



HAL
open science

Le Soleil a rendez-vous avec la Terre

Gilles Ramstein, Philippe Ciais

► **To cite this version:**

Gilles Ramstein, Philippe Ciais. Le Soleil a rendez-vous avec la Terre. Clefs CEA, 2004, 49, pp.78-85. <hal-03327532>

HAL Id: hal-03327532

<https://hal.science/hal-03327532v1>

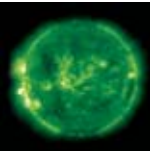
Submitted on 27 Aug 2021

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.



HAL Authorization



L'influence du Soleil sur le climat des planètes telluriques tient à la fois à l'évolution de l'astre lui-même, à leur position par rapport à lui et à la composition de leur atmosphère. Sur Terre, l'activité humaine s'ajoute aux facteurs géologiques pour influencer le climat de manière accélérée.

Le Soleil a rendez-vous avec la Terre

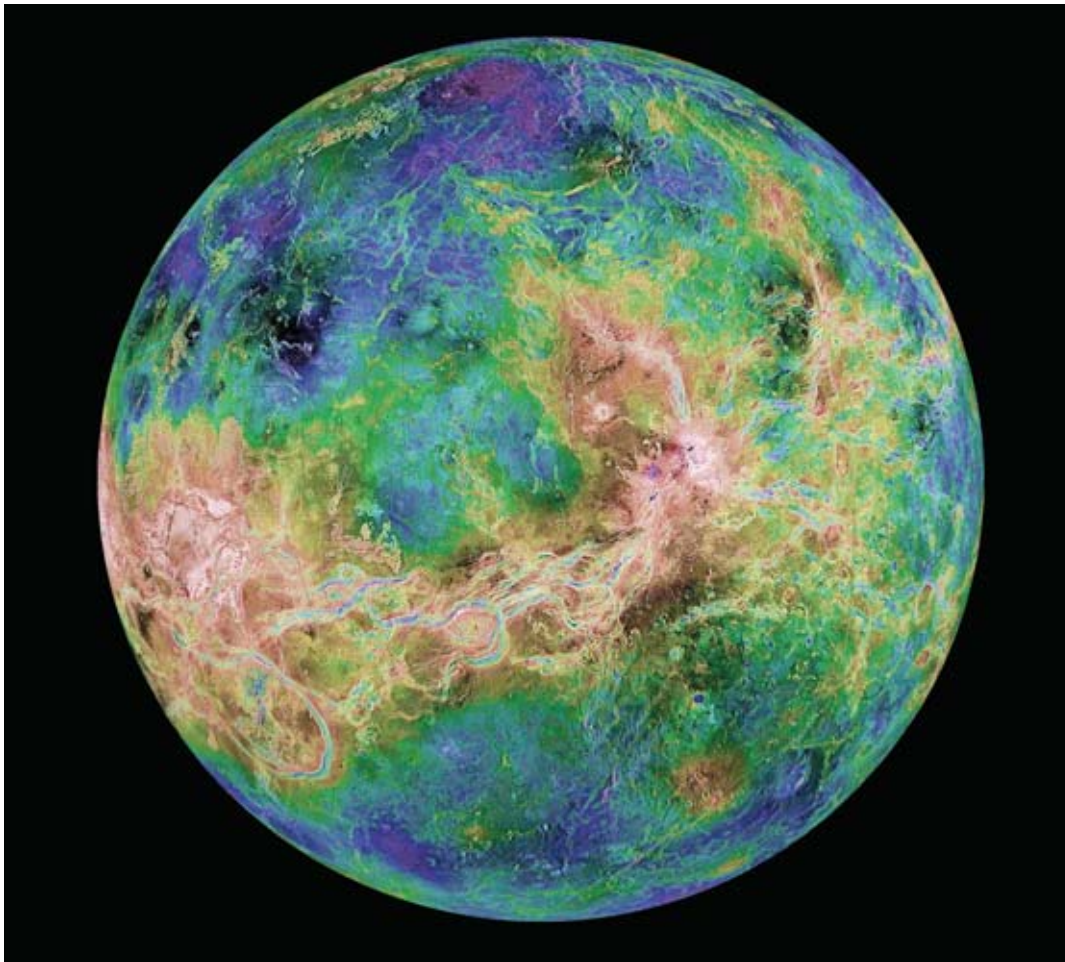


Vue de l'espace, la Terre mérite son surnom de planète bleue.

