

SOMMAIRE

Prologue

PREMIÈRE PARTIE – Planète en danger

Chapitre premier – La plus belle des planètes : la nôtre

Chapitre II – La plus grande des extinctions de masse

Chapitre III – Et nous ?

Chapitre IV – Le glaçon dans le verre d'eau

Chapitre V – Le méthane entre en scène

Chapitre VI – Histoires d'eau

Chapitre VII – Chaud devant !

Chapitre VIII – Big bang ou petits boums ?

Chapitre IX – Niveau variable

Chapitre X – Terribles conséquences

SECONDE PARTIE – Des espoirs ?

Chapitre XI – Transports terrestres

Chapitre XII – Le défi énergétique : quelle énergie pour demain ?

Chapitre XIII – Les tours aérogénératrices

Chapitre XIV – Autres voies, autres actions

En guise de conclusion...

Annexe 1 – Tableaux & graphiques

Annexe 2 – Bibliographie rapide

Annexe 3 – Une sélection d'ouvrages disponibles à la Bibliothèque Nationale de France

Annexe 4 – Sites Internet

Annexe 5 – Lexique des principaux sigles et termes scientifiques utilisés dans l'ouvrage

CHAPITRE PREMIER

La plus belle des planètes : la nôtre

Nous n'avons qu'une seule Terre.

Vue du ciel

Quand les premiers astronautes ont pu contempler notre Terre vue du ciel, ils ont été frappés par la beauté de l'astre bleu qu'ils survolaient. Cette émotion a été celle de tous leurs successeurs sans exception, et en particulier quand les explorateurs des missions Apollo, en route vers la Lune, ont vu le berceau de l'humanité s'éloigner d'eux.

Rappelons quelques dates :

Le 12 avril 1961, si loin déjà dans le passé, le cosmonaute soviétique – russe, dirions-nous de nos jours – Youri Gagarine était le premier homme à être satellisé autour de notre vieille planète. Le jeune

Russe avait naturellement un très dense programme de travail, mais, à la vue de la Terre qui défilait sous lui, il ne put s'empêcher de glisser avec émerveillement cette naïve exclamation : « Que c'est joli, que c'est beau !... »

Après Gagarine, des centaines de cosmonautes ont fait part de la même impression, particulièrement quand les astronautes d'*Apollo 8* ont fait le tour de la Lune à Noël 1968, s'éloignant ainsi de plusieurs centaines de milliers de kilomètres du berceau de l'humanité, puis quand Neil Armstrong et Edwin Aldrin se sont trouvés être les premiers hommes à poser le pied sur notre satellite naturel, au matin du 20 juillet 1969.

Belle, notre planète ne l'est pas seulement vue de l'espace, néanmoins c'est de « là-haut » que l'homme a pu le mieux prendre conscience de sa beauté, mais aussi de sa fragilité et de son caractère unique. *Nous n'avons qu'une seule Terre.*

Cette Terre, nous la partageons avec toutes les autres formes de vie, ni plus ni moins.

Ainsi l'écrivain canadien Claude Lafleur a pu écrire : « Notre présence humaine passe presque inaperçue [de l'espace]. Nous qui nous croyons si importants sur cette planète, voilà qu'il faut être très attentif pour repérer nos constructions... Il faut vraiment chercher le moindre signe de civilisation

pour découvrir notre présence. Une (...) belle leçon d'humilité... »¹

Et l'astronaute français Philippe Perrin, après son retour d'une mission effectuée à bord de la station spatiale internationale en juin 2002, a déclaré lors d'un interview : « *J'ai été surpris par la beauté de la Terre. C'est difficile à décrire, ce qui m'a le plus frappé alors, c'est la fragilité de cette Terre. Quand on la voit, elle est belle et fragile à la fois* ».

« Équilibre »

Ce qui est probablement le plus fragile en ce qui concerne la Terre, et les hommes n'en ont pas toujours conscience, c'est son *équilibre*. Les écosystèmes terrestres ne perdurent que grâce au maintien de certains équilibres, eux même liés à divers cycles naturels : le cycle de l'eau, celui du carbone, etc. Mais le premier des équilibres est celui qui égalise normalement l'énergie reçue et l'énergie évacuée par la surface terrestre, conditionnant ainsi la température moyenne de notre planète.

