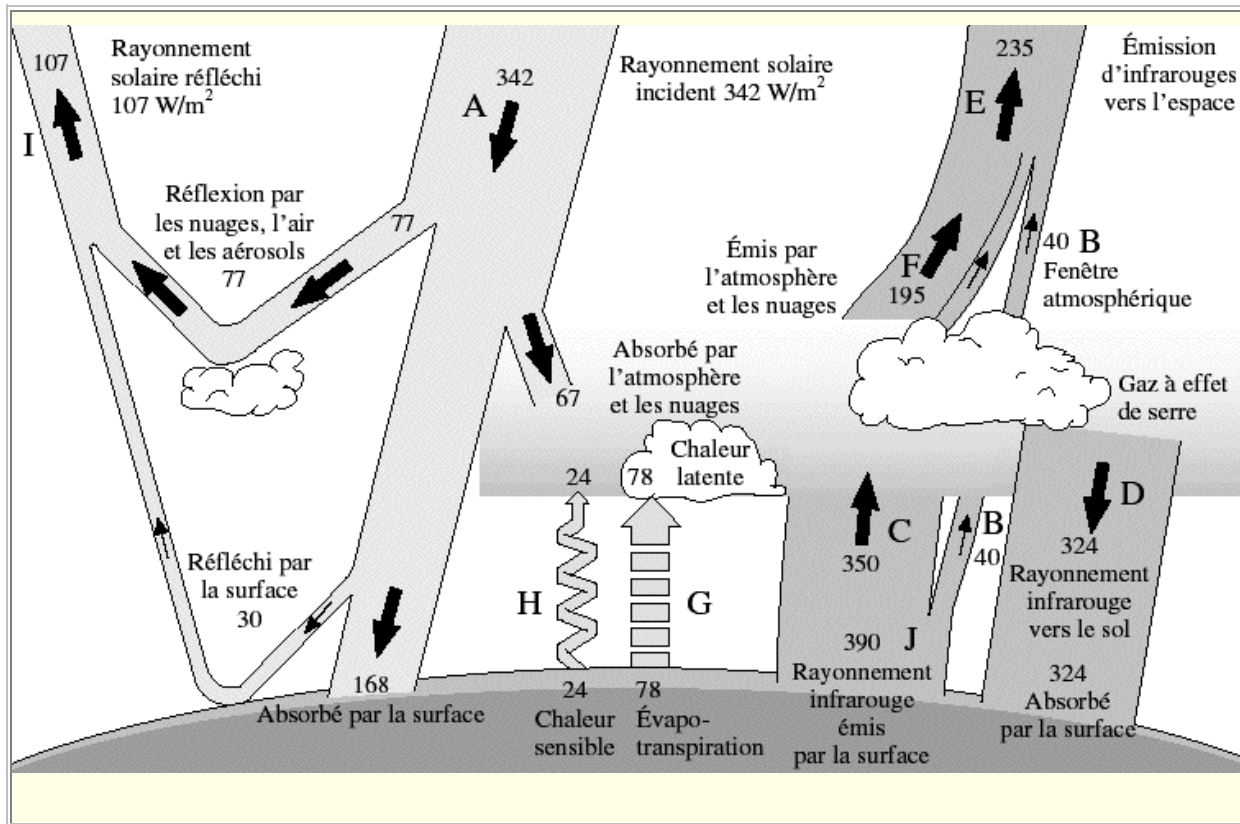
On a vu précédemment que le flux solaire incident absorbé par la Terre était de 235 W/m^2 . De ce flux, 67 W/m^2 est absorbé en cours de route à travers l'atmosphère alors que 168 W/m^2 se rend jusqu'au sol.

La température au sol étant de 14°C (c'était le cas en 1975 mais cette température est maintenant de 15°C), celui-ci envoie 492 W/m^2 dans l'atmosphère sous forme d'infrarouge. Une petite partie de ce flux, soit 40 W/m^2 , passe carrément à travers l'atmosphère et se retrouve dans l'espace alors que la principale partie, 452 W/m^2 , est absorbée dans l'atmosphère dont 350 W/m^2 par les GES eux-mêmes.

C'est ici que se produit l'effet de serre. Les gaz de l'atmosphère qui ont absorbé $67 + 452$, soit 519 W/m^2 en tout, réémettent à leur tour cette énergie dans toutes les directions : 195 W/m^2 vers l'espace et

324 W/m² vers le sol. C'est ce dernier flux vers le sol qui contribue à le surchauffer et qui complète la boucle de l'effet de serre.

Le schéma ci-dessous représente le même phénomène mais de façon encore plus détaillée. Les chiffres ici représentent la moyenne annuelle, exprimée en W/m², des flux d'énergie sur la surface entière de la planète. . Le mécanisme du chauffage atmosphérique peut se résumer ainsi :



On a d'abord le premier flux **A** qui représente le flux solaire incident moyen $\Phi_M = 342 \text{ W/m}^2$ réparti sur l'ensemble de la sphère terrestre. Ce flux constitue donc l'intrant énergétique total de la Terre. Si la Terre est en équilibre thermique (autrement dit : si sa température est constante), son intrant énergétique doit être égal à son extrant. Elle retournera donc dans l'espace ce même flux de 342 W/m². Si la Terre se réchauffe, l'extrant énergétique sera inférieur. Les plus récentes mesures semblent indiquer que la différence entre l'intrant et l'extrant énergétique de la Terre serait de 0,85 W/m².

De ce flux incident de 342 W/m², 31,3% (soit 107 W/m²) 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/m², 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 Φ_A de 235 W/m² dont 67 par l'atmosphère et les nuages et un dernier 168 W/m² absorbé par le sol.

S'il n'y avait pas de GES, le flux absorbé Φ_A de 235 W/m² serait réémis sans entrave dans l'espace sous forme d'infrarouge et la température de la Terre avoisinerait les -19°C. Mais à cause de la présence de ces gaz, l'atmosphère retourne présentement vers le sol 324 W/m² (flux **D**). La température au sol s'est donc élevée, au fil des millénaires, à +15 °C. Et comme conséquence de ce réchauffement, ce sol émet plutôt un flux infrarouge Φ_T de 390 W/m² (flux **J**) au lieu de 235. Ajouté au 24 W/m² en chaleur sensible (flux **H**) et au 78 W/m² en évapo-transpiration (flux **G**), c'est donc 492 W/m² 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 au total 519 W/m^2 qui sera absorbé par l'atmosphère (qui comprend ici : l'air, les nuages et les GES).

L'atmosphère, chauffée 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 se chauffe.