Une Terre bleue et différente

La température au sol des planètes telluriques qui ne possèdent pas ou peu d'atmosphère est essentiellement déterminée par leur position par rapport au Soleil. Mercure, par exemple, la plus proche du Soleil, voit son sol dardé de plein fouet par ses rayons, enregistrant des températures diurnes de 430 °C, alors que les températures nocturnes descendent à -100 °C. Et pas moyen pour elle de lutter contre les forts contrastes saisonniers : nul océan pour en adoucir les variations sur sa surface burinée ! Que dire de nos deux proches voisines, Mars et Vénus ? Mars, la plus éloignée, a probablement connu des périodes plus fastes qu'aujourd'hui, où elle ne dispose plus que

d'une atmosphère très ténue de gaz carbonique et où les températures oscillent entre +20 °C le jour et -140 °C la nuit. Son climat a sans doute beaucoup changé. D'abord parce que l'obliquité de l'axe de rotation de Mars peut varier, plus que celle de la Terre, dont la Lune réduit drastiquement le débattement. Ensuite parce que, comme sur Terre, la présence de gaz à effet de serre (GES) et surtout du dioxyde de carbone, jusqu'à $2 \cdot 10^5$ pascals (2 bars) dans sa prime jeunesse, a permis à la planète de connaître un climat plus clément. Le cas de Vénus est différent : son atmosphère très dense et riche en GES l'a transformée en enfer avec des températures de 470 °C au sol ! Entre ces deux planètes, la Terre, dont les températures au sol permettent la présence d'eau sous ses



NASA/JPL

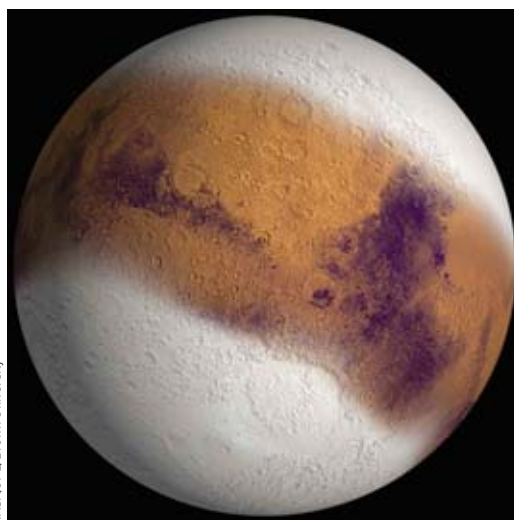
Image de Vénus (en fausses couleurs) obtenue grâce aux données du radar de la sonde Magellan.

trois phases, dispose d'océans, parfois de calottes de glace et, très présente dans son atmosphère, de vapeur d'eau, principal gaz à effet de serre. Seule la Terre, jusqu'à preuve du contraire, héberge la vie. Est-ce dû à sa position privilégiée par rapport au Soleil, plus proche de lui que Mars-la-froide et plus éloignée que Vénus-la-fournaise ?

Une histoire plus tourmentée qu'on ne le pensait...

