



HAL
open science

Le réchauffement climatique en chiffres et la question de son traitement

Daniel Parrochia

► **To cite this version:**

Daniel Parrochia. Le réchauffement climatique en chiffres et la question de son traitement. 2023. hal-04104726

HAL Id: hal-04104726

<https://hal.science/hal-04104726v1>

Preprint submitted on 24 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Le réchauffement climatique en chiffres et la question de son traitement

Daniel Parrochia

Université de Lyon (France)

Résumé. Nous rappelons d'abord des éléments de physique élémentaire : constante solaire, bilan radiatif, effet de serre, paramètres astronomiques du climat (théorie de Milankovitch). Sans remettre en cause les analyses des climatologues et la fameuse courbe de Keeling révélant, de manière incontestable, l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle, nous insistons cependant sur la principale contributrice de l'effet de serre qui est, comme on sait, la vapeur d'eau. Face aux difficultés qu'il y aura à imposer des politiques zéro-carbone partout dans le monde (et surtout aux pays en voie de développement), nous montrons qu'on aurait peut-être intérêt à agir sur la sécheresse des sols, ce qui revient, en fait, à s'intéresser aux nuages. La diminution de la couverture nuageuse, du fait d'un défaut de fixation de l'eau dans les sols, augmente en effet la température générale et donc l'effet de serre. Agir sur le CO_2 aura toujours, dans ce contexte, beaucoup moins d'effet qu'agir sur la vapeur d'eau, fût-ce de façon indirecte. Malgré la difficulté qu'il y a à rendre cette action durable, du fait de l'équilibre de la vapeur d'eau atmosphérique et des océans, on aurait intérêt à ne pas négliger cette voie, compte tenu des problèmes de mise en place d'une politique zéro-carbone à l'échelle mondiale. En désespoir de cause, on peut aussi envisager de protéger la Terre par un nuage de poussière artificiel.

Key words. Bilan radiatif, effet de Serre, vapeur d'eau, évaporation, nuages.

1 Constante solaire

Le Soleil est un corps noir à la température moyenne $T = 5780^\circ \text{K}$ environ. Il émet dans un demi-espace libre un flux d'énergie de surface quantitativement estimable par la loi dite "de Stefan-Boltzmann", incluant la constante du même nom

$\sigma = 5,67037442 \times 10^{-8} \text{kg s}^{-3} \text{K}^{-4}$. On a :

$$F_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 = 6,32 \cdot 10^7 \text{ W.m}^{-2}.$$

À une distance de $R \simeq 15 \times 10^7$ kilomètres, en posant la conservation de l'énergie rayonnée à travers l'espace, il vient :

$$4\pi R_{\odot}^2 F_{\odot} = 4\pi R^2 F.$$

D'où :

$$F = F_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}}{R} \right)^2.$$

Et, avec un rayon stellaire de 695 600 kilomètres, F est estimé à :

$$F = 1362 \text{ W.m}^{-2}.$$

N.B. Les distances étant approximatives ou arrondies, on trouve parfois dans la littérature la valeur numérique de 1366 W, voire 1370 W.

2 Variations du rayonnement solaire

Depuis la formation du système solaire, il y a environ 4,7 milliards d'années, l'intensité du rayonnement solaire a augmenté. À cette époque, elle ne valait que 70% de sa valeur actuelle et, pendant le Carbonifère, il y a environ 300 millions d'années, quand les premiers dinosaures sont apparus et que la végétation tropicale s'est abondamment développée, la constante solaire était environ 2,5% moins élevée qu'aujourd'hui.

On a montré¹ que la constante solaire, exprimée comme pourcentage de sa valeur actuelle, peut se décrire par l'équation suivante (le temps t étant exprimé en milliards d'années depuis l'apparition du système solaire) :

1. Historiquement, la première détermination sérieuse de la constante solaire date de 1838 et revient au physicien français Claude Pouillet (1790-1868) qui l'estime à $1\,228 \text{ W.m}^{-2}$. Cette valeur, pourtant proche de la réalité, est remise en question en 1881 par Samuel Pierpont Langley qui trouve la valeur erronée de $2\,140 \text{ W.m}^{-2}$ à la suite d'une expédition au sommet du mont Whitney (4 420 m). Cette valeur, qui fera référence pendant plus de 20 ans (voir [Dufresne 08]), ne sera corrigée qu'avec la mise en orbite de radiomètres modernes. En 1978, le radiomètre HF sur le

$$\left[1 + 0,4 \left(1 - \frac{t}{4,7} \right) \right]^{-1}.$$

Ainsi, dans 4,7 milliards d'années, le Soleil sera environ 67% plus puissant que maintenant, en termes de rayonnement émis. De possibles variations temporaires d'une durée de 10 millions d'années (tous les 300 millions d'années environ) pourraient expliquer les périodes glaciaires sur Terre : par exemple, le pléistocène (première époque du quaternaire) est une période glaciaire, les précédentes s'étant produites il y a 300 et 700 millions d'années.

Mais d'autres effets terrestres pourraient être prépondérants, comme la disposition des continents (autour des pôles) et la concentration des gaz à effet de serre.

La variation de la constante solaire pourrait s'expliquer par le mouvement du système solaire autour de la Voie lactée. Le système solaire tourne dans le plan de la Galaxie en environ 250 millions d'années en oscillant. Tous les 33 millions d'années, nous traversons le plan de la Galaxie ; il s'agit d'une des hypothèses évoquées pour expliquer les changements climatiques importants, potentiellement à l'origine de la disparition massive d'espèces vivantes.

La constante solaire varie également, de l'ordre de 1 à 5 W.m⁻², sur des échelles de temps plus courtes, de quelques jours à quelques années, par exemple en raison de la présence ou de l'absence de taches solaires ou de l'activité solaire.

Parmi les causes du réchauffement planétaire des XX^e et XXI^e siècle, le Soleil est estimé être responsable à hauteur de 10 à 12%. Il est vraisemblable que depuis 1750, époque à laquelle on a commencé à faire des relevés météorologiques systématiques (voir [Parrochia 97]), le Soleil ait fait augmenter la température moyenne du globe de 0,45°C ; le cycle des taches solaires était quasi-absent durant le petit âge glaciaire.

Néanmoins, sur le long terme, la position astronomique de la Terre par rapport au Soleil est le principal facteur de variabilité naturelle de la température globale, au travers de la « constante » solaire. Les cycles principaux concernent :

- Les variations de l'excentricité de l'orbite terrestre (cycle actuel de 100 000 ans) ;

satellite Nimbus 7 annonce une valeur de 1 372 W.m⁻². Cette valeur sera cependant rapidement affinée à 1 367 W.m⁻² par ACRIM I sur SMM. Plus récemment, VIRGO sur SoHO ramena cette dernière à 1 365,4 ± 1,3 W.m⁻² en 1998. Enfin, depuis 2008, la valeur retenue est égale à 1 360,8 ± 0,5 W.m⁻² (voir [Kopp et al. 11]).

- L’obliquité de l’axe des pôles (cycle actuel d’environ 41 500 ans) ;
- La précession des équinoxes ;
- L’activité solaire, qui fluctue selon un cycle de 11 ans, caractérisé par le nombre de taches solaires.

L’intégration de tous ces facteurs et d’autres dans le cadre de la théorie astronomique des paléoclimats a donné lieu à des travaux divers en climatologie (voir [Berger et al. 06]) et cyclostratigraphie (voir [Weedon et al. 99] ; [Meyers et al. 01]).

3 Bilan radiatif de la Terre

Le bilan radiatif de la Terre² est la somme algébrique de l’énergie reçue et perdue par le système climatique de la Terre, à savoir le système sol-atmosphère-océans.

Le Soleil étant une étoile de type G2, son spectre d’émission s’étend de 0,2 à 4 micromètres, c’est-à-dire de l’ultraviolet à l’infrarouge en passant par le visible.

Le soleil émet une puissance de rayonnement P_{totale} dans toutes les directions de l’espace, mais à une distance D , cette puissance est répartie sur une sphère fictive de rayon D .

La surface de cette sphère est $S_{Sphere} = 4\pi D^2$.

La puissance solaire surfacique est donc égale à $\frac{P_{totale}}{S_{Sphere}} = \frac{P_{totale}}{4\pi D^2}$.

Le calcul de la puissance solaire touchant effectivement la Terre suppose l’existence d’un disque virtuel interceptant le rayonnement solaire et de rayon égal au rayon R_T de la Terre. La surface de ce disque est :

$$S_{Disque} = \pi R_T^2.$$

La puissance réellement reçue par la Terre est donc égale au produit de la puissance solaire surfacique par la surface du disque. Elle s’exprime donc comme suit :

$$P_{Terre} = P_{Solaire\ surfacique} \times \pi R_T^2.,$$

2. L’idée de calculer une "radiation balance" ne semble pas antérieure à 1992 et au livre de Peixoto et Oort (voir [Peixoto et al. 92], 91-130). On trouve en 2000 la notion d’une "Earth energy balance" (voir [Kusnir 00]), et en 2005, une variante de celle-ci sous la forme d’une "Earth energy imbalance" (voir [Hansen et al. 05]). Mais l’expression "Earth energy budget" apparaît seulement au début de 2009 (voir [Trenberth et al. 09] et, plus généralement, [Lindsey 09]).

Dès lors, la puissance reçue par la terre est :

$$P_{Terre} = \frac{P_{totale}}{4\pi D^2} \times \pi R_T^2 = \frac{P_{totale}}{4D^2} \times R_T^2.$$

ce qui peut aussi s'écrire :

$$P_{Terre} = \frac{R_T^2}{4 \times D^2} \times P_{Totale}.$$

L'application numérique suppose les valeurs suivantes :

$$R_T \text{ (rayon de la Terre)} = 6370\text{km} = 6370 \times 10^3\text{m}.$$

$$D \text{ (distance moyenne Terre - Soleil)} = 149,5 \text{ millions de km} = 149,5 \times 10^9\text{m}.$$

Cela nous donne donc :

$$P_{Terre} = \frac{(6370 \times 10^3)^2}{4 \times (149,5 \times 10^9)^2} \times 3,86 \times 10^{26} = 1,75 \times 10^{17}\text{W}.$$

Cette puissance est répartie sur l'ensemble de la surface S de la Terre, avec :

$$S = 4\pi R_T^2.$$

Ce qui amène finalement un flux local de la puissance suivante :

$$P_{surfacique\ locale} = \frac{P_{Terre}}{S} = \frac{1,75 \times 10^{17}}{4 \times \pi \times (6370 \times 10^3)^2} = 342\text{W}.$$

4 Effet de serre et réchauffement climatique

L'atmosphère terrestre est principalement composée des gaz suivants :

- Azote (N_2) : environ 78% ;
- Oxygène (O_2) : environ 21% ;
- Argon (Ar) : environ 1%.

Le reste est formé par des gaz rares, dont le CO_2 (dioxyde de carbone) qu'on mesure, non en pourcentage, mais en partie par millions de molécules (ppm) avec la règle : 1 ppm = 1/1000 000.