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

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

10. Le forçage radiatif des GES

Il résulte donc de cet effet de serre un *forçage radiatif* Φ_R , défini (approximativement) comme la différence entre le flux de rayonnement infrarouge Φ_T émis par la Terre au niveau du sol et le flux de rayonnement infrarouge Φ_E émis vers l'espace à la surface de la tropopause. (La tropopause est la surface limite entre la troposphère et la stratosphère, à une altitude moyenne de 11 km.) :

$$\Phi_R = \Phi_T - \Phi_E. \quad (\text{Éq.10})$$

Avec $\Phi_T = 390 \text{ W/m}^2$ et $\Phi_E = 235 \text{ W/m}^2$, la valeur du forçage radiatif est donc présentement :

$$\Phi_R = 155 \text{ W/m}^2. \quad (\text{Éq.11})$$

Avec l'effet de serre, le flux thermique Φ_T émis par le sol terrestre n'est donc plus égal au flux Φ_A absorbé. Il faut maintenant lui ajouter le flux Φ_R du forçage radiatif, selon l'expression :

$$\Phi_T = \Phi_A + \Phi_R \quad (\text{Éq.12})$$

Ce forçage radiatif Φ_R est lui-même fonction de la quantité de GES dans l'atmosphère et du flux absorbé Φ_A , selon l'expression :

$$\Phi_R = \rho \Phi_A \quad (\text{Éq.13})$$

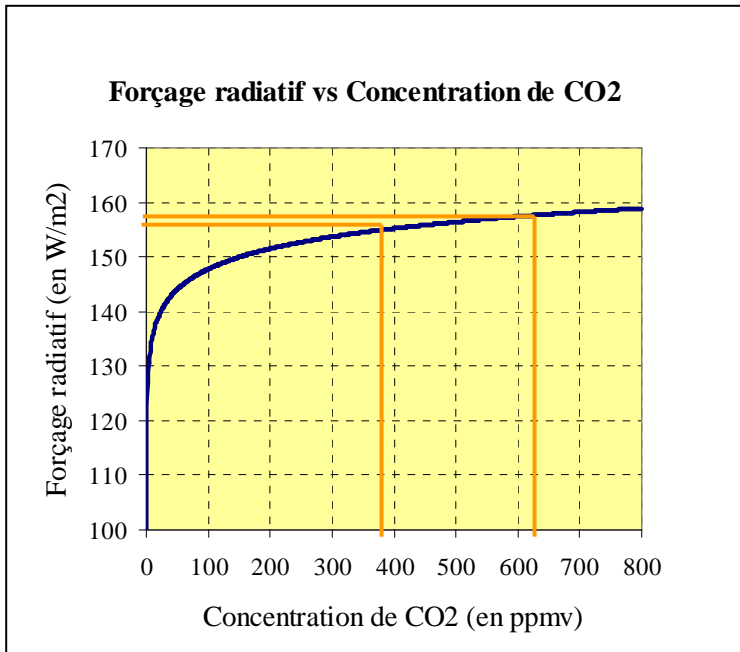
Ce qui permet de réécrire l'Éq.12 comme étant :

$$\Phi_T = \Phi_A (1 + \rho) \quad (\text{Éq.14})$$

où ⁽⁹⁾

$$\rho = k \ln(C/C_0). \quad (\text{Éq.15})$$

est le *facteur radiatif* (égal à 0,660 à la fin de 2004). Le paramètre C est la concentration d'un mélange de GES équivalent CO_2 (égale à 378 ppmv en 2004), C_0 est une concentration de référence (égale à 10^{-10} ppmv) et k une constante (égale à 0,0228).

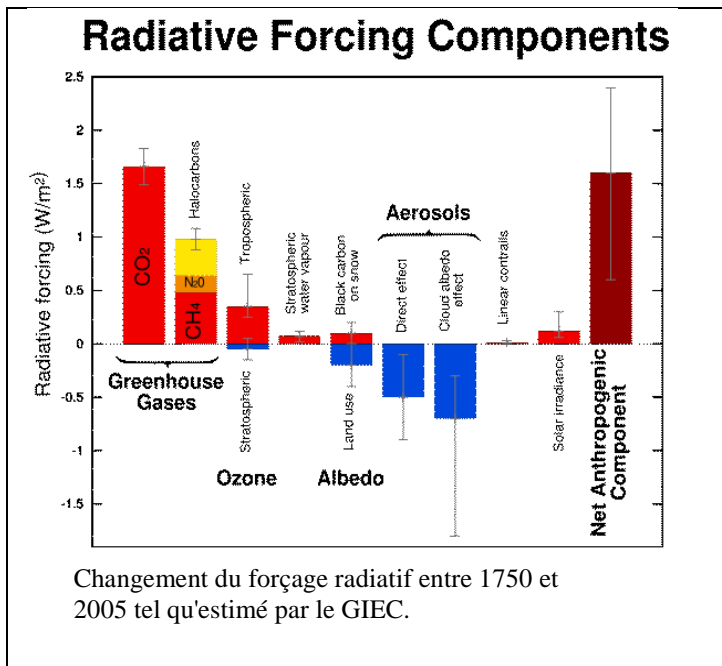


Ce qui est remarquable dans l'Éq.15 est le fait que le facteur radiatif ρ varie comme le *logarithme* de la concentration de CO_2 . La fonction logarithmique est une fonction qui varie très lentement. La concentration de CO_2 augmente présentement d'environ 2 ppmv par an. Comme elle était de 378 ppmv en 2004, elle est probablement rendue aux environs de 390 ppmv en 2010. En supposant un taux composé annuel de 0,5%, elle aura augmenté de 62% en 2100 par rapport à 2004 et atteindrait 610 ppmv. Mais pendant ce temps, le forçage radiatif Φ_R qui était de 155 W/m^2 en 2004 sera rendu à ... $157,5 \text{ W/m}^2$. Soit une augmentation d'à peine 1,6% !

Pour une augmentation $\Delta\Phi_T$ du flux infrarouge émis par la surface de la Terre, on aura une augmentation de température ΔT :

$$\Delta T = \Delta\Phi_T / 4\sigma T^3. \quad (\text{Éq.16})$$

Avec $\Delta\Phi_T = 2,5 \text{ W/m}^2$, on obtiendrait une augmentation de température $\Delta T = 0,5 \text{ °C}$ d'ici la fin du siècle. Dans les modèles climatiques du GIEC, on obtient une température environ trois fois supérieure en tenant compte des autres GES que le CO_2 et des *effets de boucle* dans les calculs. On arrive ainsi à $\Delta T = 1,5 \text{ °C}$. Ce faisant, on suppose alors que l'augmentation $\Delta\Phi_R$ du forçage radiatif d'ici la fin du siècle serait de $7,5 \text{ W/m}^2$, soit une augmentation relative $\Delta\rho/(1+\rho)$ de 1,9%.



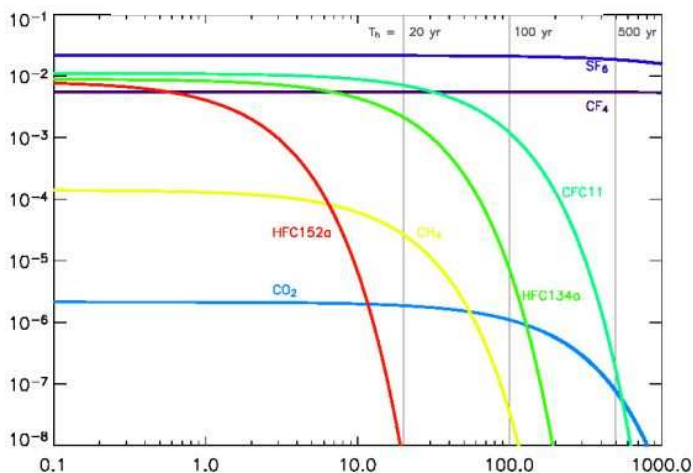
On peut comparer cette augmentation de forçage radiatif $\Delta\Phi_R$ de $7,5 \text{ W/m}^2$ qui nous attend d'ici la fin du siècle avec l'augmentation du forçage dû à l'activité humaine (forçage radiatif anthropique net) qui a été, selon les estimés du GIEC⁽¹⁰⁾, d'environ $1,6 \text{ W/m}^2$ depuis le début de l'ère industrielle vers 1750. On remarquera dans la figure ci-contre que le forçage radiatif dû aux gaz autres que CO_2 est pratiquement annulé par le forçage radiatif négatif dû à l'albédo des aérosols et des nuages.