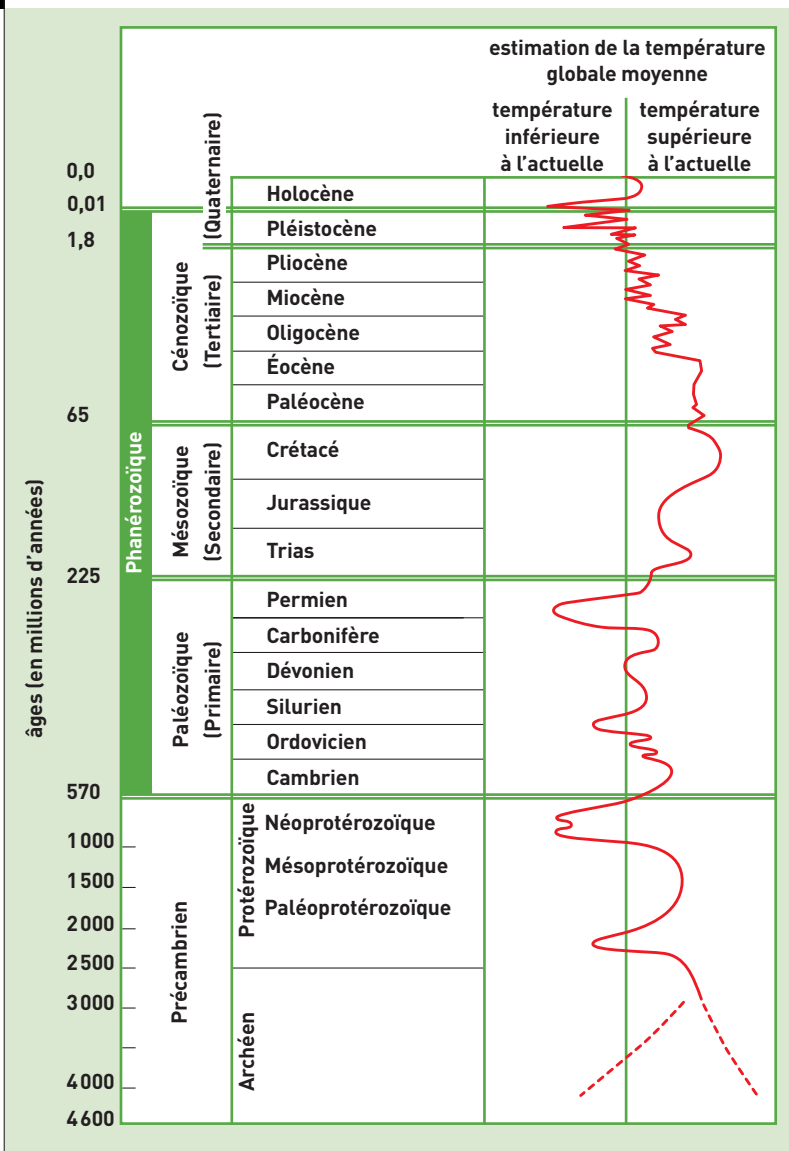
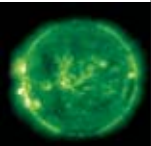
En fait, l'histoire climatique de toutes ces planètes est très liée à l'évolution du Soleil lui-même. Or, celui-ci n'a pas toujours été aussi éclatant qu'aujourd'hui. Dans son enfance, le soleil était plus "pâle" d'environ 20%. Il y a encore 800 millions d'années (Ma), par exemple, son rayonnement était plus faible, de l'ordre de 6%, du niveau "nominal" qu'il a lentement atteint. Une telle faiblesse de la part de l'astre autour duquel elles gravitent aurait dû être fatale aux jeunes Terre, Mars et Vénus, conduisant inéluctablement à des températures négatives. Or il n'en a rien été : le dégazage du manteau en vapeur d'eau, dioxyde de carbone, **méthane** et autres GES a permis à ces planètes de connaître, en leur jeune âge, un climat

bien plus clément. Par la suite, leurs climats se sont différenciés. Mars et Vénus ont connu les avatars que l'on sait, sans doute après des périodes climatiques moins extrêmes. Quant à la Terre, n'a-t-elle évolué sous ce même Soleil qu'entre des climats chauds, comme ceux du Crétacé où s'épanouirent les



NASA/JPL/Brown University

Simulation de Mars telle que la planète aurait pu apparaître au paroxysme d'un relativement récent âge glaciaire. (Avec l'autorisation de Nature Publishing Group ; Nature vol. 426, n° 6968.)



(Source : Climat d'hier à demain, S. Jousseaume, 1999)

Figure 1. Évolution des températures terrestres à travers les âges géologiques.

dinosaures, et de grandes glaciations comme celles du Quaternaire que l'homme de Néandertal a connues en Europe (figure 1) ?

On pense aujourd'hui que non. Non seulement le climat de notre planète a varié avec de très longues périodes chaudes comme l'Archéen, le Carbonifère, le Crétacé sans la présence de calottes de glace, et quelques rares épisodes plus froids (représentant moins de 10 % de l'histoire climatique de la Terre) où ces calottes ont existé, comme la limite Permo/Carbonifère, l'Ordovicien et le Quaternaire dans lequel nous vivons. Mais la Terre a sans doute été en très grande partie, voire complètement, englacée au moins deux fois au Néoprotérozoïque, il y a 800 millions d'années.

La Terre blanche, scénario catastrophe ?