Au niveau de l'équilibre thermique, la Terre rece-

¹ Claude Lafleur est un écrivain et journaliste scientifique canadien spécialisé dans l'espace. Ses ouvrages sont disponibles à la Librairie Virtuelle :

<http://www3.sympatico.ca/claude-lafleur>

Voir aussi son site : www.cam.org/~lafleur/

vait ou produisait autant d'énergie qu'elle en émettait vers l'espace, du moins jusqu'à ce que les activités humaines changent la donne.

L'énergie reçue naturellement vient principalement du Soleil. La chaleur en provenance des profondeurs du globe est en effet environ dix mille fois moins importante que celle qui nous arrive de l'astre du jour, et celle qui provient du reste de l'univers est totalement négligeable.

L'énergie qui nous parvient du Soleil est essentiellement composée de rayonnement infrarouge (50 %), visible (40 %) et ultraviolet (10 %). Cette énergie équivaut en moyenne à 342 watts par mètre carré (soit 342 joules par seconde).

Environ 30 % de cette énergie est réfléchi vers l'espace et ne contribue donc pas à chauffer la Terre. L'albédo mesure ce taux de réflexion, variable de fait avec les zones : nuages, neiges, glaces, forêts, déserts, océans... *L'énergie solaire réellement disponible pour chauffer la Terre est donc limitée à 235 W/m².* Cependant seule une partie de cette énergie arrive réellement à la surface, soit 168 watts/m², le reste (67 W/m²) étant retenu au passage par l'atmosphère. À cela s'ajoute la part du rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère qui est réfléchi vers la Terre, soit 324 W/m². Au total, l'énergie dont bénéficie réellement la surface de la planète est donc égale à 168

+ 324 watts/m² et s'élève en moyenne à *492 watts par mètre carré*, soit l'équivalent du tiers de la chaleur générée par un fer électrique pour chaque mètre de la surface terrestre.

Il est évidemment tenu compte dans ces données du fait que seule la partie de la Terre tournée vers le soleil reçoit de l'énergie de celui-ci et que la surface d'interception de ce rayonnement (l'équivalent de la surface d'un cercle de diamètre égal à celui de notre globe) est égale au quart de la surface d'une sphère de même diamètre.

À l'équilibre, la surface terrestre évacue normalement son énergie essentiellement par rayonnement infrarouge (390 W/m² pour une température moyenne de quinze degrés Celsius), par effet de refroidissement dû à l'évaporation (78 W/m²) et en cédant de la chaleur à l'atmosphère (24 W/m²). Soit au total, également *492 watts par mètre carré*.

L'effet de serre

L'effet de serre provient de l'écart entre l'énergie infrarouge qui est absorbée et celle qui est émise par la surface terrestre en fonction d'éléments comme l'albédo et les caractéristiques des éléments présents dans l'atmosphère.

Nous venons de voir que la surface de notre planète émet en moyenne 390 W/m² sous forme de

rayonnement infrarouge alors que l'énergie solaire absorbée et l'énergie infrarouge renvoyée vers l'espace sont en équilibre à 235 W/m^2 .

L'écart entre ces 235 W et les 390 W rayonnés en moyenne pour chaque mètre carré de surface, soit 155 W/m^2 , permet de mesurer l'importance de l'effet de serre.¹ Celui-ci s'établit normalement à trente-trois degrés Celsius (33°C).

Pour aller un peu plus loin :

Il est permis de critiquer la formulation selon laquelle la Terre émet 390 watts/m^2 , cette valeur étant celle du rayonnement d'un « corps noir » à 288 K , soit 15°C (quinze degrés Celsius).

En fait, le profil d'émission de la Terre ne ressemble que partiellement à celui d'un corps noir de référence (il existe d'importantes variations locales d'albédo et d'émission en fonction de la nature de la surface terrestre et de la couverture nuageuse), mais le calcul n'en reste pas moins globalement valable.