Certains physiciens – dont Claude Allègre⁽¹¹⁾ – contestent cette interprétation à l'effet que le CO_2 émis par l'homme soit responsable du réchauffement climatique observé au XX^{e} siècle.

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

La réponse à cette question cruciale est hélas **non**.⁽⁷⁾

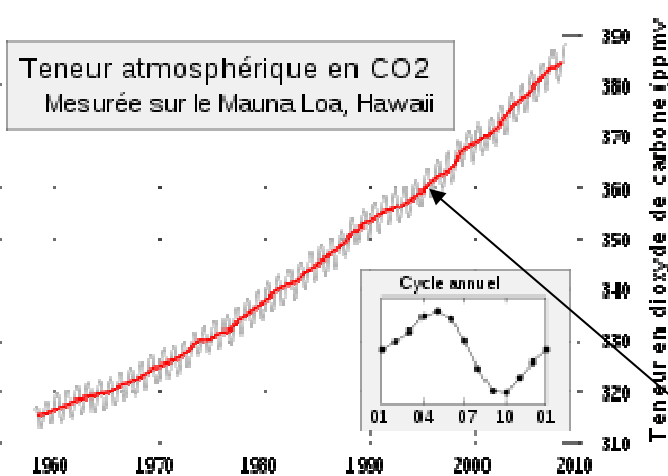
La durée de la présence des GES dans l'atmosphère est très longue, notamment pour le principal d'entre eux, le gaz carbonique (CO₂), qui a une durée de présence dans l'atmosphère de l'ordre du siècle.



Le graphique ci-contre⁽¹⁾ montre la concentration résiduelle dans l'atmosphère d'un surplus de GES après son émission. Il représente en W/m², 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 CO₂ ne commence à être évacué de l'atmosphère, de l'ordre de 10 ans pour le méthane, mais que certains halocarbures (comme le CF₄, 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.**⁽⁷⁾

L'accord de Kyoto demandait en 1995 aux différents pays de ramener leurs émissions de GES au niveau de 1990. En décembre 2009, on apprenait l'échec de la conférence de Copenhague qui devait prendre le relai de l'accord de Kyoto. Cet échec venait encore une fois confirmer les doutes que l'on pouvait avoir sur la capacité des pays à s'entendre pour réduire leurs émissions de GES.



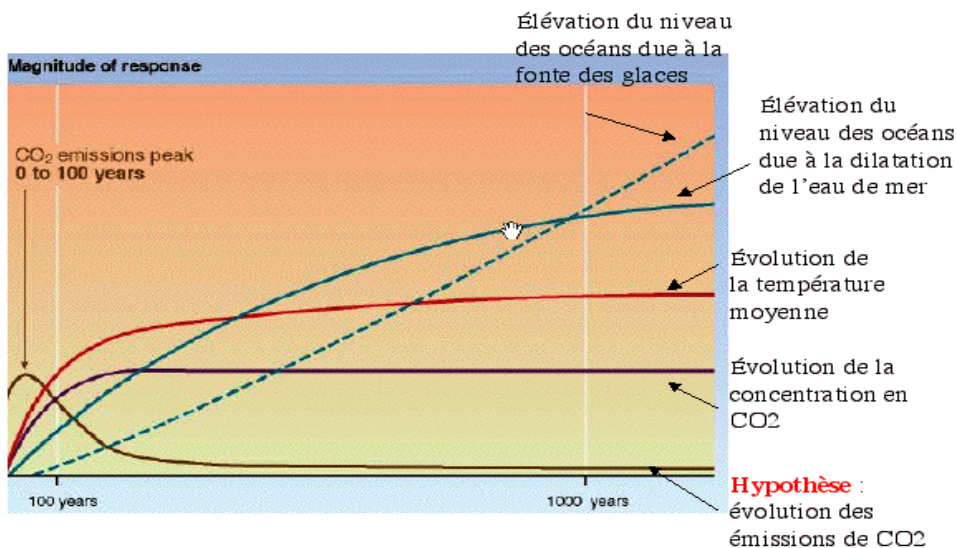
Mais même s'il y avait eu entente à Copenhague comme ce fut le cas à Kyoto en 1995, cela ne veut pas dire que les émissions de GES auraient diminué pour autant dans les années qui suivent. Pour ceux qui pourraient croire encore à l'efficacité de tels accords internationaux, je laisse à réfléchir le graphique ci-contre montrant l'évolution de la teneur atmosphérique en CO₂. De 1975 à 1995, on y voit que cette concentration est passée de 330 à 360 ppmv, pour une augmentation annuelle moyenne d'environ 1,5 ppmv.

Maintenant, voyez-vous un fléchissement marqué de la courbe à partir de 1995 qui indiquerait une diminution des émissions de CO₂ depuis l'accord de Kyoto ?

Moi non plus. En fait, si fléchissement il y a, ce serait plutôt vers le haut puisque la concentration est passée de 360 ppmv en 1995, à 385 ppmv en 2008, pour une augmentation annuelle moyenne de 1,9 ppmv. Croyez-vous maintenant que l'on fera mieux, sans l'accord de Copenhague, que ce que l'on n'a pas réussi à faire avec l'accord de Kyoto ?

Les émissions de CO₂ 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 CO₂ dans l'atmosphère continuerait de croître. Cette concentration était de 280 ppmv en 1880. Elle est aujourd'hui de 390 ppmv 130 ans plus tard, soit une augmentation de 36%. Depuis 2009, cette concentration augmente d'environ 2 ppmv par année.

Un scénario plus réaliste serait que nous parvenions à plafonner nos émissions de GES vers 2050, disons, et qu'ensuite on les réduise progressivement jusqu'en 2200... quand il ne restera pratiquement plus de pétrole à envoyer en l'air de toute façon !



Le graphique ci-contre⁽¹⁾ illustre le délai incompréhensible qui s'écoule entre un maximum d'émission CO₂ (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. La "réponse" de l'océan au forçage thermique prend des

siècles, et la réponse des calottes glaciaires des pôles prend des millénaires.

Si le maximum des émissions de CO₂ 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 CO₂ se stabilise et donc de la date et du niveau du maximum des émissions.

Voici une analogie qui aidera peut-être à mieux comprendre : un arbre tombe à une centaine de mètres devant un autobus roulant à 100 km/h. Si le conducteur lève le pied de l'accélérateur pour réduire sa vitesse, c'est bien, mais ce sera sans doute insuffisant pour stopper le véhicule à temps et éviter de frapper l'arbre. S'il freinait après avoir levé le pied de l'accélérateur, ce serait mieux. Cela améliorerait sûrement ses chances d'éviter l'accident.