Les premiers modèles climatiques développés dans les années soixante, en particulier par le Russe Budyko, étaient basés sur l'utilisation par le système Terre de l'énergie solaire incidente et par sa conversion en **rayonnement infrarouge**, en tenant compte des propriétés de surface et des caractéristiques dynamique et thermique de l'atmosphère. En ont été issus à partir de la fin des années 60 des modèles à une, deux ou trois dimensions dits d'équilibre énergétique (*Energy Balance Models*). C'est en s'appuyant sur leurs résultats que Budyko démontra que si la Terre avait été totalement gelée, elle le serait encore ! En effet, le pouvoir réfléchissant de notre planète (albédo) est aujourd'hui de 0,3, ce qui signifie grossièrement que 70 % seulement de l'énergie du Soleil est utilisable pour servir de combustible à l'océan et à l'atmosphère pour redistribuer et évacuer l'énergie reçue ; 30 % du rayonnement solaire est réfléchi et n'entre pas dans le système. L'albédo d'une Terre "blanche" entièrement gelée (les continents étant recouverts de glace et les océans d'une épaisse couche de banquise) serait au moins deux fois plus élevé (0,6), ce qui signifie que seulement 40 % de l'énergie solaire serait utilisable. Pour sortir la Terre de cette léthargie profonde, il faudrait une énergie considérable, en l'occurrence un Soleil 1,25 fois plus puissant que



La Terre a connu sa dernière glaciation il y a environ 20 000 ans (à droite). A-t-elle été complètement englacée il y a 750 millions d'années ?

l'actuel, ce qui est absurde: donc la Terre n'avait pu connaître un englacement total, C.Q.F.D. Ce paradigme dura près de trente ans et ne fut radicalement remis en cause que récemment.

Le dioxyde de carbone, élément majeur

Car il manquait un élément majeur dans le beau raisonnement de Budyko: le dioxyde de carbone. En effet, notre planète est vivante au sens géologique, contrairement à la Lune ou Mars où toute activité volcanique a cessé. Si un englacement global s'y produit, cela va aussi avoir des conséquences sur le cycle du carbone à l'échelle géologique. La première étant que si les émissions volcaniques terrestres et sous-marines continuent, le dioxyde de carbone est stocké dans l'atmosphère, celui-ci n'ayant plus de "puits" à sa disposition. Et si la glaciation dure longtemps (quelques millions d'années), sa concentration atteint des taux faramineux et ses propriétés de gaz à effet de serre vont permettre la débâcle. Non seulement le dioxyde de carbone, particulièrement *via* sa teneur atmosphérique, a pu contrecarrer la faiblesse d'un Soleil jeune, mais il va également pouvoir réguler le climat de la Terre.

À l'échelle géologique, il n'est pas le seul à détenir ce privilège. La tectonique des plaques qui, depuis des milliards d'années, modifie inlassablement le visage de notre planète, détermine aussi ses climats. Nous verrons que ces deux "régulateurs" de l'activité solaire ont également des liens étroits.

Même si les quatre premiers milliards d'années de l'histoire climatique de notre planète sont moins bien connus que les 600 derniers millions d'années (le Phanérozoïque) – eux-mêmes beaucoup moins bien connus que les deux derniers millions d'années (le Quaternaire) –, une constatation est frappante. Dans un contexte de Soleil jeune et moins puissant, la Terre a connu pendant ces quatre milliards d'années des climats chauds, avec de rares glaciations: un premier épisode froid à 2,4 millions d'années et un second entre 800 et 600 millions d'années. Or, ces glaciations ne sont pas, *a priori*, liées aux variations de l'énergie solaire, mais aux changements de composition de l'atmosphère terrestre.

Les chercheurs pensent ainsi que l'émergence de la vie sous forme bactérienne a provoqué l'augmentation de la teneur en oxygène de l'atmosphère terrestre et l'oxydation du méthane, puissant gaz à effet de serre. L'atmosphère, devenant ainsi moins riche en GES très efficaces, aurait permis aux températures du sol de chuter et de produire une glaciation massive dite "huronienne", dont de nombreuses traces géologiques sont disponibles. Le second épisode de glaciation se produisit bien plus tard, alors que l'atmosphère terrestre ressemblait beaucoup plus à celle d'aujourd'hui. Une hypothèse permet cependant d'expliquer cette glaciation, qui se situe dans un contexte géologique particulier. C'est en effet la période où un supercontinent Rodinia, formé à 1,1 milliard d'années, va commencer à se déliter en plus petits fragments, entre 800 et 750 millions d'années, essentiellement en zone tropicale (figure 2). Cet événement important à l'échelle géologique pour le climat de la Terre va également avoir un impact majeur sur le taux de CO₂ atmosphérique. Tous ces petits continents vont subir érosion des roches et altération des sols et, ainsi, piéger des