¹ Nous avons repris ici les résultats des calculs présentés par Marie-Antoinette Mélières dans son article *Température moyenne à la surface de la Terre et effet de serre*, Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (LGGE), CNRS, avril 2002.

Un certain effet de serre est non seulement chose naturelle, mais il est nécessaire à la vie : Sans lui, la température moyenne du globe resterait très en dessous du point de congélation – -18°C en moyenne au lieu de $+15^{\circ}$ – et la Terre revêtirait l'aspect mortel d'une gigantesque boule de neige.

C'est d'ailleurs ce qui semble s'être produit au moins à deux reprises dans un très lointain passé, au précambrien, à une époque où l'énergie rayonnée par le Soleil était un peu plus faible que de nos jours : le taux de gaz carbonique¹ atmosphérique était alors tombé trop bas pour compenser cette faiblesse et la température avait partout chuté au dessous de zéro. Une chape de neige et de glace avait recouvert notre planète jusqu'à ce que l'accumulation des gaz à effet de serre émis par les volcans fasse reculer les glaces. La première fois voici environ 2,4 milliards d'années, la seconde fois entre 800 et 600 millions d'années.² Les caractéristiques du rayonnement solaire ont très certainement joué un rôle important dans ces épisodes, beaucoup moins par la suite. Ce rayonnement était en effet plus faible que maintenant d'environ 20 % aux tout débuts de l'histoire de la Terre et ce

¹ Gaz carbonique = dioxyde de carbone = CO_2 .

² D'après Gilles Ramstein et Philippe Ciais, in *Clefs CEA* n° 49, printemps 2004, page 81, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA-CNRS) – CEA centre de Saclay.

déficit était encore égal à 6 % voici 800 millions d'années.

D'autres éléments ont alors pu exercer également une influence dans les anciennes variations climatiques: les variations cycliques de l'excentricité de l'orbite terrestre et de son inclinaison, ou paramètres de Milankovitch¹, l'évolution de la répartition des masses continentales et des océans, les aérosols et poussières d'origine volcaniques, les fluctuations du taux de vapeur d'eau atmosphérique et les éventuels impacts météoritiques majeurs, certainement plus nombreux dans les premiers âges de la Terre. Mais la principale raison de ces épisodes glaciaires très anciens paraît bien tenir à la réduction de l'abondance du CO₂ et du méthane gazeux. Essentiellement sous l'influence des bactéries pour le premier épisode et sous celle de la végétation – algues unicellulaires et autres – pour le second en ce qui concerne le gaz carbonique.

Il est donc absolument souhaitable que l'atmo-

¹ cf. Alain Pelosato : *La Terre et son climat*, in *L'effet Vénus*, éd. Eons, collection Dossiers, novembre 2004, pages 44 et suivantes. Disponible sur <http://www.eons.fr>. L'influence des paramètres de Milankovitch apparaît avec une périodicité de 100 000 ans environ durant toute l'ère quaternaire, mais elle ne peut suffire à expliquer les événements climatiques les plus marqués.

sphère conserve une certaine proportion de dioxyde de carbone – idéalement entre 0,026 et 0,030 % – pour assurer une température moyenne compatible avec la vie, bien que le principal gaz à effet de serre soit normalement la vapeur d'eau et que l'importance du rôle du CO₂ soit parfois discutée. La teneur en gaz carbonique était effectivement égale à 0,028 % voici deux siècles, aux tout débuts de la première révolution industrielle, et n'avait jusqu'ici jamais dépassé 0,030 % pendant toute la durée de l'ère quaternaire.

La présence de ce gaz est également indispensable pour permettre aux plantes de se développer. Sans CO₂, pas de végétaux, pas d'écosystème complexe comme le nôtre.