Morale de conduite automobile : même si c'est le conducteur qui est « coupable » d'avoir lancé l'autobus à 100 km/h, ce n'est pas coupant les gaz que le véhicule s'arrêtera aussitôt. Il doit faire plus : c'est-à-dire appliquer les freins.

Morale de conduite climatique : même si c'est l'Homme qui est « coupable » d'avoir élevé la température terrestre, ce n'est pas en coupant ses émissions de GES, que la température se stabilisera aussitôt. Il doit faire plus : c'est-à-dire réduire l'apport énergétique du Soleil. Nous verrons plus loin comment cela pourrait être possible.

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

On a vu au point 7 que la température T à la surface de la Terre (présentement de 15°C ou 288°K) pouvait se déduire du flux d'énergie Φ_T de 390 W/m^2 émis par sa surface, suivant l'expression :

$$T = \left(\frac{\Phi_T}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (\text{Éq.17})$$

où $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$. Et on a vu que ce flux Φ_T dépend en premier lieu du flux solaire incident Φ_S , de l'albédo α de la Terre et du forçage radiatif ρ dû à l'effet de serre des gaz de l'atmosphère. Ce flux Φ_T peut aussi dépendre du taux de blocage β du flux solaire incident Φ_S . Ce blocage pourrait se faire par des « gaz à effet parasol » (des GEP!) ou par des satellites-parasols. On peut résumer le tout par l'équation suivante :

$$\Phi_T = \frac{1}{4}\Phi_S(1 - \beta)(1 - \alpha)(1 + \rho). \quad (\text{Éq.18})$$

Cette Éq.18 est importante parce qu'elle nous montre explicitement les trois paramètres (α , β et ρ) sur lesquels on peut jouer pour modifier la température de la Terre. Elle nous indique en quelque sorte les possibilités que nous avons de contrôler cette température. Présentement, $\alpha = 0,313$, $\rho = 0,660$ et $\beta = 0$. (Le coefficient « $\frac{1}{4}$ » devant Φ_S est un facteur géométrique qui exprime le fait que le flux solaire incident, intercepté par la section πR^2 de la Terre, est en moyenne quatre fois plus faible, une fois réparti sur toute la surface sphérique $4\pi R^2$.)

Il est clair qu'en faisant porter tous nos efforts (physiques et économiques) sur la seule réduction des GES (et donc sur le seul paramètre ρ), nous nous illusionnons grandement sur les effets escomptés. Qui dit réduction, ne dit pas cessation. Or le forçage radiatif dépend directement de la quantité de GES dans l'atmosphère (du CO_2 surtout). Et on sait que le CO_2 déjà émis restera dans l'atmosphère encore un siècle. Si on en ajoute d'autre entre temps, même à plus faible dose que précédemment, le forçage radiatif ρ continuera de croître quand même, ce qui — on le voit dans nos deux équations — augmentera Φ_T qui, lui-même, augmentera T . Tout au plus allons-nous étaler l'inévitable augmentation de température sur 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 garder constant ce flux d'énergie Φ_T de 390 W/m^2 présentement émis par le sol. Et pour le garder constant, il faut que $\Delta\Phi_T = 0$ ou plus explicitement à partir de l'Éq.18 que :

$$\frac{\Delta\rho}{(1 + \rho)} - \frac{\Delta\alpha}{(1 - \alpha)} - \frac{\Delta\beta}{(1 - \beta)} = 0. \quad (\text{Éq.19})$$

Puisque nous ne pourrions pas empêcher semble-t-il d'ici la fin du siècle une augmentation absolue du forçage radiatif $\Delta\rho$ de $0,032$ ou une augmentation relative $\Delta\rho/(1 + \rho)$ d'au moins $1,9\%$, il ne nous reste plus qu'à regarder si nous pouvons agir sur les deux autres paramètres α et β .

Les deux pistes de recherches envisagées sont donc :

- (1) celles qui visent à augmenter l'albédo α de la Terre et
- (2) celles qui visent à bloquer une fraction β du flux solaire entrant dans l'atmosphère.

13. Opération Albédo

Suivant la première piste de recherches (appelons-la *Opération Albédo*), on entend profiter du fait que l'atmosphère est en grande partie transparente à la lumière visible, pour renvoyer dans l'espace le plus d'énergie possible dans cette partie du spectre. Pour contrer l'augmentation de 1,9% du forçage radiatif relatif $\Delta\rho/(1 + \rho)$ par cette seule opération, il faudrait donc augmenter l'albédo α de la Terre de 1,3% en le faisant passer de 31,3% (sa valeur actuelle) à 32,6 % environ. On pourrait peut-être y arriver en blanchissant ou en rendant réfléchissantes certaines surfaces. Comment ? Voici quelques idées :

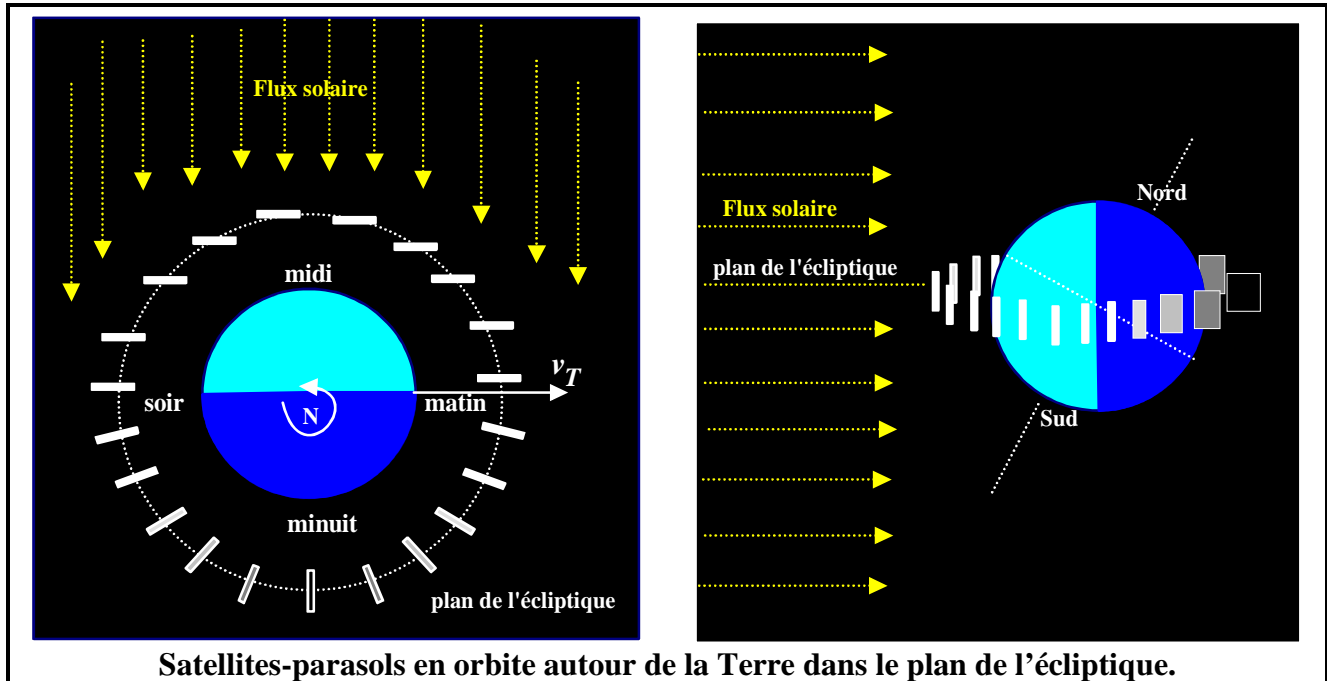
- Répandre sur les océans — idéalement sous les tropiques pour maximiser le taux de réflexion par m^2 — ou sur les calottes glaciaires une substance blanche ou miroitante (flocons de polystyrène, silice vitrifiée, etc.).
Pour augmenter l'albédo de 1,3%, il faudrait couvrir ainsi une surface égale à au moins 4% de la surface terrestre, soit $2,2 \times 10^{13} m^2$. Ce qui représente tout de même environ 12% de la surface de l'océan Pacifique...
- 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.
Même remarque qu'au point précédent.
- Dégager dans l'atmosphère des aérosols opaques dans le visible mais transparents dans l'infrarouge.
Il faudrait probablement que ce soit des aérosols monoatomiques puisque la plupart des molécules absorbent dans l'infrarouge étant donné que l'énergie de liaison intermoléculaire est de l'ordre du dixième d'électrons-volts, ce qui correspond à l'énergie des photons infrarouges ayant des longueurs d'onde autour de 10 μm .
- Augmenter la nébulosité.
Les nuages sont déjà responsables des deux tiers de l'albédo. Il suffirait donc d'augmenter la nébulosité d'environ 6% pour augmenter l'albédo de 1,3%. La vapeur d'eau bloque déjà presque 100% de la bande infrarouge supérieure à 20 μm . En rajouter n'en bloquera pas beaucoup plus tout en augmentant l'albédo. Pour le moment, l'effet net des nuages, à savoir s'ils apportent un forçage radiatif positif ou négatif n'est pas clairement établi par le GIEC.