Aujourd'hui, le taux de CO_2 dans l'atmosphère est de l'ordre de 400 ppm, soit 0,04 % de celle-ci, ce qui peut, a priori, sembler très peu. L'inquiétude vient du fait que 1) le CO_2 est présumé être un gaz à effet de Serre et que 2) sa quantité dans l'atmosphère a augmenté de 50% depuis l'avènement de la révolution industrielle au XIX^e siècle. Cette inquiétude est-elle fondée ?

4.1 L'origine de l'inquiétude

Il est bon, avant tout, de rappeler dans quelles circonstances ce problème concernant le taux de CO₂ atmosphérique est apparu et s'est ensuite amplifié. L'idée que les émissions de CO₂ dues à la combustion de ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz, lignite,...) contribuaient à augmenter les températures terrestres a été émise au début du XX^e siècle par le scientifique suédois Svante Arrhenius, prix Nobel de chimie 1903. Dans un livre majeur (voir [Arrhenius 10]), il affirmait que le CO₂ contribuait à l'augmentation des températures par effet de serre, ce qui, pour lui, n'était pas une cause de souci mais présentait au contraire un double avantage : 1. Le CO₂ atmosphérique stimulait la croissance des plantes ; 2. Il réchauffait la terre et rendait l'habitat humain plus confortable. Comme on supposait, à cette époque, que la terre allait plutôt en se refroidissant, les thèses d'Arrhénius tombèrent dans l'oubli. Elles ne furent reprises en fait que vers la fin des années 1950 par l'océanographe américain Roger Revelle (voir [Revelle 57]). En 1957 exactement, ce dernier, montra que l'essentiel du CO₂ d'origine anthropique était absorbé par les océans, et n'influaient qu'à la marge sur le réchauffement planétaire. Il conjectura cependant que le taux de CO₂ atmosphérique basculerait vers une augmentation soudaine propre à faire monter les températures si, d'aventure, la consommation industrielle de combustibles fossiles s'accroissait brutalement, au point de ne plus pouvoir être compensée par l'absorption océanique. Ces idées catastrophistes de Revelle restèrent pourtant lettre morte, et cela d'autant plus que, contrairement à ses prédictions, l'évolution des températures de 1950 à 1975 fut plutôt orientée à la baisse (voir [Schmidt et al. 10]) (il est possible que la présence d'aérosols d'origine volcanique dans l'atmosphère ait compensé l'influence des émissions de CO₂ et ce, durant tout ce quart de siècle). Jusqu'en 1987, en tout cas, la croyance majoritaire des scientifiques était que le monde se dirigeait vers une nouvelle glaciation. C'est ainsi qu'en 1983, le climatologue britannique Hubert Lamb (voir [Lamb 95]), dans la première édition de son livre sur le climat, prévoyait une baisse annuelle des températures de -0.15°C, jusqu'en 2015³. La perspective de ce nouvel âge glaciaire inquiéta tant les experts américains qu'ils mirent en place plusieurs groupes de travail gouvernementaux (voir [Deheuvels 23] ; [Postel-Vinay 15] ; [Gervais 13]) destinés à étudier ces questions. C'est ainsi que, de manière paradoxale, l'intérêt des autorités américaines pour le réchauffement climatique est en fait issu de la crainte d'un refroidissement majeur (qui ne s'est, heureusement, jamais produit). Le GIEC⁴ (organisme en partie scientifique, mais en partie aussi contrôlé par

3. Si cette prédiction s'était avérée exacte, de 1983 à 2023, on aurait observé en 40 ans une baisse des températures colossale de -6°C (de -4.8°C en se limitant à l'horizon de 2015).

4. Ce sigle français signifie "Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat", ce qui met l'accent sur l'expertise qu'on suppose "scientifique". En réalité, le sigle anglais IPCC

les Etats) ainsi que le cycle des COPs⁵ en sont les conséquences. C'est à l'occasion de la sécheresse caniculaire de 1988, qui toucha essentiellement les USA, que James Hansen⁶ climatologue de la NASA, réussit à convaincre le Congrès américain aux thèses de Revelle⁷. Mais d'autres mesures sont venues appuyer cette thèse.

4.2 La controverse autour de la courbe de Mann

Depuis 1988, par conséquent, et à travers l'influence grandissante du GIEC, un discours officiel s'est mis en place pour soutenir, à l'inverse de ce qui avait été cru auparavant, mais avec une égale assurance, que nous allions désormais vers le chaud, et non plus vers le froid. Au fil des six rapports d'évaluation – ou Assessment Reports (de AR1 à AR6)) – et des quinze rapports spéciaux – ou Special Reports (dont le dernier, SR15 a été publié en 2019), le GIEC a décliné ses prévisions alarmistes pour 2100 : des élévations de température de 0.6°C et 1.1°C par rapport à 2023 et une élévation du niveau des océans comprise entre 26 et 77cm dans le premier cas, entre 36cm et 87cm dans le second. Des prévisions moins pessimistes dues à Koonin, tablant sur une montée du niveau des océans de 3mm par an, conduiraient seulement à une hausse d'environ 24cm, même en l'absence de limitation des émissions anthropiques de CO₂ (voir [Koonin 21]). Dans ce dernier cas, on reste cependant au voisinage des prévisions basses du GIEC. En revanche, là où ces prévisions deviennent franchement discutables est le domaine des températures, car les modèles qui s'affrontent font apparaître des divergences telles qu'elles rendent peu crédibles les constructions qui les produisent (variation de 1 à 3° ou plus).

(Intergovernmental panel on climate change) indique seulement qu'il s'agit d'un "comité intergouvernemental" sur le changement climatique, ce qui met plutôt l'accent sur l'aspect politique de l'affaire.

5. Ce sigle signifie en anglais "Conference on Parties". Les "parties" en question sont les États signataires de la CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques) qui s'est tenue à Rio en 1992.

6. Hansen s'est, au fil des années, radicalisé, au point de devenir un activiste de la lutte contre le réchauffement climatique et d'être arrêté en 2011 lors d'une manifestation aux USA. Ses thèses excessives et alarmistes ont été, du reste, de nombreuses fois critiquées, notamment par l'astrophysicien Freeman Dyson, qui a accusé Hansen "de transformer sa science en idéologie" (voir [Daw 09]).

7. Hansen, étudiant l'atmosphère de Venus, avait été particulièrement frappé par ses températures très élevées (462°C) qui étaient dues entièrement, selon lui, à une forte concentration de CO₂ (l'atmosphère de Venus contient en effet 250.000 fois plus de CO₂ que celle de la terre). Il imaginait ainsi aisément que l'augmentation des taux de CO₂ dans l'atmosphère terrestre pourrait aboutir, comme pour Vénus, et toutes proportions gardées, à des températures excessives. La pertinence de cette thèse sauta aux yeux des députés du Congrès lors de l'épisode de sécheresse caniculaire de 1988, alors que les climatiseurs de la salle de réunion n'arrivaient pas à réguler la température.

Parmi les arguments avancés pour soutenir ces thèses, il y a l'idée que la fin du XX^e siècle et le début du XXI^e constitueraient les années les plus chaudes que la terre ait connues depuis au moins mille ans, ce qui permet d'induire alors des extrapolations inquiétantes. Le responsable de cette légende est un scientifique américain, Michael E. Mann (voir [Mann 98]), à l'origine de la courbe éponyme, dite aussi "en crosse de hockey". Le graphe de cette courbe, qui décrit l'évolution des températures de la planète durant les 1000 dernières années révèle une température pratiquement stable de l'an 1000 jusqu'à 1950, suivie par une élévation brutale et d'allure catastrophique de 1950 à 2000. Cette courbe ne tient malheureusement pas compte de variations intervenues il y a quelques siècles, tels que l'optimum médiéval des X^e-XIV^e siècle ou le "petit âge glaciaire" des XVII^e-XVIII^e siècles en Europe. D'où une vive polémique avec d'autres chercheurs tels que le climatologue canadien Tim Ball (voir Fig. 1) :

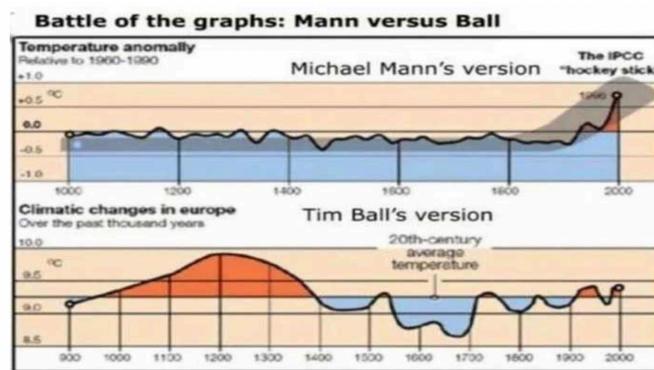


FIGURE 1 – Deux courbes contradictoires

Ne parlons pas du procès en diffamation, intenté par Mann à Ball et gagné par ce dernier, puisque Mann n'a pu produire les preuves justifiant sa courbe. Bornons-nous à souligner que le rapport Wegman⁸ – quelles que soient les critiques dont il a pu faire lui-même l'objet – a mis en évidence que la courbe de Mann était grossièrement fautive, et basée sur des erreurs statistiques importantes. L'un des points cruciaux du rapport (section 4) est que la méthode de Mann et al. crée une forme de crosse de hockey même lorsqu'elle est alimentée par un bruit rouge aléatoire, ce dont les auteurs ne semblent pas s'être aperçus. On peut donc contester la pertinence climatologique de la courbe en question. Le fait est, par exemple, que l'existence de

8. Rapport établi en 2006 par trois statisticiens – Edward J. Wegman (George Mason University), David W. Scott (Rice University) et Yasmin H. Said (The John Hopkins University) – à la demande de Joe Barton, représentant du comité de la Chambre des Etats-Unis pour valider la politique climatique.

l'optimum médiéval semble contredire l'idée que les températures observées actuellement seraient sans équivalents depuis mille ans. Sans évoquer, comme Ball, une "corruption délibérée" (voir [Ball 14]) de la science du climat, on peut cependant souligner l'urgence d'une appréhension plus mesurée du réchauffement climatique et de ses conséquences. Ajoutons, pour faire bonne mesure, que le rapport Wegman, dans sa conclusion (voir [Wegman 06], 10^e point, 50), précise qu'il écrit par des statisticiens, il s'est borné à examiner la méthodologie de Mann et de ses collaborateurs, et qu'il s'est concentré sur la réponse à cette question et non sur la question de savoir si oui ou non le climat mondial était en train de changer. "Nous n'avons discuté de la paléoclimatologie, écrivent les auteurs, que dans la mesure où il était nécessaire de clarifier notre discussion des questions statistiques. L'enregistrement de température instrumenté montre clairement que les températures mondiales ont augmenté depuis 1850 CE. La façon dont cette ère actuelle se compare aux époques précédentes n'est pas claire en raison des incertitudes dans les documents qu'on peut se procurer".