quantités énormes de CO₂ qui vont être transportées au fond des océans. Cela va entraîner une baisse de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, qu'il est possible d'évaluer à l'aide d'un modèle climat/carbone à 1 000 ppm (parties par million), et donc une diminution considérable de l'effet de serre de l'atmosphère, ce qui expliquerait les traces de glaciation. Reste à comprendre pourquoi cette dernière a pu être globale.

Des glaciations précambriennes à celles du Phanérozoïque

Un premier paradoxe des glaciations précambriennes tant huronienne que néoprotozoïque apparaît: le paléomagnétisme permet de savoir qu'elles ont eu lieu à basse latitude, alors que toutes les glaciations, depuis 530 millions d'années, se situent toujours à haute latitude, ce qui est parfaitement cohérent avec la distribution d'énergie solaire en fonction des latitudes (figure 3). Mais d'autres paradoxes autour de ces glaciations du Néoprotozoïque n'ont cessé

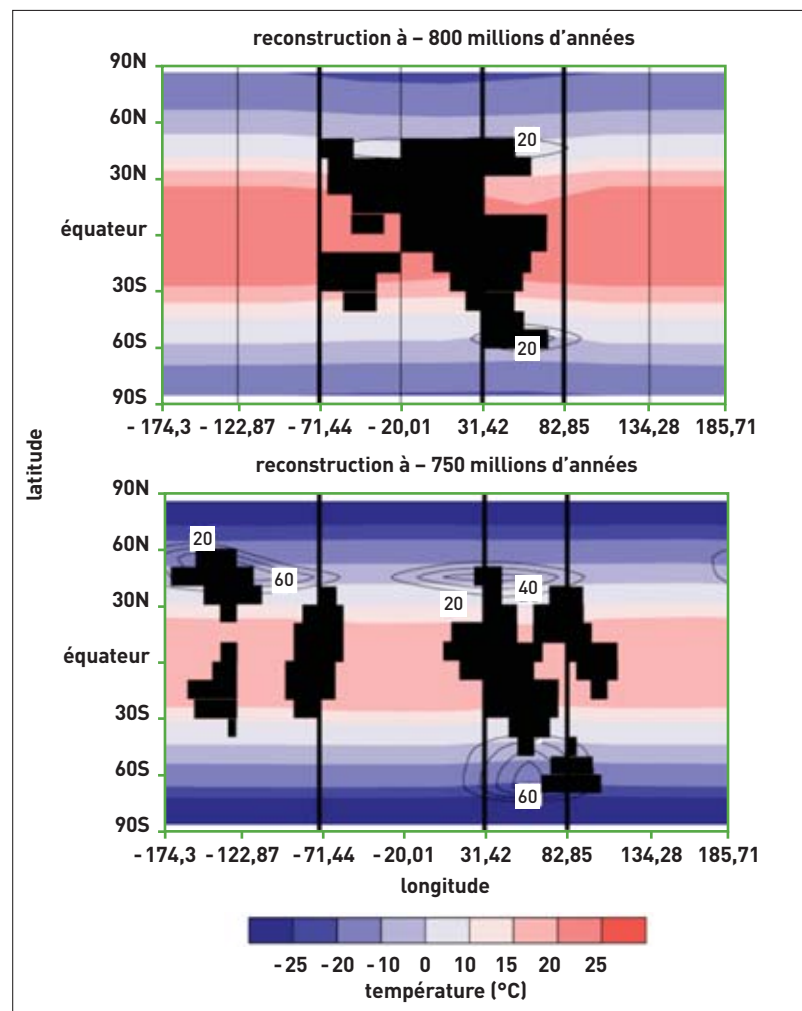
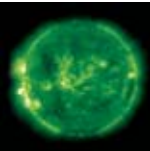