Il faudra bien sûr, pour chaque idée, explorer, analyser, faire des simulations numériques, expérimenter à petites échelles, prévoir les impacts sur les écosystèmes, etc. puis évaluer le rapport coût/bénéfice de chacune (le bénéfice étant déterminé ici par l'augmentation relative espérée $\Delta\alpha/(1-\alpha)$ de l'albédo).

14. Opération Parasol

Suivant la deuxième piste de recherches (qui pourrait s'appeler *Opération Parasol*), on vise à bloquer une partie β du flux d'énergie Φ_S que reçoit la Terre. Pour contrer l'augmentation de 1,9% du forçage radiatif relatif $\Delta\rho/(1 + \rho)$ par cette seule opération, il faudrait bloquer 1,9% du flux solaire incident. Comment ? Voici au moins deux idées à explorer :

- Placer en orbite autour de la Terre des satellites-parasols (tel qu'illustré ci-dessous).

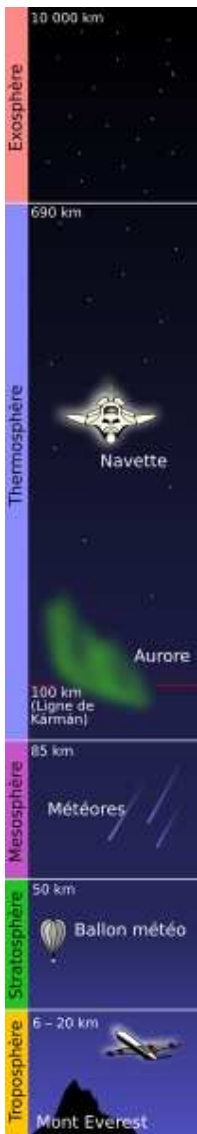


Chaque parasol serait fait d'une mince couche de mylar supporté par une armature légère et pourrait couvrir chacun plusieurs km^2 . Pour les fins de l'illustration, le rayon de l'orbite a été exagéré puisque ces parasols devraient normalement orbiter dans le plan de l'écliptique juste au-dessus de l'atmosphère dont l'épaisseur correspond à moins de 3% du rayon terrestre R . (Sur la figure, le rayon de l'orbite est environ égal à $2R$ alors qu'il devrait plutôt être égal à $1,03R$.)

Il faut faire un compromis ici entre (a) une orbite la plus basse possible pour que la circonférence de cette orbite soit la plus courte possible et minimiser ainsi le nombre de parasols, et (b) une orbite assez haute au-dessus de l'atmosphère pour éviter que ces parasols soient freinés par les quelques molécules qui s'y trouvent encore et rentrent trop tôt dans l'atmosphère où ils se désintègreraient.

Ces parasols devraient être orientables. Du côté diurne, leur plan resterait perpendiculaire aux rayons solaires pour maximiser le blocage de la lumière. En passant du côté nocturne, leur plan s'enlignerait *presque* radialement par rapport à la Terre de façon à minimiser les probabilités d'impact avec les météorites.

Comme nos parasols sont plongés dans le champ magnétique terrestre, ils suffit de faire circuler un courant électrique dans une boucle conductrice en pourtour pour les orienter à volonté. L'orientation des parasols la nuit ne serait pas parfaitement radiale par rapport à la Terre. La Terre se déplace autour du Soleil à une vitesse orbitale moyenne v_T de 29,7 km/s. Les météorites en orbites autour du Soleil ont des vitesses pouvant atteindre 42,4 km/s quand elles croisent l'orbite terrestre; celles venant de l'extérieur du système solaire ont des vitesses encore plus grandes. Compte tenu de ces vitesses et celle de la Terre, les météorites ne frappent pas la Terre suivant une direction moyenne parfaitement radiale par rapport à la Terre. Cette orientation s'obtient par la différence vectorielle entre la vitesse moyenne des météorites et celle de la Terre.



Même si les parasols sont très minces et couvrent une grande surface A , la pression de radiation du flux solaire Φ_S sur ces parasols exercerait une force $F = \Phi_S A / c$ négligeable (moins d'un cent millièmes de leur poids).

Mais oui ! Même si on dit qu'en orbite les objets sont en « apesanteur », ces objets sont toujours attirés par la Terre et ont donc un poids. Mais à cause de leur vitesse, l'attraction gravitationnelle les fait « tomber » continuellement à côté de la Terre. Et à force de tomber, ils finissent par en faire le tour.