4.3 La courbe de Keeling

Examinons maintenant la question de l'augmentation de 50% du CO₂ depuis le début de la révolution industrielle. En apparence, elle se révèle clairement sur le diagramme bien connu suivant (voir Fig. 2 - gauche) qui montre la courbe de croissance du CO₂ dans l'atmosphère depuis 1740. Cette courbe – dite courbe de Keeling⁹ – représente les mesures effectuées sur des carottes glaciaires auxquelles on a ajouté les mesures de l'Observatoire de Mauna Loa pour la période 1958-1995. On note évidemment une accélération importante de l'augmentation de la concentration en CO₂ depuis 1958 (voir [Mackenzie 98]).

9. Du nom de Charles David Keeling, chercheur chargé par Roger Revelle, océanographe américain de l'institut océanographique Kripps, de diriger un programme sur le dioxyde de carbone atmosphérique au milieu des années 1950. En juillet 1956, l'équipe de Revelle intégrait Keeling, qui a commencé des mesures continues de la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone au Mauna Loa Observatory, observatoire situé sur le volcan Mauna Loa à Hawaï. Parallèlement, des mesures étaient effectuées en parallèle en Antarctique, en Alaska et sur les îles Samoa. Depuis cette époque, Revelle a fait une priorité de l'étude de l'ensemble du cycle du carbone et de la solubilité du carbonate de calcium, accumulant des données qui servent encore aujourd'hui au GIEC et à de nombreux chercheurs pour les études de prospectives et modélisations du climat. L'analyse des résultats atmosphériques de l'observatoire se fait à Hilo (voir carte, Fig. 2 - droite) où sont également envoyés, chaque semaine, depuis l'ancien aéroport, des ballons stratosphériques pour évaluer la concentration en ozone et en vapeur d'eau, tandis qu'un site à Kulani Mauka collecte les eaux de pluie, et qu'un système Lidar mesure la qualité de l'air.

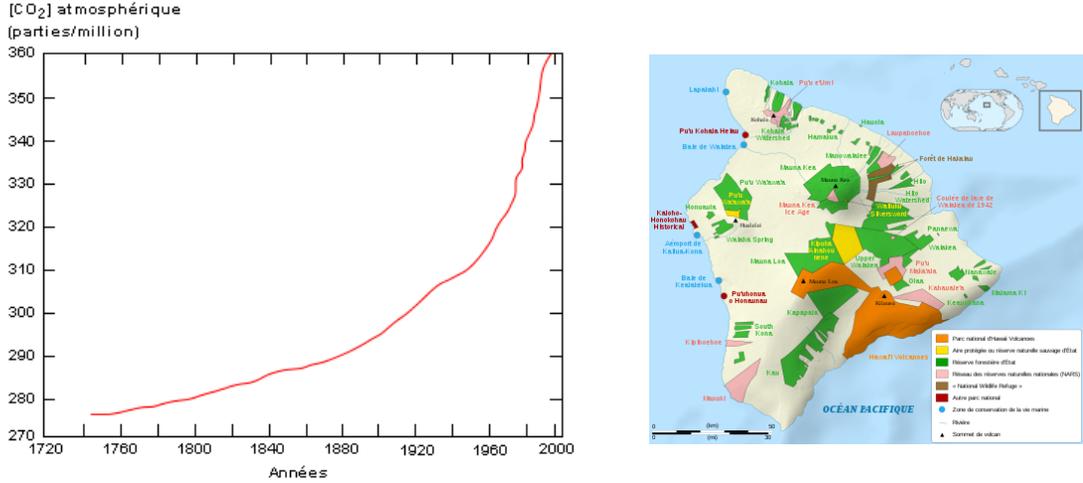


FIGURE 2 – Courbe de Keeling et carte d’Hawaï

Comme on peut le constater, la quantité de CO_2 dans l’atmosphère avant la révolution industrielle était de l’ordre de 280 ppm. Elle a donc effectivement augmenté depuis d’environ 50%. Mais la question, à partir de là, est de savoir quel sens donner à cette corrélation. Il serait évidemment logique de considérer que l’augmentation du CO_2 est la *cause* de l’élévation des températures terrestres. Malheureusement, c’est plutôt l’inverse qu’on observe. Un graphe dû à François Gervais (voir [Gervais 13]) compare, pour la période 1980-2005, la température moyenne $T(t)$ (trait continu) terrestre à chaque instant t (sur une échelle annuelle), à la variation annuelle $\theta(t) - \theta(t - 1)$ du taux $\theta(t)$ de CO_2 , décalée de 6 mois, soit $\theta(t + 1/2) - \theta(t - 1/2)$. Avec un choix d’échelle convenable pour $T(\cdot)$ et $\theta(\cdot)$, on constate que les courbes se superposent. On en déduit assurément que le taux de CO_2 mesuré aux instants $t + 1/2 = t + 6$ mois et $t - 1/2 = t - 6$ mois semble lié à la température à l’instant t . Mais, si tel est le cas, c’est la température à l’instant t qui influe sur le taux de CO_2 à l’instant $t + 1/2$, non l’inverse (voir Fig. 3).

En conséquence on ne peut pas conclure de l’augmentation du CO_2 à l’élévation de la température de l’atmosphère au voisinage de la Terre, et non plus, à l’évidence, à une influence directe de ce gaz sur le fameux "effet de serre". L’effet de serre du CO_2 existe, mais on a pu montrer qu’il était saturé aux deux fréquences principales du

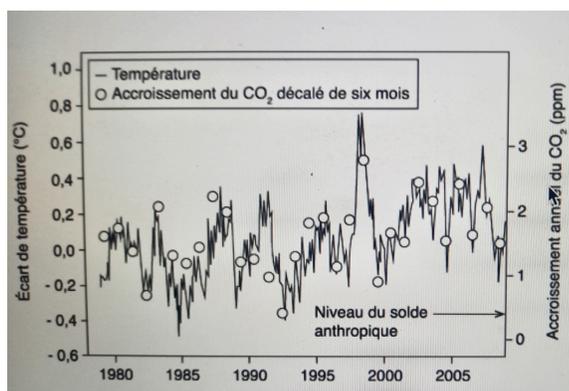


FIGURE 3 – Influence de la température sur le CO₂

spectre infrarouge de la molécule. Si l'on observe le spectre de quelques dizaines de mètres d'atmosphère, en effet, il apparaît que cette couche est devenue complètement opaque à 20 et 70 terahertz (resp. 15 et 4,3 micromètres de longueur d'onde), les deux principales raies d'émission infrarouge du CO₂. Heinz Hug (voir [Hug 98]) a même montré qu'au voisinage de la bande à 15 micromètres, le doublement du taux de gaz carbonique n'induirait une différence de transparence résiduelle que de 0,17% sur une altitude de dix mètres, cette bande étant "la plus active en termes d'effet de serre, du fait de sa proximité avec la longueur d'onde du maximum du corps noir", comme le commente François Gervais (voir [Gervais 13], 135). Transcrit en forçage radiatif, ce résultat conduit, selon Hug, à un réchauffement de 0,015° C, ce que confirment d'autres études physico-chimiques. Faut-il, pour cela, s'alarmer ?

4.4 L'effet de serre

Connu depuis le XIX^e siècle, l'effet de serre est lié à la situation physique suivante : le Soleil émet un rayonnement dans la lumière visible, l'ultraviolet et l'infrarouge proche. La Terre réfléchit environ 30% de ce rayonnement (c'est ce qu'on appelle "l'albedo") et absorbe le reste. Elle émet elle-même un rayonnement dans l'infrarouge lointain¹⁰. S'il n'y avait pas d'effet de serre, ce dernier rayonnement repartirait dans l'espace et l'on estime que la température à la surface de la terre, au lieu d'être en moyenne de l'ordre de 14 à 15°C, serait plutôt de l'ordre de -18° à -19°C (-20°C dans certaines publications voir [Thomas 00]).

10. Les valeurs sont les suivantes : On mesure l'effet de serre par la différence entre le flux infrarouge émis par la surface de la Terre (en moyenne 390 W.m⁻²), et le flux sortant au sommet de l'atmosphère (239 W.m⁻²). L'effet de serre est donc de 151 W.m⁻² (voir [Fouquart 15]).

4.4.1 La température de la Terre sans l'effet de serre

Le calcul de la température de surface T_S de la Terre est assez facile à faire à partir des données suivantes :

Flux solaire $\Phi_0 = 1362 \text{ W.m}^{-2}$;

Albedo $\alpha = 0,3$;

Emissivité/absorptivité de l'atmosphère : coefficient $\epsilon = 0,76$;

Flux incident : $\frac{\Phi_0}{4}(1 - \alpha)$;

Constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,670367(13) \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$.

Flux émis : σT_S^4 ;

Condition d'équilibre :

$$\frac{\Phi_0}{4}(1 - \alpha) = \sigma T_S^4;$$

D'où :

$$T_S = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\Phi_0(1 - \alpha)}{4} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

L'application numérique donne effectivement ici une valeur de l'ordre de 254°K , soit -18°C .

On notera que la présence d'une atmosphère associée à un effet de serre est de nature à modifier considérablement la température à la surface d'une planète, surtout si cette atmosphère est principalement formée de gaz absorbant le rayonnement infrarouge. Ainsi, la température de Mercure, planète sans atmosphère, est de l'ordre de 167°C , tandis que celle de Vénus, planète dont l'atmosphère est composée à 96% de CO_2 , s'élève, comme on l'a déjà dit, à 462°C .

4.4.2 La température de la Terre avec l'effet de serre

On doit tenir compte, cependant, du fait qu'une partie du rayonnement terrestre est retourné vers la Terre à cause de la couverture nuageuse. La situation correspondante est indiquée sur les schémas suivants (voir Fig. 4) :

On a toujours le même flux solaire Φ_0 , l'albedo α , la température de surface de la terre T_S . Soit T_A la température de l'atmosphère.