Un équilibre menacé par les activités humaines

Le problème est qu'actuellement, avec 0,038 %, *la proportion de gaz carbonique est probablement plus élevée qu'elle ne l'a été depuis des dizaines de millions d'années* – au moins vingt millions d'années d'après le GIEC¹ – et qu'elle croît maintenant de plus de 0,5 % par an en raison des activités humaines. Les

¹ 0,037 % d'après le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), *Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques*, troisième rapport d'évaluation, 2001, page 6.

trois quarts de cette augmentation sont dus à l'utilisation de combustibles fossiles – charbon, pétrole, gaz naturel – et le dernier quart à la déforestation et à certaines pratiques culturelles. Ainsi les arbres ne recouvrent plus aujourd'hui que moins de vingt pour cent de la surface des continents terrestres. L'équilibre climatique de la Terre est donc de plus en plus fortement menacé par les activités humaines. Quant aux « puits de carbone » que sont les océans – dont l'inertie thermique contribue à donner l'illusion d'une dérive climatique encore acceptable – et la végétation, ils ne captent ensemble que la moitié des émissions anthropiques de CO₂.¹ De plus, cette proportion ne pourra que diminuer si, par exemple, les forêts tropicales continuent à disparaître au rythme actuel et si les océans poursuivent leur réchauffement.

Les mesures effectuées à l'observatoire du Mauna Loa montrent qu'en conséquence, le rythme de l'accroissement décennal de la concentration atmosphérique en CO₂ tend à s'accélérer depuis 1974. On est ainsi passé de 334 ppm (0,0334 %) cette année-là à 348 ppm en 1984 (+14) puis à 363 ppm en 1994 (+15) et enfin à 382 ppm en 2004 (+19).²

¹ D'après le 3^{ème} rapport d'évaluation (2001) du GIEC, op. cit. page 6.

² Source : CMDL CCGG Sampling Network, Mauna Loa,

De plus, *d'autres gaz provenant des activités humaines* ont une action non négligeable. Il s'agit essentiellement des *gaz fluorés*, des *oxydes nitreux* et surtout du *méthane*, dont la teneur atmosphérique a augmenté de plus de 150 % depuis les débuts de l'ère industrielle et qui est déjà responsable de 10 % environ de l'effet de serre total hors vapeur d'eau et de près de 20 % du renforcement actuel de ce même effet de serre.

Les premiers de ces gaz sont créés par l'industrie et ne constituent potentiellement un danger que depuis quelques dizaines d'années. Par contre, le dernier – le méthane – est essentiellement d'origine biologique et a déjà joué un rôle dans le passé de la Terre, particulièrement lors d'une meurtrière extinction de masse survenue voici deux cent cinquante deux millions d'années.

Pour aller un peu plus loin :

On trouve assez souvent une estimation « à la louche » selon laquelle le CO₂ serait responsable d'environ un tiers de l'effet de serre « normal » et la vapeur d'eau des deux autres tiers.

Autre estimation : H₂O : 60 % et CO₂ : 40 % de

l'effet de serre hors renforcement.

Il ne s'agit là bien évidemment que d'approximations.

En fait, *la vapeur d'eau n'est évidemment pas présente partout dans les mêmes proportions*. D'une part parce que la pression partielle de H₂O atmosphérique correspondant au taux de saturation (point de condensation) varie plus que proportionnellement à la hausse de la température. D'autre part parce que l'on est plus ou moins proche de ce point selon les régions du globe, de moins de 20 % au Sahara à 100 % en zone intertropicale pendant la saison des pluies.

Pour tout compliquer, *la vapeur d'eau n'est pas seulement un gaz à effet de serre mais exerce aussi un rôle régulateur des écarts entre températures diurnes et nocturnes*. La preuve en est l'extrême écart observé au Sahara, de +55°C le jour (à l'ombre, s'il y en a !) à -5°C la nuit, en raison du très faible taux d'humidité de l'atmosphère.