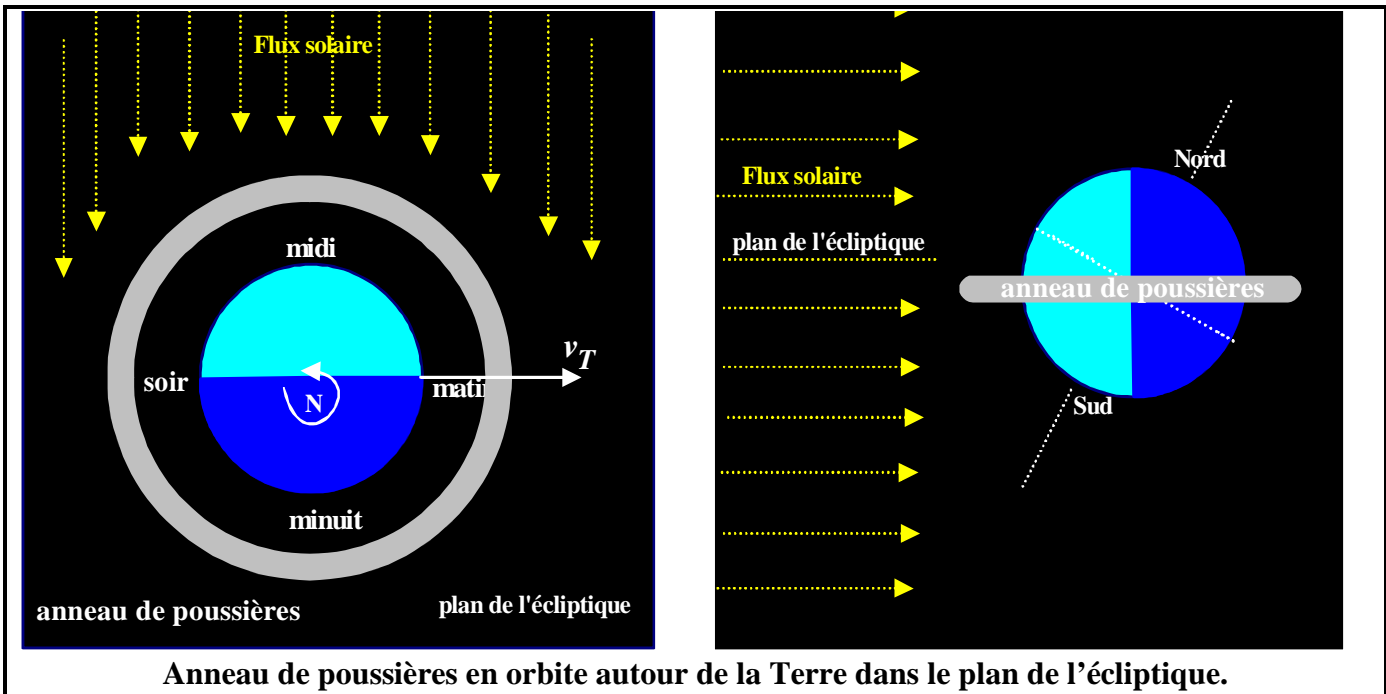
On peut fabriquer du mylar ayant une épaisseur de $10 \mu\text{m}$ très opaque au rayonnement. Mais si on pouvait réduire l'épaisseur d'une feuille à $1 \mu\text{m}$, elle serait encore assez épaisse pour bloquer la lumière visible et assez mince pour être transparente à l'infrarouge ($1 \mu\text{m}$ correspond à environ 2 fois la longueur d'onde moyenne de la lumière visible). Une tonne de mylar a un volume d'environ 1 m^3 . À $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur, cela couvrirait une surface de 10^6 m^2 . Il faudrait en mettre environ 2,5 millions de tonnes en orbite autour de la Terre dans la thermosphère (voir les niveaux atmosphériques dans le schéma ci-contre) à environ 200 km d'altitude pour couvrir 1,9% de la section terrestre (égale à $1,27 \times 10^{14} \text{ m}^2$) et un autre 2,5 millions de tonnes pour tenir compte du fait que ces parasols circuleront la moitié du temps dans la partie nocturne.

Pour élever une masse m de 5 millions de tonnes à 200 km de hauteur et lui impartir une vitesse v de $7,40 \text{ km/s}^{(*)}$, il faut $1,5 \times 10^{17}$ joules d'énergie ($E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$). La friction de l'air rencontrée dans les couches inférieures de l'atmosphère a été négligée ici.

(*) La vitesse orbitale à 200 km d'altitude est $7,85 \text{ km/s}$. La vitesse d'un point près de l'équateur étant de $0,45 \text{ km/s}$, si on lance un satellite vers l'Est, il suffit d'ajouter $7,40 \text{ km/s}$ à la vitesse équatoriale pour atteindre la vitesse orbitale.

À 10¢ le $\text{kW}\cdot\text{h}$, ça coûterait 5 G\$ en énergie et environ 5 G\$ pour le mylar à $1\text{\$/kg}$. (1 G\$ = un gigadollar ou un milliard de \$.) Nous ne tenons pas compte ici des coûts en main d'œuvre et en équipement pour mettre ces satellites-parasols en orbite. Multiplions ces coûts par 100 pour avoir une idée du coût total de l'opération : il tournerait alors autour d'un T\$. (1 T\$ = un téradollar ou mille milliards de \$. Le PNB du Canada était d'environ 1 T\$ en 2005.) Une telle opération s'étalerait sur plusieurs décennies. Sur 50 ans, mettons, ça représenterait quelques dizaines de milliards de \$ par année. Quand on compare aux coûts du réchauffement climatique que l'économiste Nicholas Stern estimait récemment à 7 T\$ pour les prochaines décennies et aux centaines de G\$ qu'on s'appête à dépenser chaque année pour réduire les émissions de GES sans même espérer empêcher d'aucune façon la température d'augmenter de 2 à 4 °C d'ici la fin du siècle, alors dépenser un T\$ pour vraiment climatiser la Terre serait encore une bonne affaire.

- Autre version de l'Opération Parasol : placer en orbite autour de la Terre un anneau de poussières.



Cette version de l'Opération Parasol applique le même principe que la version précédente mais avec un anneau de poussières en orbite dans le plan de l'écliptique au lieu de milliers de satellites-parasols. Le rayon de l'anneau a été exagéré ici aussi pour les fins de l'illustration. Il devrait être environ 1,03 fois le rayon terrestre, soit environ 200 km d'altitude pour se situer dans la thermosphère. La nature de la poussière est à déterminer en fonction de son prix et de sa capacité de bloquer la lumière visible par unité de masse. Il en faudrait au moins une dizaine de millions de tonnes. Mais comme le prix de cette poussière devrait être inférieur à celui du mylar, cette solution pourrait être plus économique que la précédente. Par contre, advenant le cas où nous voudrions recevoir un flux de lumière supérieur, cette méthode ne permettrait pas de moduler l'entrée de la lumière comme on pourrait le faire avec des satellites-parasols orientables. Il faudrait alors passer le satellite-aspirateur pour nettoyer tout ça...

Post scriptum

15. Simples lubies ?

J'ai donné cette causerie une quinzaine de fois depuis 2007. Les gens présents dans la salle semblaient souvent consternés de voir que la réduction des émissions de GES seraient incapables à stopper le réchauffement climatique. Mais arrivés aux sections 13 et 14 portant sur les Opérations Albédo et Parasol, ceux-ci reprenaient espoir en voyant qu'il y avait peut-être des solutions. En même temps cependant, ils me regardaient d'un drôle d'air devant le caractère extravagant de ces solutions. Simples lubies d'un esprit surchauffé, pensaient-ils probablement.

On comprendra mon ravissement en septembre 2009 (ainsi que mon soulagement de voir que je n'étais peut-être pas aussi cinglé qu'on l'aurait cru !), quand je suis tombé sur ce communiqué de l'Agence France-Presse annonçant que la prestigieuse Royal Society⁽¹²⁾ recommandait l'étude de solutions alternatives au réchauffement climatique comme celles que je proposais depuis 2007.