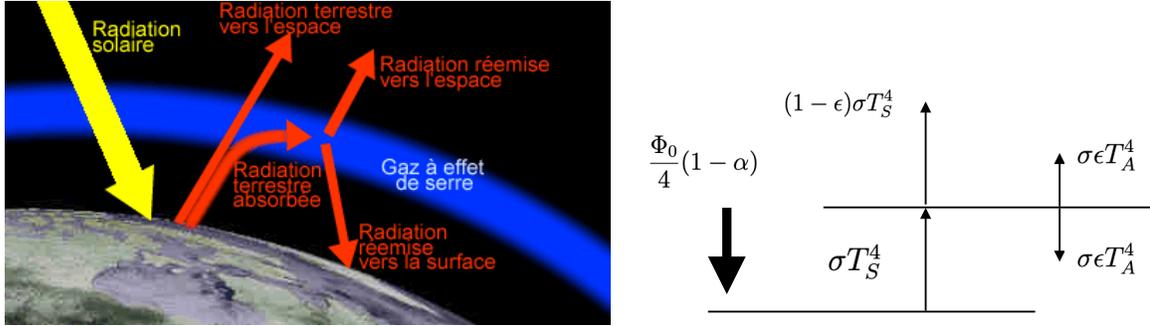


FIGURE 4 – Rayonnement terrestre et flux solaire

La condition d'équilibre de l'atmosphère est donnée par :

$$\sigma\epsilon T_S^4 = 2\sigma\epsilon T_A^4, \quad \text{d'où : } T_A = \frac{T_S}{2^{1/4}};$$

La condition d'équilibre de la surface terrestre avec l'atmosphère est :

$$\frac{\Phi_0}{4}(1-\alpha) + \sigma\epsilon T_A^4 = \sigma T_S^4.$$

ou encore :

$$\frac{\Phi_0}{4}(1-\alpha) + \sigma\frac{\epsilon}{2}T_S^4 = \sigma T_S^4.$$

D'où finalement :

$$T_S = \left[\frac{1}{\sigma} \frac{\Phi_0(1-\alpha)}{4} \frac{1}{1-\frac{\epsilon}{2}} \right]^{1/4}.$$

On vérifie que l'application numérique donne, dans ce dernier cas, une température de surface terrestre moyenne de l'ordre de 287°K soit +14°C.

5 Les paramètres astronomiques et la théorie des paléo-climats

Avant d'envisager des actions possibles pour limiter l'augmentation de l'effet de serre – si tant est que l'action anthropique le modifie de façon significative –, revenons sur le

passé de la Terre en tant que planète du système solaire et examinons les paramètres astronomiques du climat expliquant notamment les variations de température au cours du temps.

5.1 La théorie de Milankovitch

L'astronome serbe Milutin Milankovitch, après avoir étudié les changements lents de l'orbite de la Terre, dus aux interactions avec les autres planètes du système solaire, a pu mettre en évidence trois composantes de la variabilité orbitale susceptibles d'engendrer des changements de température sur Terre et de notables variations climatiques (voir [Milankovitch 20]; [Milankovitch 30];[Milankovitch 41]). Ce sont les fameux "cycles de Milankovitch", qui concernent :

- L'excentricité de l'orbite terrestre (période de 413 000 et 100 000 ans) ;
- L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre (période de 41 000 ans) ;
- Le phénomène de précession des équinoxes (période de 23 000 et 19 000 ans) ;

La théorie de Milankovitch a été longtemps critiquée, mais son perfectionnement et ses extensions à la fin des années 1970 (voir [Berger 78]) ont pu montrer sa validité. En particulier, les périodes que nous venons d'énumérer ont pu être reconstruites à partir d'un traitement spectral des signaux (voir Fig; ())(voir aussi [Landais 16]).

Des études plus récentes (voir [Hays et al. 76]) ont aussi permis d'établir des corrélations certaines entre les variations de ces paramètres orbitaux et les changements climatiques sur Terre, en particulier l'alternance de périodes de glaciation et de périodes interglaciaires. Les changements orbitaux, en effet, entraînent de grandes variations de la quantité de lumière solaire reçue par la Terre pendant une saison donnée (jusqu'à $\pm 15\%$).

On peut, par ailleurs, reconstituer les variations du volume des glaces en employant des mesures des isotopes de l'oxygène dans la calcite (le "O" de CaCO_3 , par exemple) des coquilles de foraminifères. En effet, les variations en ^{18}O de l'eau de mer peuvent être corrélées aux variations de volume des glaces¹¹ et on établit aussi des liens entre variation du niveau de la mer et variation de la composition isotopique de l'eau de mer et des tests de foraminifères benthiques. Cette variabilité de l'oxygène

11. Pendant la période glaciaire, le niveau de la mer était de - 130m. En conséquence le ^{18}O de l'océan était à une concentration de +1.5 pour mille plus élevée qu'il est aujourd'hui. La mesure du ^{18}O dans les coquilles de foraminifères permet donc de reconstruire les variations du volume de glace à l'échelle de millions d'années.

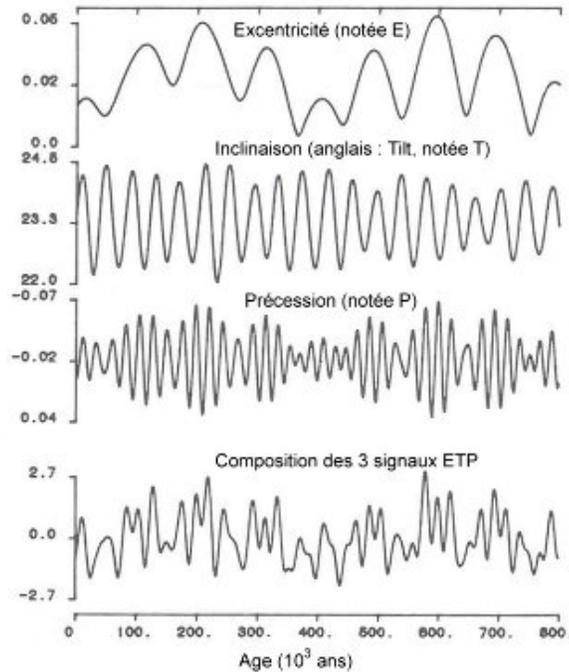


FIGURE 5 – La périodicité de Milankovitch (d’après [Crowley et al. 91])

^{18}O est liée aux variations du rayonnement direct, en relation avec les paramètres de Milankovitch. La périodicité de Milankovitch et celle des époques glaciaires sont dans l’ensemble bien corrélées (voir Fig. 6).

Il apparaît donc que les variations périodiques de l’orbite de la Terre sont le stimulateur de périodes glaciaires.

5.2 Quelques problèmes de la théorie de Milankovitch

Malgré une bonne corrélation globale avec les faits, la théorie de Milankovitch est, dans le détail, loin de coïncider parfaitement avec l’expérience. Ainsi, tous les cycles ne sont pas toujours présents, et parfois, d’autres dont l’origine est peu connue viennent se surajouter aux précédents.

Par exemple, l’évolution des glaces continentales révèle un cycle de 100.000 ans dans

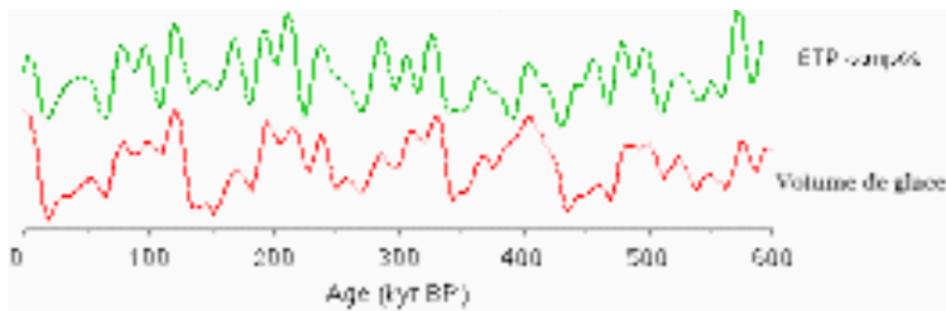


FIGURE 6 – Périodicité de Milankovitch et glaciations

le quaternaire récent, principalement attribué, aujourd'hui, à l'excentricité. Or cela est en contradiction avec la théorie "historique" de Milankovitch qui attribuait la variabilité glaciaire à l'insolation estivale dans les hautes latitudes, laquelle ne contient en fait qu'une contribution très faible de l'excentricité.

La comparaison entre le volume des glaciers et l'insolation estivale sur les 500 derniers milliers d'années, en plus du fait qu'elle n'est visuellement pas évidente, fait, en outre, apparaître des cycles plus courts que les fameux grands cycles de 100.000 ans (voir Fig. 7).

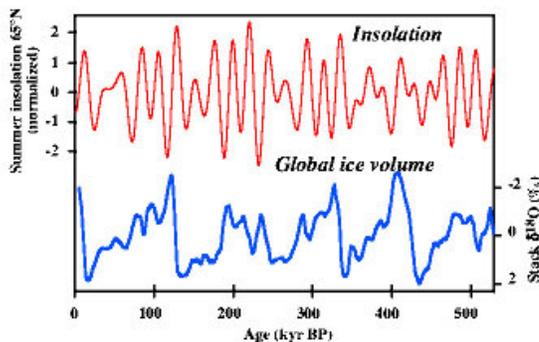


FIGURE 7 – Variation volume des glaciers-insolation estivale dans les hautes latitudes (65°N)

Pour conserver la théorie, on peut alors faire intervenir certains mécanismes non-linéaires, mais l'affaire tient évidemment du bricolage. En termes de réfutabilité poppérienne, il vaudrait mieux reconnaître que l'insolation estivale dans les hautes latitudes ne semble pas jouer directement un rôle dans l'évolution des glaciers. Et ce, d'autant plus que, si c'était le cas, les glaces de l'Antarctique devraient évidemment évoluer de façon opposée. Or ce n'est pas ce qu'on constate puisque les forages au Groenland et en Antarctique ont montré que les températures des calottes variaient simultanément. Il semble ainsi nécessaire de formuler un énoncé plus moderne de la théorie de Milankovitch, en accord avec les observations actuelles.

5.3 Nouvelles avancées

La théorie de Milankovitch mérite cependant certainement d'être sauvée. Indépendamment de la question des paléoclimats et de leurs variations, elle a eu, entre autres pour effet de permettre d'affiner l'échelle de temps géologique nécessaire à l'établissement d'une chronologie terrestre.

L'utilisation d'une échelle de temps géologique repose d'abord sur les enregistrements sédimentaires collectés à travers le monde et reliés entre eux au travers d'événements significatifs comme la disparition ou l'apparition d'espèces ou les renversements du champ magnétique terrestre. Tout cela permet d'accéder à une chronologie relative. Ensuite, les enregistrements sont datés de façon absolue à l'aide de certains éléments isotopiques. La méthode est efficace pour les enregistrements les plus anciens (environ 100 millions d'années), mais la datation astronomique est plus précise pour les sédiments les plus récents. C'est là que les cycles de Milankovitch interviennent. On leur compare les cycles observés dans les enregistrements paléoclimatiques. Le résultat est remarquable : la datation absolue résultante est précise à seulement 40.000 ans près sur plus de 10 millions d'années. La plupart des enregistrements sédimentaires géologiques sont ainsi à présent datés et calibrés à partir des cycles astronomiques.

Une difficulté importante touchant à l'utilisation de la théorie de Milankovitch est de savoir si les cycles mis en évidence ont pu être affectés par le chaos déterministe.

On sait, en effet, qu'à cause du comportement chaotique des orbites des planètes – démontré par Jacques Laskar en 1989 (voir [Laskar 89]) –, l'incertitude des calculs est multiplié par 10 tous les 10 millions d'années, de sorte qu'il est complètement illusoire de rechercher une solution précise concernant la position de la Terre au-delà de 100 millions d'années. Toutefois, en tenant compte de la précision actuelle sur les paramètres du système solaire (position, masse des planètes...), les solutions

astronomiques peuvent être utilisées pour la datation des sédiments jusqu'à environ 40 à 50 millions d'années en arrière.