En ce qui concerne le CO₂, il est également permis de se poser quelques questions. Tout d'abord, ce gaz étant nettement plus lourd que l'air, les mesures de concentration atmosphérique que l'on nous cite sont-elles réellement valables ? En toute logique, le CO₂ devrait former une couche au niveau zéro, sur environ trois mètres d'épaisseur si les calculs de sa pres-

sion partielle sont exacts. On ne constate en fait rien de tel, et pour cause : *le taux de CO₂ est pratiquement le même, quelle que soit l'altitude à laquelle est réalisée la mesure.* Ainsi les mesures effectuées à l'observatoire du Mauna Kea à 4 000 m d'altitude confirment celles qui sont réalisées en plaine. De plus, l'observation par satellite permet de détecter les bandes d'émission-absorption du CO₂ (4,3 et 15 μm) à toutes les altitudes, y compris dans la haute stratosphère, au-dessus de trente mille mètres. Il y a donc brassage efficace des composants atmosphériques, (hormis l'hydrogène et l'hélium, vraiment trop légers et qui se sont depuis longtemps évanouis dans l'espace), quelle que soit leur densité. Ce brassage provient bien évidemment des courants ascendants et descendants et des turbulences atmosphériques de toute nature, dues aussi bien aux gradients de température et de pression qu'aux phénomènes météorologiques et à l'influence du relief

Quant à l'effet de serre exercé par le CO₂, il serait puéril de tenter de le vérifier en en injectant un peu dans une petite serre, alors que la présence des vitrages est alors déterminante, que la pression relative du CO₂ dans l'atmosphère correspond à un volume supérieur par m² de surface et que, de toute façon, l'effet de serre additionnel dû à tout accroissement de cette pression relative est heureusement très infé-

rieur à cet accroissement. Il y a en effet un phénomène de saturation de l'effet de serre pour tout gaz concerné, toujours caractérisé par une action sur certaines « fenêtres » correspondant à des longueurs d'onde déterminées.

Cependant, bien que presque indétectable au niveau d'expériences de laboratoire réalisées à très petite échelle, l'effet de serre du dioxyde de carbone est *absolument certain à grande échelle*. Ainsi, seule sa présence massive dans l'atmosphère vénusienne permet d'expliquer la température extrêmement élevée – de l'ordre de 450°C, soit au-delà de la température de fusion du plomb – mesurée au niveau du sol sur cette planète. En effet, la seule prise en compte de la pression atmosphérique et de la proximité relative du soleil suffiraient d'autant moins à expliquer cette situation que l'albédo élevé de la couche nuageuse – environ 0,8 contre 0,4 pour la Terre – renvoie vers l'espace une forte proportion du rayonnement solaire reçu par Vénus.

Pour ce qui est de la « constante » solaire, qui mesure l'énergie transmise par notre étoile pour un m² au niveau de l'orbite terrestre, elle varie en fait dans de très faibles proportions. Cette variation est néanmoins suffisante pour modifier la température moyenne de la Terre dans une fourchette de quelques dixièmes de degrés Celsius et cela dans un in-

tervalle de quelques dizaines d'années. L'évolution de cette constante peut éventuellement suffire à expliquer la majeure partie des variations de température de la Terre durant les trois premiers quarts du vingtième siècle, mais certainement pas au-delà. À partir du milieu des années 1970, l'essentiel de l'évolution climatique apparaît en effet imputable à l'expansion de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre : la moitié du réchauffement atmosphérique mesuré au cours du vingtième siècle a eu lieu dans les vingt-cinq dernières années de cette période. James Hansen, le directeur du Goddard Institute de la NASA, note ainsi que la température de surface moyenne de la Terre en 2004 a été supérieure de $0,48^{\circ}\text{C}$ à celle de la période 1951-1980.¹

La variation de la constante solaire n'explique probablement plus guère à l'heure actuelle que 30% environ de l'évolution tendancielle des températures depuis le milieu des années 1970 et ce pourcentage ne peut qu'aller en diminuant au cours des prochaines décennies. L'activité solaire semble en effet avoir atteint un maximum vers 2002 alors que les GES continuent à s'accumuler dans l'atmosphère.

¹ Le record concerne pour l'instant l'année 1998. La tendance à la progression moyenne des températures n'est en effet pas linéaire, essentiellement en raison de la variabilité météorologique.