AFP, mercredi 2 sep 2009

LONDRES (AFP) - "Refroidir la planète" grâce à des procédés dignes de films de science-fiction: la démarche pourrait bien devenir le dernier recours si la lutte contre le réchauffement climatique échoue, mais elle est incertaine, et risquée.

Présentée mardi à Londres par la prestigieuse Royal Society, une étude sur la "géo-ingénierie" sonne comme une mise en garde à trois mois de la conférence de Copenhague, où tous les pays de la planète tenteront de trouver un accord pour enrayer la hausse du thermomètre

Longtemps considérés comme de simples lubies, ces projets, souvent extravagants, reçoivent une attention de plus en plus marquée.

"C'est une vérité désagréable à entendre mais (...) la géo-ingénierie et ses conséquences sont le prix que nous pourrions avoir à payer pour notre incapacité à agir sur le changement climatique", a expliqué le professeur John Shepherd, de l'université de Southampton, qui a présidé un panel de 12 scientifiques.

Intitulé "Géo-ingénierie du climat: science, gouvernance et incertitude", le rapport de 81 pages passe en revue une série de projets, distinguant deux grandes catégories: ceux qui visent à "réguler" la chaleur venue du soleil et ceux qui visent à réduire le taux de CO2 dans l'atmosphère.

Idées avancées : placer de gigantesques miroirs dans le ciel qui permettraient de renvoyer vers l'espace une partie du rayonnement solaire, couvrir d'immenses étendues désertiques avec un film réfléchissant, ou encore créer des nuages au-dessus des océans grâce à d'immenses pulvérisateurs installés sur des navires qui sillonneraient le globe.

16. Période de questions

À la fin de chaque causerie, il y a habituellement une période de questions. Voici quelques unes de celles qui m'ont été posées suite à la présentation chez les Sceptiques du Québec en février 2008.

Question : *Pourquoi le GIEC n'aborde-t-il pas les solutions proposées d'augmenter l'albédo de la Terre ou de bloquer le flux solaire incident ?*

Parce qu'il considère que ce n'est pas dans son mandat. Le GIEC (Groupe international d'experts sur le climat) a été formé par l'ONU en 1988 pour étudier l'évolution du climat, d'en prévoir les conséquences et de formuler éventuellement des recommandations pour en atténuer les impacts. Il est composé d'experts de différents pays qui jouent un rôle autant scientifique que politique. Il n'a ni le mandat ni les moyens financiers de commander des études pour trouver des solutions technologiques qui impliqueraient des investissements massifs en R&D (comme étudier la faisabilité de placer des millions de satellites-parasols pour atténuer le flux solaire). Seules la NASA ou l'ESA auraient les moyens scientifiques, techniques et financiers pour envisager de telles études et de tels projets. D'où le malentendu qu'entretiennent les médias à l'effet que les recommandations du GIEC sont les seules « solutions » au réchauffement climatique. Il est plus facile d'ailleurs pour les médias ou les groupes écologistes de faire appel aux sentiments de peur ou de culpabilité en tenant un discours catastrophiste ou moralisateur pour exhorter la population à arrêter de consommer ou d'émettre des GES que de faire appel à son intelligence en présentant froidement des solutions technologiques. Ceci dit, les études du GIEC ont quand même une certaine valeur scientifique mais les conclusions et les recommandations qu'on en tire sont largement influencées par les intérêts politiques. On a pu voir d'ailleurs le lien politique l'an dernier avec l'attribution du prix Nobel de la Paix au GIEC et à Al Gore. Le Nobel de la Paix est avant tout un prix politique. Rien à voir avec le Nobel de Physique. L'attribution de ce prix à Al Gore semblait davantage motivée par le désir d'envoyer une petite flèche à George Bush pour son refus de ratifier le protocole de Kyoto que pour souligner un apport exceptionnel à la Paix ou à la Science. Ce faisant, on discréditait du même coup ceux qui jetaient un regard critique sur les solutions proposées par le GIEC qui se voyaient dès lors élevées au rang de dogmes, ouvrant ainsi la voie à un débat manichéen entre les bons pro-Kyoto et les méchants anti-Kyoto. Tout ça est très décevant sur le plan scientifique. Mais c'est décevant surtout pour l'avenir de la Planète. Quand dans 50 ou 100 ans, on constatera l'échec de ces « solutions », nos descendants nous trouveront bien stupides de ne pas avoir pensé à un plan B.

Question : *Comment réagir aux effets directs du réchauffement climatique ?*

Si le réchauffement climatique est inévitable, il faudrait en priorité, comme le soutient le géophysicien Claude Allègre, trouver des solutions aux conséquences les plus dommageables. Ces conséquences sont mentionnées d'ailleurs dans certaines études du GIEC : sécheresses ou pluies trop abondantes, fonte des glaciers et augmentation du niveau des mers, etc. Le réchauffement ajoute de l'énergie au système climatique, augmentant de ce fait la fréquence et l'intensité de certains phénomènes. Mais tout n'est pas noir. Il peut y avoir également des effets bénéfiques comme l'ouverture du passage du Nord-Ouest, des récoltes plus abondantes, etc.

Question : *Que pensez-vous du protocole de Kyoto ?*

On a vu tout à l'heure, que la réduction des émissions de GES préconisée par le protocole de Kyoto n'empêchera pas la température d'augmenter d'au moins 2 °C d'ici la fin du siècle. Mais en plus, il y a une certaine hypocrisie autour de ce protocole. Par exemple, on critique vertement les États-Unis de ne pas l'avoir entériné. Par contre, ils ont un meilleur dossier au chapitre de la réduction des GES que le Canada qui l'a pourtant signé. Précisons aussi que les pays en émergence (tels la Chine et l'Inde) ne sont

pas liés par cette entente, même s'ils émettent près de la moitié des GES de la planète. C'est un autre aspect qui me fait douter de sa réussite.

Les efforts pour tenter de réduire les émissions de GES sont parfois contre-productifs. Par exemple, pourquoi produire un moteur à combustion plus performant, donc générant moins de GES ? L'accroissement de la population et l'augmentation du niveau de vie du tiers monde annuleront rapidement les bénéfices escomptés. Selon certaines études en Europe, plus les voitures sont économes, plus les gens roulent ! En bout de ligne, on émet probablement autant de GES qu'avec des voitures plus voraces.

Si on était vraiment sérieux avec la réduction des émissions de GES, on interdirait carrément l'extraction du pétrole, du moins jusqu'à ce qu'on ait développé des techniques efficaces de captage du carbone. Puisqu'une fois sorti de terre, tout ce pétrole n'est-il pas destiné à se retrouver dans l'atmosphère sous forme de GES ?

Question : *Certains cycles astronomiques, en partie liés à l'activité solaire, pourraient-ils influencer sur la température présente ? (Il y a quinze mille ans, le Québec n'était-il pas couvert d'un glacier de 2 km d'épaisseur ?)*

La constante solaire a légèrement augmenté depuis cent ans. On parle d'une augmentation de moins d'un watt par mètres carrés seulement comparée à la valeur actuelle de 1368 W/m^2 . Une partie des $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ d'augmentation de température observée depuis un siècle pourrait effectivement lui être attribuable.