Figure 2. Simulations du climat terrestre avant et après la fragmentation du supercontinent Rodinia, il y a respectivement 800 et 750 millions d'années. Les premiers résultats montrent que le modèle s'équilibre à une teneur en gaz carbonique (pCO₂) respectivement de 1 800 ppm et 500 ppm, soit une température globale moyenne qui passe dans le même temps de 10,2 °C à 2 °C. Avant la fragmentation, une position tropicale des continents ne semble pas être une condition suffisante à la formation de calottes de glace continentale, même si le climat est relativement froid. Après l'éclatement du Rodinia, la configuration [continents plus petits et plus dispersés] apparaît très favorable au déclenchement d'une glaciation importante (N.B. ces simulations ne prennent pas en compte les phénomènes volcaniques qui, par l'altération plus rapide des basaltes, vont produire une glaciation globale).



d'intriguer géologues et géophysiciens ces trente dernières années.

Le premier de ces paradoxes est le retour de ce qu'on appelle les "BIF" (de l'anglais *Banded Iron Formations*, formations de fer rubané), qui avaient disparu à 2,4 milliards d'années, lorsque l'oxygène de l'atmosphère et de l'océan permettait l'oxydation et la dissolution du fer. Pourquoi y aurait-il eu vers 800 Ma un retour à un océan anoxygène (pauvre en oxygène) ? Une seconde énigme est l'observation de variations de la teneur en carbone 13, l'isotope lourd stable du carbone. Enfin, dernier caractère spectaculaire de ces glaciations, les indices de glaciation : les tillites (un type de moraine glaciaire), sont surmontées d'une épaisse couche de carbonate, comme on en trouve aujourd'hui dans les mers chaudes du globe.

Paul Hoffman, professeur à Harvard, a pour la première fois donné, en 1994, avec la théorie de la "snowball Earth", un cadre conceptuel susceptible d'expliquer tous ces paradoxes. En effet, une glaciation globale permettait à la fois de comprendre le retour des "BIF" dans un océan recouvert d'une épaisse couche de banquise et très peu oxygéné, et les variations du carbone 13 liées à un arrêt total du cycle du carbone. Le dioxyde de carbone émis par les volcans se serait trouvé emmagasiné dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'à la suite d'un "méga-effet de serre" la débâcle se produise et que la Terre se réchauffe, produisant par une érosion très rapide due à de très fortes précipitations un enfouissement de carbonate produisant les "cape carbonate" qui surmontent les sédiments glaciaires.

L'histoire climatique de la terre dans les centaines de millions d'années qui vont suivre, avec un Soleil ayant atteint une puissance proche de celle que nous connaissons aujourd'hui, va être rythmée essentiellement par la tectonique des plaques. Dès le début du vingtième siècle, lorsque Alfred Wegener exposa sa théorie de la dérive des continents, son beau-père Wladimir Koppen produisit les premières cartes climatologiques associées à ces dérives en latitude. Ainsi, il y a 300 millions d'années, une très forte glaciation eut lieu dans l'hémisphère Sud, lorsque le sud du supercontinent

Gondwana occupait une position polaire. Les traces de cette glaciation se retrouvent en Afrique, en Amérique du Sud, en Inde, en Australie et dans l'Antarctique (figure 3). En fait, les périodes de glaciation qui nécessitent qu'un continent occupe une position polaire sont plutôt rares et ce sont les périodes chaudes, sans trace de glaciation, qui dominent ces 530 derniers millions d'années. Le paysage va changer avec l'englacement progressif de l'Antarctique, à la fin du Tertiaire, et celui du Groenland plus récemment, il y a 3 millions d'années.

Variation des paramètres orbitaux

Le Soleil n'est donc plus, depuis le Cambrien, le moteur des changements climatiques à l'échelle géologique. Au Quaternaire, la variation des paramètres orbitaux de la Terre constitue l'horloge séculaire du climat de notre planète. Paradoxalement, cette ère va être bercée par les variations de ces paramètres, qui déterminent la quantité d'insolation parvenant du Soleil au sommet de notre atmosphère et vont avoir des conséquences climatiques extrêmes. À des échelles de temps de dizaines de milliers d'années, les calculs de mécanique céleste montrent que l'excentricité de l'orbite de la Terre varie de 0 à 0,6 avec des périodes de 100 000 et 400 000 ans, que l'obliquité varie de +/- 1 ° autour de 23,5 °, avec une période de 41 000 ans, et qu'enfin la précession des équinoxes varie également, avec des fréquences de 19 000 et 23 000 ans⁽¹⁾ (figure 4). Ces calculs, qui portent sur plusieurs millions d'années, ont été réalisés par Jacques Laskar, de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (Bureau des longitudes), et André Berger, professeur à Louvain-la-Neuve. Ils avaient été initiés dès 1940 par un scientifique serbe. Milutin Milankovitch avait eu l'intuition géniale de rapprocher la baisse d'insolation estivale aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, due aux variations séculaires des paramètres orbitaux et qui se produisait environ tous les 100 000 ans, de l'occurrence

(1) Les deux derniers effets créent des différences d'éclairement respectivement de 15 et 65 W/m².