Au-delà de 100 millions d'années, les variations orbitales ont sans doute aussi affecté les climats terrestres. De nombreux sédiments du Jurassique ou du Trias, par exemple, présentent des cycles marqués qui sont probablement dus aux variations astronomiques. Cela étant, on n'a encore aucun moyen de les comparer à des simulations du mouvement de la Terre à cette époque. On pourrait naturellement imaginer que c'est en étudiant ces cycles sédimentaires qu'il serait possible de retrouver les contraintes sur les variations de l'orbite et de l'orientation de la Terre de l'époque en question. Mais il faudrait pour cela des enregistrements sédimentaires d'une qualité exceptionnelle...

Même sans les phénomènes chaotiques, d'autres difficultés se font jour pour reconstituer le passé astronomique de la Terre, et donc les anciens climats qu'elle a pu connaître. On sait, par exemple que la précession climatique et l'obliquité terrestre sont très sensibles à l'histoire du système Terre-Lune. À cause des effets de marées, la Lune était plus près de la Terre dans le passé et la Terre tournait plus vite. Peu de données, cependant, existent sur cette évolution et la valeur des périodes de Milankovitch dans le passé présente pour cela une marge d'incertitude significative.

Il existerait peut-être cependant un moyen de contourner ce problème. Certains cycles de Milankovitch sont très stables au cours du temps et peu affectés par le chaos. C'est le cas du cycle de ~ 400.000 ans de l'excentricité qui provient essentiellement des perturbations gravitationnelles engendrées par Jupiter et Saturne (planètes géantes très peu affectées par le chaos sur un long terme). La recherche de ce cycle dans les enregistrements peut être faite sur toute l'ère du Mésozoïque (jusqu'à 250 millions d'années) et certains enregistrements semblent présenter de tels cycles. L'avenir dira si on peut définir une échelle de temps géologique fiable basée sur l'astronomie jusqu'à 250 millions d'années en arrière.

Un autre problème serait celui de savoir s'il existe des cycles de Milankovitch sur d'autres planètes que la Terre. En principe, les calculs de mécanique céleste et les intégrations numériques permettent de calculer l'évolution des paramètres de l'orbite et de l'obliquité des autres planètes sur plusieurs millions d'années. Il devrait être ainsi possible de prévoir sur quelle planète on s'attend à ce que les changements climatiques soient importants. Toutefois, cela reste fortement spéculatif, et, du point de vue de nos problèmes climatiques, moins crucial pour nous.

5.4 Cycles de Milankovitch et époque actuelle

La question centrale est évidemment de connaître exactement où nous en sommes dans les cycles de Milankovitch.

D'abord il faut savoir qu'on en découvre encore aujourd'hui de nouveaux, de très longue durée. Ainsi une étude récente menée par des chercheurs de Toulouse (laboratoire GET, CNRS-Université de Toulouse 3) et de Brême (laboratoire MARUM, Université de Brême) (voir [Martinez et al. 15]), montre qu'un facteur orbital de longue durée a temporisé la dynamique saisonnière du climat entre le Jurassique et le début du Crétacé. Cette étude repose sur une analyse inédite de la composition géochimique de bélemnites, des fossiles d'animaux marins morphologiquement proches des calamars, ayant enregistré la chimie et la température de l'eau de mer entre -200 et -125 millions d'années. De façon surprenante, les résultats montrent une fluctuation cyclique de la composition en carbone de l'eau tous les 9 millions d'années. C'est sans doute le cycle le plus long qu'on ait trouvé jusqu'ici.

Tentons maintenant de répondre à la question centrale. D'après les données dont nous disposons, la dernière grande déglaciation a eu lieu il y a 128 000 ans, à une époque où la Terre en été, était relativement plus proche du Soleil et où son axe de rotation était fortement incliné ($24,2^\circ$). Comme nous le rapportions déjà dans [Parrochia 10]), une conjonction semblable s'est révélée il y a 11000 ans, époque où le climat terrestre a connu des étés plus chauds que les étés actuels, une température moyenne plus élevée d'environ 2°C et un niveau des mers plus haut d'environ 2 mètres. Actuellement, cependant, c'est en été que la Terre se trouve être le plus éloigné du Soleil. En conséquence, les étés – à quelques jours de canicule près – ne devraient pas être aussi chauds qu'il pourraient et les hivers devraient être aussi en principe plutôt doux. Ceci peut être mis en relation avec le fait qu'au cours des dix mille dernières années, les hautes latitudes de l'hémisphère nord se sont progressivement refroidies : le pergélisol initialement restreint aux très hautes latitudes a progressé vers le sud, ce qui semble annoncer l'établissement d'une couverture neigeuse permanente aux hautes latitudes de l'hémisphère nord, prémisse à la prochaine glaciation¹². Cependant, l'excentricité de l'orbite terrestre est actuellement particu-

12. Des mesures récentes font cependant état d'un réchauffement du pergélisol. Au cours de la décennie 2007-2016, la température du sol près de la profondeur d'amplitude annuelle nulle dans la zone de pergélisol continu a augmenté de $0,39 \pm 0,15^\circ\text{C}$. Au cours de la même période, le pergélisol discontinu s'est réchauffé de $0,20 \pm 0,10^\circ\text{C}$. Le pergélisol dans les montagnes s'est réchauffé de $0,19 \pm 0,05^\circ\text{C}$ et en Antarctique de $0,37 \pm 0,10^\circ\text{C}$. Globalement, la température du pergélisol aurait ainsi augmenté de $0,29 \pm 0,12^\circ\text{C}$. La tendance observée suivrait l'amplification arctique de l'augmentation de la température de l'air dans l'hémisphère Nord. Dans la zone discontinue,

lièrement faible, alors que l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre est loin d'être à son minimum. Dans une telle configuration, la situation est peu favorable au retour d'une glaciation, d'autant que, la distance Terre-Soleil ayant tendance à diminuer dans les prochains milliers d'années, la situation va évoluer progressivement vers l'établissement d'étés de plus en plus chauds dans l'hémisphère nord. Tout semble indiquer l'absence de construction d'une calotte glaciaire dans les prochains siècles ou millénaires, et un réchauffement naturel des périodes estivales. Si c'était le cas, la configuration ne serait pas inédite. Bien que rare au cours des dernières centaines de milliers d'années écoulées (situation orbitale de faible excentricité) elle s'est tout de même produite il y a environ 400 000 ans (stade isotopique 11), où l'interglaciaire a été particulièrement long (environ 30 000 ans). A cette époque, le balancier des 11 000 ans a peu joué, et le nouveau cycle de 22 000 ans s'est établi alors que le niveau des mers était encore élevé. Il y avait à l'époque de la vigne sauvage dans le Vercors et un niveau des mers sans doute plus haut (probablement d'une dizaine de mètres) (voir [Melières 07]). En résumé, la sortie de notre période interglaciaire risque d'être longue et, même si, à long terme, nous allons à nouveau vers le froid, non vers le chaud, ce dernier va nous accompagner un certain temps, se cumulant avec le reste.

En tout cas, le réchauffement que l'on a constaté au cours des dernières décennies est, de toute façon, trop rapide pour être lié aux changements de l'orbite terrestre, et trop important pour être causé par l'activité solaire. Même si beaucoup d'éléments restent encore mal compris dans les cycles de Milankovitch¹³, on ne peut s'en remettre à eux pour expliquer la situation actuelle.

6 Bilan provisoire

Résumons rapidement ce que nous savons.

1. Le bilan radiatif de la Terre est d'environ $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Le réchauffement climatique

cependant, le réchauffement du sol s'est produit en raison de l'augmentation de l'épaisseur de la neige alors que la température de l'air est restée statistiquement inchangée (voir [Biskaborn et al. 19]). Mais ces variations locales ne sont pas à l'échelle cosmo-géologique

13. La variation d'excentricité semble trop légère pour provoquer un changement climatique important, les cycles ne sont pas toujours évidents à détecter – notamment à 65° de latitude nord (valeur de référence car la terre qui y est prépondérante, réagit plus facilement aux changements que l'océan), enfin les cycles prédominants ne sont pas toujours les mêmes (les cycles de 100 000 ans sont apparents depuis seulement environ 1 millions d'années, alors qu'avant, les cycles de l'obliquité (de 41000 ans) étaient dominants). On ne sait pas ce qui a provoqué cette transition – d'où l'appel à des effets non-linéaires.

représente en gros 1% d'écart par rapport au bilan radiatif, soit 342/100, c'est-à-dire environ 3W.

2. Il y a donc un "forçage radiatif" d'environ 3 W.m^{-2} , qui semble sans commune mesure avec les variations de l'ordre de $0,5 \text{ W.m}^{-2}$, attribuées aux fluctuations de la puissance solaire selon les cycle de 11 ans. Les autres paramètres "astronomiques" paraissent également liés à une périodicité extrêmement longue, beaucoup trop pour pouvoir être impliqués dans les phénomènes intervenus durant la centaine d'années qui nous sépare des débuts de la révolution industrielle.

3. Comme la quantité de CO_2 , gaz à effet de serre¹⁴, a augmenté de 50% dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle, il est tentant d'attribuer l'origine du "forçage radiatif", et donc, du réchauffement climatique, à nos rejets en CO_2 (qui ne représentent pourtant, rappelons-le, que 0,04% de l'ensemble de l'atmosphère).

4. Rappelons cependant que 99% de l'atmosphère étant composée d'azote et d'oxygène (gaz ne jouant aucun rôle thermique), la conservation des conditions de température planétaire favorables ne repose que sur 0,43% des gaz qui composent l'atmosphère. Parmi les contributeurs à l'effet de serre naturel, l'eau est le principal en termes de concentration (H_2O : 0,39%), suivie de loin par le dioxyde de carbone (CO_2 : 0,039%), le méthane (CH_4 : 0,00018%) et l'oxyde nitrique (N_2O : 0,000032%). Dans l'absolu, la vapeur d'eau contribue à l'effet de serre pour environ 50%, les nuages (donc l'eau liquide) pour 25%, le CO_2 pour 20%, l'ensemble des autres gaz contribuant pour environ 5%¹⁵.

5. Compte tenu de ces dernières données, on pourrait se dire qu'on aurait meilleur compte à agir sur le principal contributeur à l'effet de serre, à savoir, la vapeur d'eau. Le problème est qu'on ne peut pas modifier de façon durable la composition de la vapeur d'eau de l'atmosphère, à laquelle d'ailleurs la vapeur d'eau d'origine anthropique contribue de façon négligeable (voir [Boucher et al. 04]). Celle-là, en effet, est en équilibre avec les océans, de sorte que, si l'on tente d'augmenter la vapeur d'eau de l'atmosphère, les océans, en très peu de temps, auront absorbé tout

14. Pour qu'un gaz soit "à effet de serre", c'est-à-dire pour qu'il puisse absorber le rayonnement infrarouge, il faut que sa molécule soit composée de 3 atomes ou d'au moins 2 atomes différents. Ainsi le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'ozone (O_3), la vapeur d'eau (H_2O) et les CFC sont des gaz à effet de serre, ce que ne sont pas l'oxygène (O_2), l'azote (N_2), l'hydrogène (H_2), l'Argon (Ar), etc.