Question : *L'hydroélectricité qui réchauffe nos maisons l'hiver contribue-t-elle au réchauffement planétaire ?*

Oui, sans doute, mais très peu. Elle est incluse dans la chaleur sensible de 24 W/m^2 provenant de différentes sources (feu, chaufferette, combustion, décomposition, etc.) qui s'ajoute aux quelque 390 W/m^2 du rayonnement infrarouge provenant de la Terre. Mais c'est vraiment l'apport énergétique du flux solaire qui est le principal facteur.

Question : *Peut-on ensemercer les nuages pour augmenter l'albédo de la Terre, et quel serait l'effet net sur le réchauffement ?*

Les nuages jouent un double rôle : ils reflètent une partie la lumière incidente et contribuent ainsi à l'albédo de la Terre ; ils absorbent aussi une grande partie des rayons infrarouges émis par la Terre. Il faut tenir compte de ces deux effets opposés. Par contre, quand on ensemece des nuages, on ne fait que condenser la vapeur d'eau déjà présente dans l'atmosphère. On augmente ainsi l'albédo de la Terre sans augmenter l'absorption dans l'infrarouge. Mais l'effet net n'est pas facile à mesurer. Présentement, on ne le connaît pas précisément.

Question : *Ne peut-on craindre un effet d'emballlement du réchauffement à un seuil critique prochain de 400 ppmv de concentration de CO_2 dans l'atmosphère ? La température des océans serait alors suffisante (augmentation de $5 \text{ }^\circ\text{C}$) pour sublimer le méthane (un puissant GES) qui se trouve au fond des océans (et du pergélisol) directement dans l'atmosphère. Cela ferait monter la température de l'atmosphère rapidement d'un autre $5 \text{ }^\circ\text{C}$. La plus grande extinction qu'a connue la Terre il y a 250 millions d'années serait due à ce phénomène.*

J'ai un doute sur ce seuil critique de 400 ppmv en concentration de CO_2 . Au moment où on se parle, cette concentration est de 386 ppmv et elle augmente de 2 ppmv par année. La catastrophe appréhendée

serait donc dans 7 ans ! Ça me semble vite ! En 7 ans, la température des océans n'aura sûrement pas augmenté de 5 °C. Même dans les scénarios les plus pessimistes, on ne s'attend pas à ce que la température atmosphérique augmente de 5 °C avant au moins 100 ans. De plus, comme les océans ont une grande capacité thermique, il faudra bien plus longtemps encore avant que leur température suive celle de l'atmosphère. Bref, les chiffres ne tiennent pas. Mais si c'était le cas, raison de plus pour ne pas perdre de temps avec la réduction des GES pour contrôler la température terrestre. Il faudrait dès maintenant considérer d'autres approches plus prometteuses et surtout plus rapides !

Question : Économiquement, les solutions qui auront les meilleurs coûts/bénéfices s'imposeront d'elles-mêmes. Selon le rapport Stern, note un auditeur, deux solutions seraient viables : 1) si on ne fait rien, dans cent ans nos descendants seront quatre fois plus riches que nous ; 2) si on réduit nos GES, ces mêmes descendants seront cinq fois plus riches que nous. Étant donné que nous sommes les plus pauvres, on ne devrait pas dépenser autant d'argent maintenant pour rendre nos descendants plus riches. De la même manière, nous sommes aujourd'hui dix fois plus riches que nos ancêtres d'il y a deux cents ans. Les mesures d'adaptation seront-elles moins difficiles pour nos descendants que celles qui nous demandent de réduire notre croissance d'un demi pour cent par année ? Cette décroissance est cumulative et se solderait par une diminution nette de 65 % du PIB dans un siècle par rapport à aujourd'hui. Avez-vous des commentaires sur l'adaptation progressive aux conditions climatiques du futur ?

Je me méfie des projections économiques, surtout celles qui s'étalent sur un siècle ou deux. Il y a tellement d'impondérables qui faussent des projections même sur une plus courte période, tels les taux d'intérêt, les famines, les crises économiques, les guerres, etc., alors sur une période beaucoup plus longue... Il ne me semble pas prudent de s'appuyer sur ce genre de projections pour prendre des décisions importantes sur l'avenir de l'humanité. Les projections climatiques du GIEC s'appuient sur des modèles physiques un peu plus fiables mais eux aussi dépendent de différents scénarios hypothétiques touchant la consommation ou la pollution.

Question : Même si une réduction des émissions de gaz à effet de serre ne résolvait pas le problème présent d'une hausse de température durant le prochain siècle, ne devrait-on pas profiter du mot d'ordre lancé pour tenter de réduire la pollution atmosphérique et protéger l'environnement ? Il faut au moins l'apparence d'une urgence pour convaincre la population de consacrer beaucoup d'argent à quoi que ce soit (pensons aux mille milliards \$ pour les satellites-parasols).

Mais si les solutions proposées ne sont pas crédibles, on risque de produire l'effet contraire et développer une aversion au discours écologique. C'est peut-être déjà commencé d'ailleurs. Mieux vaut, selon moi, convaincre la population et les décideurs en comparant les avantages d'investir aux inconvénients de ne pas investir. L'économiste Stern estime que l'augmentation de quelques degrés de la température coûterait à l'humanité environ 7 000 milliards \$ pour les pays industrialisés dans les prochains 20 ans. Si c'est avéré, il devrait être plus facile de convaincre les gouvernements d'investir 1 \$ si on évite d'en perdre 7 \$. D'autre part, il faut être précis et ne pas confondre les solutions visant à contrôler la température terrestre avec celles pour contrer la pollution ou la protection de l'environnement. Ces questions ne sont pas de même nature et ne font pas nécessairement appel aux mêmes solutions. Mon exposé portait sur le contrôle de la température terrestre. L'idée que je voulais faire ressortir dans ce cas, était justement qu'on arrête de duper la population avec de fausses solutions et qu'on commence à envisager sérieusement d'autres avenues plus prometteuses. « On peut duper les gens, disait Richard Feynman, mais on ne peut duper la Nature. »

Sources bibliographiques

- (1) GIEC, *Climate Change, the Scientific Basis*, 2001.
(Le GIEC est un Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat travaillant sous l'égide de l'ONU. Le sigle anglais est IPCC pour International Panel on Climate Change.)
- (2) Berger A., *Intervention au Symposium du Collège de France*, 2004
- (3) Berner, *Science*, 1997
- (4) Petit M. & al., *Nature*, juin 1999
- (5) Goddard Institute for Space Studies / NASA, *Report*, avril 2005
- (6) Sadourny R., *Le climat de la Terre*, Éd. Flammarion
- (7) Jancovici J.-M., *L'avenir climatique*, Éd. du Seuil, mars 2002, site : www.manicore.com
Les sections 2, 3, 8, 9 et 11 de cette causerie sont tirées principalement du site www.manicore.com où Jean-Marc Jancovici y présente une excellente vulgarisation des documents du GIEC concernant le réchauffement climatique.
- (8) Wikipedia, *forçage radiatif*
- (9) Myhre G. & al., *New Estimate of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases*, *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 14, pp. 2715-2718, juillet 1998
- (10) GIEC, *Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le deuxième rapport d'évaluation du GIEC*, février 1997
- (11) Allègre Claude, *Express*, jeudi 5 octobre 2006
- (12) Royal Society, *Geoengineering the climate : science, governance and uncertainty*, septembre 2009