15. Ces valeurs sont calculées pour le forçage dû à l'effet de serre, et non pour le bilan radiatif complet. Mais les nuages, qui réfléchissent le rayonnement solaire, absorbent aussi le rayonnement thermique infrarouge terrestre. Le bilan des deux est que, pour l'instant au moins, les nuages refroidissent légèrement la planète (voir [Myhre et al. 13]).

le surplus.

Il n'est pas interdit, cependant, de s'intéresser à l'effet de la couverture nuageuse de la Terre sur son bilan radiatif.

7 Nuages et vapeur d'eau

Tout le monde s'accorde à reconnaître que les nuages jouent un rôle de tout premier plan dans le système climatique, non pas seulement parce qu'ils sont causes des précipitations mais parce qu'ils influencent à la fois le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge émis par la Terre (voir [Hartmann et al. 01]). On a même des raisons de supposer qu'une fraction de la couche inférieure des nuages contrôle pratiquement la température globale (voir [Kauppinen 19]).

Les nuages absorbent peu le rayonnement solaire, mais ils le diffusent sur toutes les longueurs d'onde (c'est pourquoi on les voit blancs) et peuvent atteindre la réflectivité de la neige fraîche (80%). L'influence des nuages sur le rayonnement thermique infrarouge est tout aussi importante. Sauf pour les plus minces, on peut les assimiler à des corps noirs, c'est-à-dire des corps absorbant la totalité du rayonnement infrarouge reçus et émettant tout ce que leur température leur permet. Les nuages qui ont le maximum d'effet sur le rayonnement sont les nuages les plus étendus et les plus persistants, à savoir les stratocumulus marins et les cirrus, chacun couvrant environ 20% de la surface terrestre. Les premiers, qui sont des nuages bas (leur base se situe entre 500 et 1000 m) ont une température peu différente de la surface terrestre, de sorte que leur contribution à l'effet de serre est limitée. En revanche, leur réflectivité est grande et leur effet sur l'albedo important. En contraste, les cirrus, nuages les plus élevés qu'on rencontre au sommet de la troposphère, ont des températures très basses (-60 à -70°C), une faible contribution à l'albedo du fait de leur transparence au rayonnement solaire, mais une grande influence sur l'effet de serre.

Ce n'est que dans les années 1980 qu'on a pu, grâce aux observations des satellites météorologiques, réunir des informations fiables sur l'importance et les propriétés de la couverture nuageuse globale, qui est, en permanence, de l'ordre de 60%.

Bien que de nombreux points restent obscurs¹⁶ on a maintenant une assez bonne

16. Les nuages peuvent bien entendu réchauffer ou refroidir la Terre, selon le rapport entre le rayonnement solaire qu'ils réfléchissent et la quantité par laquelle ils réduisent l'émission de ce rayonnement vers l'espace. Mais, dans les régions chaudes des océans tropicaux, ces effets de rayonnement solaire et terrestre s'annulent presque exactement, de sorte que les nuages convectifs tropicaux ne semblent pas modifier le bilan énergétique de la Terre mesuré depuis l'espace. On ne connaît

idée du forçage radiatif des nuages, autrement dit de la variation du bilan radiatif de la Terre qui résulterait de leur totale suppression. L'effet est tantôt négatif, tantôt positif, puisqu'il porte à la fois sur l'albedo et sur l'effet de serre.

Les chiffres sont les suivants : en moyenne annuelle, on trouve environ -47 W.m^{-2} pour l'effet d'albédo et $+29 \text{ W.m}^{-2}$ pour l'effet de serre. Globalement donc, l'effet d'albédo l'emporte sur l'effet de serre et l'effet résultant des nuages est de refroidir la planète. Si, instantanément, ils devenaient transparents, une simple soustraction montre que le bilan radiatif augmenterait de 18 W.m^{-2} , une quantité déjà assez remarquable en elle-même. Toutefois, ce bilan résultant de deux grandeurs encore plus importantes, il est certain que de relativement faibles modifications de la couverture nuageuse et/ou de ses propriétés pourraient avoir un impact considérable sur le climat.

Remarquons maintenant que le forçage radiatif correspondant au réchauffement de la planète étant de l'ordre de 3 W.m^{-2} , cette quantité représente environ 1/6 du bilan radiatif des nuages, soit 16%. Il suffirait donc de modifier celui-ci de 16% pour avoir un effet comparable au réchauffement climatique.

Par ailleurs, le forçage radiatif net moyen annuel des nuages, qui est estimé en comparant le rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement solaire sortant, montre qu'il n'est pas rare de voir, notamment aux latitudes moyennes, des nuages absorbant jusqu'à 70 W.m^{-2} d'énergie (voir Fig. 8), ce qui permet, puisque les nuages tropicaux sont neutres vis à vis du bilan énergétique de la terre, de tirer certaines conclusions quantitatives générales.

En effet, nous savons que le forçage radiatif est seulement d'environ 3 W.m^{-2} , ce qui représente en l'occurrence – si nous retenons cette valeur numérique de 70 W.m^{-2} , $3/70$ de la quantité soustraite, soit 4,2%. En extrapolant au niveau de la Terre entière, nous pouvons donc soutenir que ces $3/70$ représentent 4,2% des nuages globaux de l'atmosphère. Mais comme 70% de la surface terrestre est couverte par les océans, les terres émergées ne représentent environ que 30% de cette surface. En conséquence, les nuages situés strictement au-dessus des sols représentent seulement 4,2% de ces 30%. Et donc nous pouvons soutenir que l'augmentation de 3 W du bilan radiatif de la Terre correspond, grosso modo, à la suppression de $4,2 : 30 = 14\%$ des nuages purement terrestres. En d'autres termes, si on enlevait 14% des nuages terrestres, on obtiendrait un effet comparable à celui du réchauffement climatique actuel.

pourtant ni la raison pour laquelle cet équilibre se produit, ni s'il est susceptible de changer avec le réchauffement climatique. Les premières simulations concernant le cycle de vie de ces nuages et leur effet radiatif sont assez récentes (voir [Hartman et al. 18]).

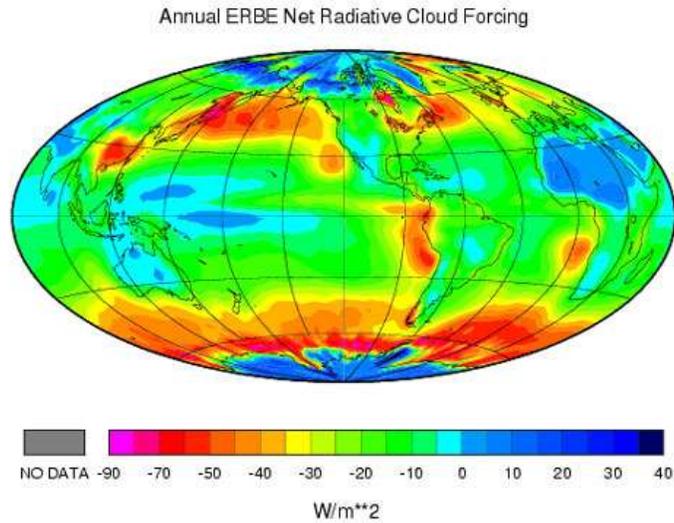


FIGURE 8 – Forçage radiatif net moyen annuel des nuages (d’après D. Hartmann)

On peut mener par ailleurs le raisonnement suivant :

A. L’augmentation de la température terrestre de 1°C, qui correspond à un peu plus de 3 W.m⁻², représente environ 7% de l’effet de serre lié à l’eau.

B. Dans une atmosphère tropicale sans nuage, l’effet de serre atteint cependant 125 W.m⁻² (voir [Fouquart 15]) et, si on enlève la vapeur d’eau, il est encore de 53 W.m⁻², soit 35% de la valeur totale de l’effet de serre (approximativement 151 W.m⁻² - voir note 10). En revanche, si on enlève seulement le CO₂, il demeure de 94 W.m⁻², soit environ 75% de l’ensemble (94/125).

C. Donc, si la température globale de la planète s’est élevée de 1°C et si l’on a, comme on l’a dit, une augmentation de 7% de l’effet de serre, cette fraction n’est pas loin de correspondre entièrement à de la vapeur d’eau. On a en effet :

$$\frac{94 \times 7}{100} \approx 6,6.$$

En clair, ce résultat montre qu’une augmentation de l’effet de serre est du même ordre de grandeur qu’une augmentation de la vapeur d’eau dans une atmosphère où l’on a déjà enlevé le CO₂.

8 Le nuage noir

Faute de pouvoir agir sur la flore et/ou la vapeur d'eau, une autre solution non-décarbonante contre le réchauffement climatique serait de créer une protection artificielle réduisant la quantité d'énergie solaire reçue par la surface de la Terre. Il y a quelques années, certains scientifiques avaient pu imaginer, à cette fin, des dispositifs du type "écrans spatiaux géants" ou "essaim de petits satellites". Le point de Lagrange L1¹⁷ du système Terre-Soleil pourrait apparaître alors comme un emplacement idéal pour ombrager efficacement la planète. Une telle approche, cependant, présente plusieurs difficultés, telles que le maintien du dispositif en orbite face à la pression du rayonnement solaire ou, déjà, l'envoi du matériel requis – plus de 10^9 kg – au point L1, ce qui est environ cent fois supérieur à tout ce que l'homme a envoyé dans l'espace à ce jour.

Il existe cependant une solution alternative qui permettrait de contourner le problème : l'utilisation de grains de poussière micrométriques en guise de bouclier thermique.

Une équipe de l'Université de l'Utah (voir [Bromley 23]) a récemment proposé un scénario digne du roman de Fred Hoyle, *Le nuage noir* (voir [Hoyle 62]). Les chercheurs ont montré que l'utilisation de poussière pour bloquer une partie de la lumière solaire aurait l'insigne avantage d'atténuer le changement climatique sans avoir d'impact à long terme sur notre planète ou son atmosphère. Leurs travaux s'inspirent du processus de formation des planètes, lequel s'accompagne en effet de grandes quantités de poussière, tournant autour d'une étoile hôte. Ces anneaux de poussière interceptent la lumière de l'étoile et la ré-émettent, y compris en direction de la Terre, ce qui

17. Un point de Lagrange (noté L1 à L5), ou, plus rarement, point de libration, est une position de l'espace où les champs de gravité de deux corps en mouvement orbital l'un autour de l'autre, et de masses substantielles, fournissent exactement la force centripète requise pour que ce point de l'espace accompagne simultanément le mouvement orbital des deux corps. Dans le cas où les deux corps sont en orbite circulaire, ces points représentent les endroits où un troisième corps, de masse négligeable, resterait immobile par rapport aux deux autres, au sens où il accompagnerait à la même vitesse angulaire leur rotation autour de leur centre de gravité commun sans que sa position par rapport à eux n'évolue. Le point de Lagrange L1 du système Terre-Soleil, situé entre la Terre et le Soleil – instable comme les points L2 et L3 – est beaucoup plus proche de notre planète. Notons que la présence d'un écran à cet endroit interdirait sans doute les observations qu'on y mène habituellement. En effet, L1 est couramment utilisé pour mesurer l'activité solaire (éruptions, cycles, vent solaire) sans que celle-ci ne soit affectée par la magnétosphère terrestre. C'est donc la position idéale pour des missions de météorologie spatiale comme celle remplie actuellement par SoHO et ACE. Le point L1 a été également choisi pour positionner le télescope NEO Surveyor destiné observer une grande portion de l'espace dans lequel circulent les géocroiseurs.

permet d'ailleurs de repérer les systèmes stellaires avec des planètes en formation. L'idée serait de créer artificiellement un tel processus en plaçant une petite quantité de matière poussiéreuse sur une orbite spéciale entre la Terre et le Soleil, ce qui permettrait de bloquer une grande partie de la lumière solaire avec une toute petite quantité de masse.

L'efficacité globale d'un tel bouclier dépend bien évidemment de sa capacité à se maintenir sur une orbite telle que la Terre soit ombragée. L'équipe a donc évalué l'atténuation induite par différents types de poussières, puis déterminé les orbites susceptibles de maintenir la poussière en position suffisamment longtemps pour fournir une ombre adéquate (voir Fig. 9).

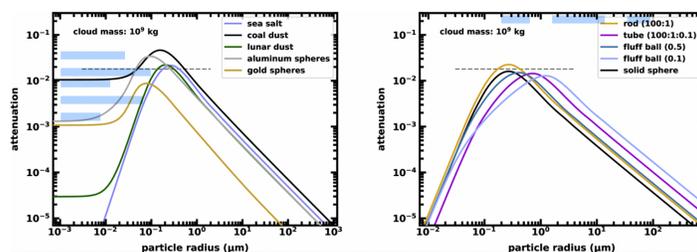


FIGURE 9 – Attenuation of a monodispersed cloud of particles with a total mass of 10^9 kg at point L1, as a function of radius : (left) attenuation for spherical particles of different types of materials ; (right) attenuation for glass dust of different shapes. (According to [Bromley 23])

Les calculs incluent les variations des propriétés des grains et des solutions orbitales en fonction des perturbations lunaires et planétaires, ont précisé les chercheurs qui visaient une réduction de l'irradiance solaire de 1,8%, correspondant à 6 jours d'atténuation par an.

L'équipe estime qu'environ 10^{10} kg de poussière par an seraient nécessaires pour obtenir un résultat significatif sur le climat, en fonction des propriétés de la poussière et de la façon dont le nuage est déployé. De nombreux problèmes, cependant, se posent. Les simulations informatiques ont en effet montré que la poussière était facilement déviée de sa trajectoire par les vents solaires, les radiations et la gravité au sein du système solaire. Il faudrait ainsi prévoir une importante réserve de poussières, afin de pouvoir en envoyer régulièrement après chaque dissipation du nuage (voir Fig. 10). Les sources potentielles de ces poussières pourraient être la Terre, la Lune ou éventuellement un astéroïde dévié.

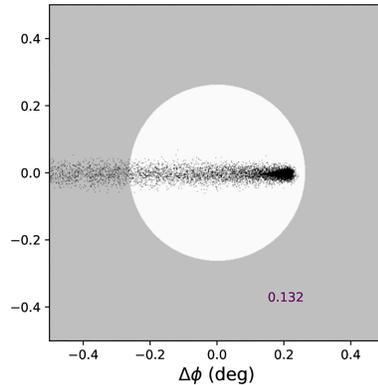


FIGURE 10 – Localisation de grains de taille micrométrique simulés, lancés en continu depuis un orbiteur à L1, vus depuis la Terre. L’image montre l’emplacement des grains 48 jours après le début de la simulation (d’après [Bromley 23])

Il ressort de l’étude que l’une des approches les plus prometteuses consiste à utiliser des grains duveteux à forte porosité pour augmenter l’efficacité de l’extinction par unité de masse, et à lancer ce matériau en jets dirigés depuis une plateforme située en orbite autour de L1, où les forces gravitationnelles sont équilibrées. En effet, un objet de masse négligeable situé sur un point de Lagrange reste immobile relativement aux deux corps en mouvement orbital et tourne avec eux. Une telle solution entraînerait cependant des coûts et des efforts importants.

Une approche plus simple et plus économique consisterait à éjecter par voie balistique des grains de poussière de la surface de la Lune vers le point L1. Les auteurs affirment que le fait de lancer de la poussière lunaire depuis la Lune pourrait constituer un moyen bon marché d’ombrager la Terre pendant plusieurs jours. Les avantages par rapport à un lancement terrestre tiennent à l’existence d’un réservoir de poussière prêt à l’emploi sur la surface lunaire et également à une énergie cinétique moindre nécessaire pour atteindre une orbite de protection solaire.

On notera que l’étude n’a fait pour l’instant qu’explorer l’impact potentiel de la stratégie envisagée et n’a pas déterminé si ces scénarios étaient réalisables d’un point de vue logistique.

Le renouvellement régulier des poussières pourrait apparaître comme un aspect contraignant de cette approche, mais le caractère temporaire du nuage de poussière est aussi un avantage : chaque nuage ne persiste que quelques jours avant que la poussière ne soit dispersée dans tout le Système solaire, il n’y a donc aucun risque que la Terre

ne devienne froide et inhospitalière¹⁸.

9 Conclusion

1. Le seul fait d'augmenter la température provoque l'effet de serre même si on ne forme pas un nuage ;
2. Cependant, une diminution d'eau dans les sols fait qu'on n'atteint pas le niveau de saturation (transformation de l'eau en vapeur), ce qui risque de diminuer la couverture nuageuse et de faire augmenter l'effet de serre.
3. Les plantes créent ce qu'il faut pour améliorer la nucléation des gouttelettes. Toutefois, s'il y a moins de plantes, l'eau restera en suspension dans l'air au risque de s'évaporer ou de former des nuages de haute altitude, lesquels, comme on l'a vu plus haut, contribuent à l'augmentation de l'effet de serre.
4. Il n'est donc pas certain qu'on agisse le plus efficacement sur le réchauffement climatique par une politique du type "zéro carbone", qu'on aura de toute façon du mal à imposer, non seulement aux pays en voie de développement, mais également aux pays industrialisés, lesquels ne diminuent d'ailleurs leur empreinte carbone qu'en la déplaçant sur les premiers et aux prix de contraintes sociales entraînant des risques de déstabilisation graves. De ce point de vue, la politique "zéro-carbone" en matière climatologique fait un peu penser à la politique "zéro-Covid" adoptée par la Chine en matière épidémiologique. Tôt ou tard ce genre de politique devient insupportable, et si l'on ne veut pas qu'alors tout dégénère, il convient de préparer longtemps à l'avance une politique alternative.
5. On agirait plus sûrement en évitant que la couverture végétale terrestre ne se détériore (car toute disparition de plantes est problématique¹⁹) et en gérant correc-

18. Un autre avantage serait que le nuage – qui n'est pas, comme un écran ou une plate-forme orbitale, un corps opaque permanent – ne perturberait que momentanément les observations habituellement faites depuis le point L1.

19. Les forêts sont aussi des puits de carbone. Les arbres stockent du CO₂ tout au long de leur vie. La déforestation réduit donc la capacité de l'écosystème mondial à stocker du CO₂ et contribue à augmenter l'effet de serre. Or la couverture forestière de la Terre diminue régulièrement. Ainsi, la forêt amazonienne a perdu 72 millions d'hectares entre 1985 et 2018, c'est-à-dire 10% de son extension en l'espace de 34 ans, ce qui ne peut pas être sans conséquence sur le climat. D'une façon générale, selon un rapport de l'IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) de mai 2019, la surface forestière observée à cette date sur Terre représente 68% de celle estimée à l'ère préindustrielle ([Lecomte et al. 20], 494-495).

tement les ressources dont nous disposons, voire en les augmentant²⁰. L'infiltration²¹ des sols cultivés mondiaux a été divisée par 5 en un siècle à cause de mauvaises pratiques agricoles et de politiques de construction aberrantes. Or sans infiltration, les inondations sont immédiates en cas d'intempéries majeures, la sécheresse n'est que différée et l'ensoleillement direct est accru.

Il n'est donc pas impossible, après tout, que, contrairement à l'intuition, l'augmentation de l'effet de serre soit due – sinon principalement, du moins en partie – à la sécheresse. Il est banal de lier l'existence des déserts à l'absence d'eau. Il est moins banal de se rendre compte que c'est plutôt un défaut de végétation qui, potentiellement, sinon provoque le réchauffement climatique, du moins y contribue de manière non négligeable.

6. Enfin, à défaut de pouvoir agir sur la flore ou les nuages naturels, on pourrait envisager – comme expliqué plus haut – la création d'un bouclier thermique autour de la Terre, sous la forme d'un nuage de poussière destiné à l'ombrager de façon temporaire – solution réversible et apparemment sans impact sur la planète²².

20. Contrairement au captage direct du CO₂ dans l'air et à son stockage par des procédés chimiques convertissant le carbone en forme solide pour l'enterrer (procédé intensif en énergie et onéreux), l'extension de ces puits de carbones naturels que sont les forêts, les tourbières ou les océans, serait beaucoup plus accessible. Evidemment, la superficie nécessaire pour réduire significativement les niveaux de CO₂ par la plantation d'arbres – qui pourrait aller jusqu'à deux fois la taille de l'Inde (voir [Bastin et al. 19]) – entre en concurrence avec d'autres priorités, comme les cultures à destination de l'alimentation. Elle pourrait également avoir une influence négative sur la biodiversité et, les incendies risquant de se multiplier avec le réchauffement climatique, les nouvelles forêts seraient aussi sujettes à partir rapidement en fumée, entraînant la libération de tout le CO₂ stocké. Par ailleurs, on ne peut pas étendre la superficie des océans, qui absorbent déjà plus de 30% des émissions de carbone de l'humanité. Cependant, par une "météorisation augmentée", procédé consistant à extraire et à broyer des roches riches en minéraux absorbant naturellement le CO₂, puis à les répandre sur terre ou surtout en mer, on pourrait accélérer un processus qui se déroule normalement sur des échelles de temps géologiques de plusieurs dizaines de milliers d'années. Naturellement, une question est de savoir si cela peut être mis en œuvre à une échelle suffisante, et à quel prix. Une autre est de vérifier jusqu'à quel point on pourrait accroître cette capacité d'absorption des océans. Il semble qu'une solution pourrait être de renforcer artificiellement l'alcalinité marine ou de les "fertiliser", c'est-à-dire d'augmenter la densité du phytoplancton qui produit et séquestre le carbone organique par photosynthèse. Mais les effets secondaires sur les écosystèmes et la possibilité de transposer cette méthode à grande échelle sont encore mal connus (Sur les solutions naturelles du problème du changement climatique, voir [Griscom et al. 17]; [Dreyfus et al 22]; [Law et al. 18]).

21. Le terme semble malheureusement absent des rapports du GIEC.

22. Il faudrait néanmoins vérifier que l'ajout de ces poussières aux déjà nombreux débris (voir [Parrochia 99]) qui tournent autour de la planète n'aura pas de conséquence sur le lancement futur d'engins ou les sorties extra-véhiculaires des astronautes lors des réparations qu'ils sont amenés à faire sur les engins spatiaux qu'ils utilisent.

Références

- [Arrhenius 10] Arrhenius, S., *L'Evolution des Mondes*, tr. fr. T. Seyrig, Librairie Polytechnique Ch. Béranger, éditeur, Paris, 1910.
- [Ball 14] Ball, T., *The Deliberate Corruption of Climate Science*, Stairway Press, Apache Junction (Arizona), 2014.
- [Bastin et al. 19] Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., Crowther, Th. W., "The global tree restoration potential", *Science*, Vol 365, Issue 6448, 76-79, 5, Juillet 2019. DOI : 10.1126/science.aax0848
- [Berger 78] Berger, A. L., "Théorie astronomique des paléoclimats, une nouvelle approche", *Bull. Soc. Belge Géologie*, tome 87, fasc. 1, 9-25, Bruxelles, 1978.
- [Berger et al. 06] Berger A. et Loutre, M.-F., "Théorie astronomique des paléoclimats", *C. R. Geosci.*, 2004, vol. 336, 701-709, 2006.
- [Biskaborn et al. 19] Biskaborn, B. K., Smith, S. L., Noetzli, J. (et 45 autres), "Permafrost is warming at a global scale", *Nature communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>, 2019.
- [Boucher et al. 04] Boucher, O., Myhre, G. & Myhre, A., "Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate", *Climate Dynamics*, 22, 597-603, 2004.
- [Bromley 23] Bromley B. C., Khan, S. H., Kenyon S. J., "Dust as a solar shield", *PLOS Clim*, 2 (2), 8 février 2023, <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000133>.
- [Crowley et al. 91] Crowley, T. J., North, G. R., *Paleoclimatology*, University Press, Oxford, 1991.
- [Daw 09] Dawidoff, "The Civil Heretic", *New York Times Magazine*, 25 Mars, 2009.
- [Deheuvels 23] Deheuvels, P., "La religion du carbone", Société de calcul mathématique, 9 février 2023, <https://climatetverite.net>.
- [Dreyfus et al 22] Dreyfus, G.B., Xu, Y., Shindell, D. TT. and Ramanathan V., "Mitigating climate disruption in time : A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming", *PNAS*, 119, 22, May, 23, 2022. <https://doi.org/10.1073/pnas.2123536119>
- [Dufresne 08] Dufresne, J.-L., "La détermination de la constante solaire par Claude Pouillet", *La Météorologie*, no 60, 3643, février 2008.
- [Farmer 74] Farmer, V. C., "The Infrared Spectra of Minerals". *Mineralogical Society*, London, 1974. <http://dx.doi.org/10.1180/mono-4>.

- [Fouquart 15] Fouquart, Y., "La vapeur d'eau, principal gaz à effet de serre, devant le CO₂", Dossier "Climatologie, changement climatique, gaz à effet de serre", Futura Planète, <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-tout-savoir-effet-serre-1954/page/12/>
- [Gervais 13] Gervais, F., *L'Innocence du carbone : L'effet de serre remis en question*, Albin Michel, Paris, 2013.
- [Griscom et al. 17] Griscom B. W., Adams, J., Ellis, P. W, Fargione, J., et al., "Natural Climatic Solutions", *PNAS*, 114 (44) 11645-11650, October 16, 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>.
- [Hansen et al. 05] Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G.A., and Tausnev, N., "Earth's Energy Imbalance : Confirmation and Implications", *Science*, (308) 1431-1435, 2005.
- [Hartmann et al. 01] Hartmann, D. L., Moy, L. A., & Fu, Q., "Tropical convection and the energy balance at the top of the atmosphere", *Journal of Climate*, 14(24), 4495-4511, 2001.
- [Hartman et al. 18] Hartmann, D. L., Gasparini, B., Berry, S. E., & Blossey, P. N., "The life cycle and net radiative effect of tropical anvil clouds", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 3012-3029, 2018.
- [Hays et al. 76] Hays, J.D., J. Imbrie, and N.J. Shackleton, "Variations in the Earth's orbit : Pace-maker of the ice ages", *Science*, 194, 1121-1132, 1976.
- [Hoyle 62] Hoyle, F., *Le nuage noir*, tr. fr., Dunod, Paris, 1962
- [Hug 98] Hug, H., "The Climate Models are inadequate", *Nachrichten aus der Chemie* 61(2), 132-132, 1998.
- [Kauppinen 19] Kauppinen, J., Malmi, P., "No experimental evidence for the significant anthropogenic climate change", arXiv :1907.00165v1 [physics.gen-ph] 29 Jun 2019.
- [Koonin 21] Koonin, S. E., *Unsettled : What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*, Benbella Books, Dallas, 2021.
- [Kopp et al. 11] Kopp, G., Lean, J. L., "A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance", *Geophysical Research Letters*, 14 January 2011, <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>.
- [Kusnir 00] Kushnir, Y., "Solar Radiation and the Earth's Energy Balance", Published on *The Climate System*, complete online course material from the Department of Earth and Environmental Sciences at Columbia University. Accessed December 12, 2008.

- [Lamb 95] Lamb, H.H., *Climate History and The Modern World*, 2nd ed., Routledge, London, 1995.
- [Landais 16] Landais, A., "Reconstruction du climat et de l'environnement des derniers 800 000 ans à partir des carottes de glace – variabilité orbitale et millénaire", *Quaternaire*, 27/3, 197-212, 2016.
- [Laskar 89] Laskar, J., « A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System », *Nature*, vol. 338, no 6212, 16 mars 1989, p. 237-238.
- [Law et al. 18] Law, B. E., Hudiburg, T. W., Berner, L. T., Harmon, M. E., "Land use strategies to mitigate climate change in carbon dense temperate forests", *PNAS*, 115 (14) 3663-3668, March 19, 2018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720064115>
- [Lecomte et al. 20] Lecomte J. et Sarrazin, F., « Repenser nos relations au vivant dans un contexte de changements globaux », in A. Aurias, R. Lehoucq, D. Suchet, J.Vincent (dir.), *Nos futurs : imaginer les possibles du changement climatique*, ActuSF, 2020.
- [Lindsey 09] Lindsey, R., "Climate and Earth's Energy Budget", Earth Observatory, January 14, 2009.
- [Mackenzie 98] Mackenzie, F.T., *Our changing planet*, Prentice Hall, Kent, 1998.
- [Mann 98] Mann, M.E., Bradley, R.S. et Hughes, M.K., "Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries", *Nature*, 392 779-787, 1998. 20
- [Martinez et al. 15] Martinez, M., Dera, G., "Orbital pacing of carbon fluxes by a ~9-My eccentricity cycle during the Mesozoic", *PNAS*, 112, (41), 12604-12609, 28 Septembre 2015.
- [Melières 07] Melières, M.-A., "La théorie astronomique du climat", *Dossier Climat*, CNRS, <https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/sysfacte/soleil/soleil1.html>.
- [Meyers et al. 01] Meyers S. R., Sageman B. B. et Hinnov L. A., "Integrated quantitative stratigraphy of the Cenomanian-Turonian bridge creek limestone member using evolutive harmonic analysis and stratigraphic modeling", *J. Sediment. res.*, vol. 71, 628-644, 2001.
- [Milankovitch 20] Milankovitch, M., *Théorie Mathématique des Phénomènes Thermiques produits par la Radiation Solaire*, Académie Yougoslave des Sciences et des Arts de Zagreb, Gauthier-Villard, Paris, 1920.
- [Milankovitch 30] Milankovitch, M., "Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie des Klimaschwankungen", *Handbuch der Klimatologie*, Band I, Teil A, Borntraeger, Berlin, 1930.

- [Milankovitch 41] Milankovitch, M., *Canon of Insolation and the Ice-Age Problem*, Koniglich Serbische Akademie, Beograd, 1941. English translation by the Israel Program for Scientific Translations and published for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington D.C.
- [Myhre et al. 13] Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, and H. Zhang, "Anthropogenic and natural radiative forcing", in T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, Eds, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 659-740, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [Parrochia 97] Parrochia, D., *Météores, essai sur le ciel et la cité*, Champ Vallon, Seyssel, 1997.
- [Parrochia 99] Parrochia, D., "Les déchets cosmiques", in J.-C. Beaune (ed.), *Le déchet, le rebut, le rien*, 50-62, Champ Vallon, Seyssel, 1999.
- [Parrochia 10] Parrochia, D., *Le cas du K2, mathématiques et alpinisme*, Le Corridor Bleu, Paris, 2010.
- [Parrochia 21] Parrochia, D., *Antidote, contre le climato-dogmatisme et les discours apocalyptiques*, Le Corridor Bleu, Saint-Pierre, 2021.
- [Peixoto et al. 92] Peixoto, J., and Oort, A., *Physics of Climate*, Woodbury, NY : American Institute of Physics Press, 1992.
- [Postel-Vinay 15] Postel-Vinay, O., *La comédie du climat – Comment se fâcher en famille sur le réchauffement climatique*, Editions J.C. Lattès, Paris, 2015.
- [Revelle 57] Revelle, R. et Suess, H.E., "Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades", *Telus*, 9 (1), 18-27, 1957.
- [Schmidt et al. 10] Schmidt et al., "Attribution of the present-day total greenhouse effect", *J. Geophys. Res.* 115, 1-6, 2010.
- [Schneider 71] Schneider, S.H. et Rasool, S.I., "Atmospheric carbon dioxide and aerosols : effects of large increases on global climate", *Science*, 173, 138-141, 1971.
- [Thomas 00] Thomas, P., "Température de surface des planètes et effet de serre", *Planète Terre*, Ressources scientifiques pour l'enseignement des sciences de la Terre et de l'univers, ENS Lyon, <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/temperature-de-surface.xml>, Article | 20/07/2000.

- [Trenberth et al. 09] Trenberth, K., Fasullo, J., Kiehl, J., "Earth's global energy budget", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009/
- [Weedon et al. 99] Weedon G. P., Jenkyns H. C., Coe A. L. et Hesselbo S. P., "Astronomical calibration of the Jurassic time-scale from cyclostratigraphy in British mudrock formations", *Phil. Trans. Royal Soc.*, vol. 357; 1787-1813, 1999.
- [Wegman 06] Wegman, E. J., Scott D. W., Said, Y. H., "Ad hoc Committee Report on the 'Hockey Stick' global climate reconstruction", 2006 : https://climateaudit.files.wordpress.com/2007/11/07142006_wegman_report.pdf.