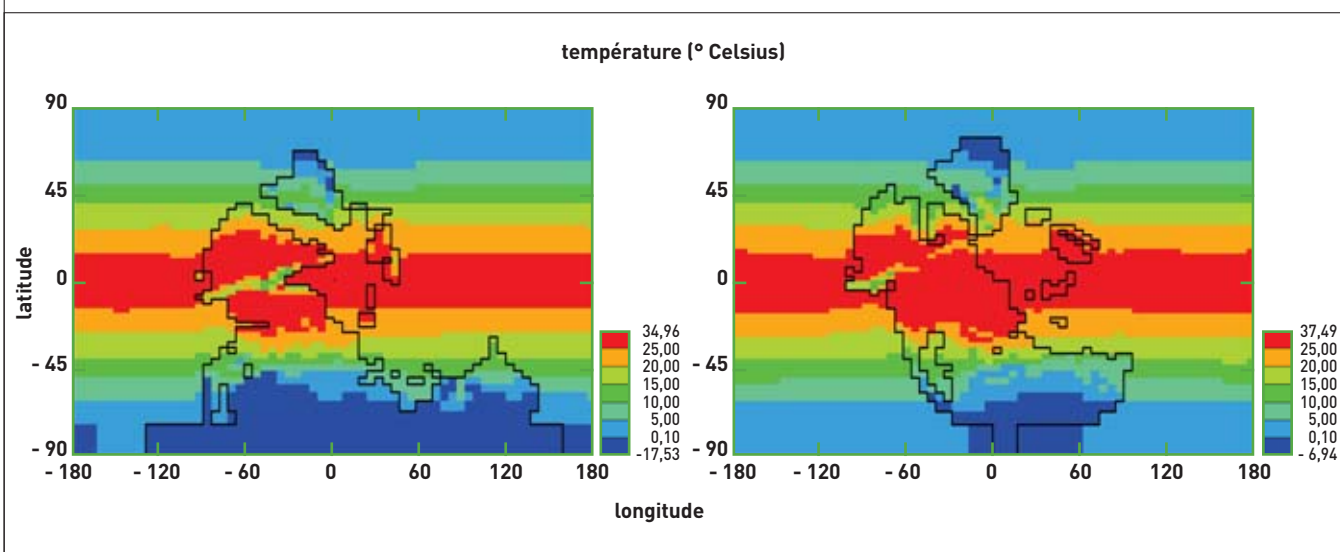


Figure 3. Évolution des températures moyennes de l'air sur la Pangée entre le Permo Carbonifère (il y a 295 millions d'années, à gauche) et le Permo Trias (250 millions d'années, à droite). Au Carbonifère, ces températures sont très négatives dans le sud du Gondwana (hautes latitudes de l'hémisphère Sud), compatibles avec l'existence d'une grande calotte de glace.

de phases glaciaires très importantes recouvrant d'immenses calottes de glace le nord de l'Europe et de l'Amérique du Nord. Cette théorie ne fut réellement prise au sérieux que lorsque les premiers forages marins mirent en évidence des variations climatiques qui se produisaient précisément aux fréquences de variation des paramètres orbitaux. Plus tard, les modèles très sophistiqués démontrèrent que des variations assez faibles de l'insolation au sommet de l'atmosphère pouvaient être amplifiées par le système Terre (atmosphère-océan-biosphère-cryosphère) de manière à faire

basculer le climat d'une phase interglaciaire, comme la nôtre, à un climat glaciaire correspondant à une baisse de niveau marin de 120 mètres.

L'homme, facteur de déséquilibre profond, prend la main

Il y a environ 200 ans commençait la révolution industrielle en Europe, qui s'étendit au reste du monde, provoquant une augmentation sans précédent des besoins en énergie de la population des Terriens, qui,

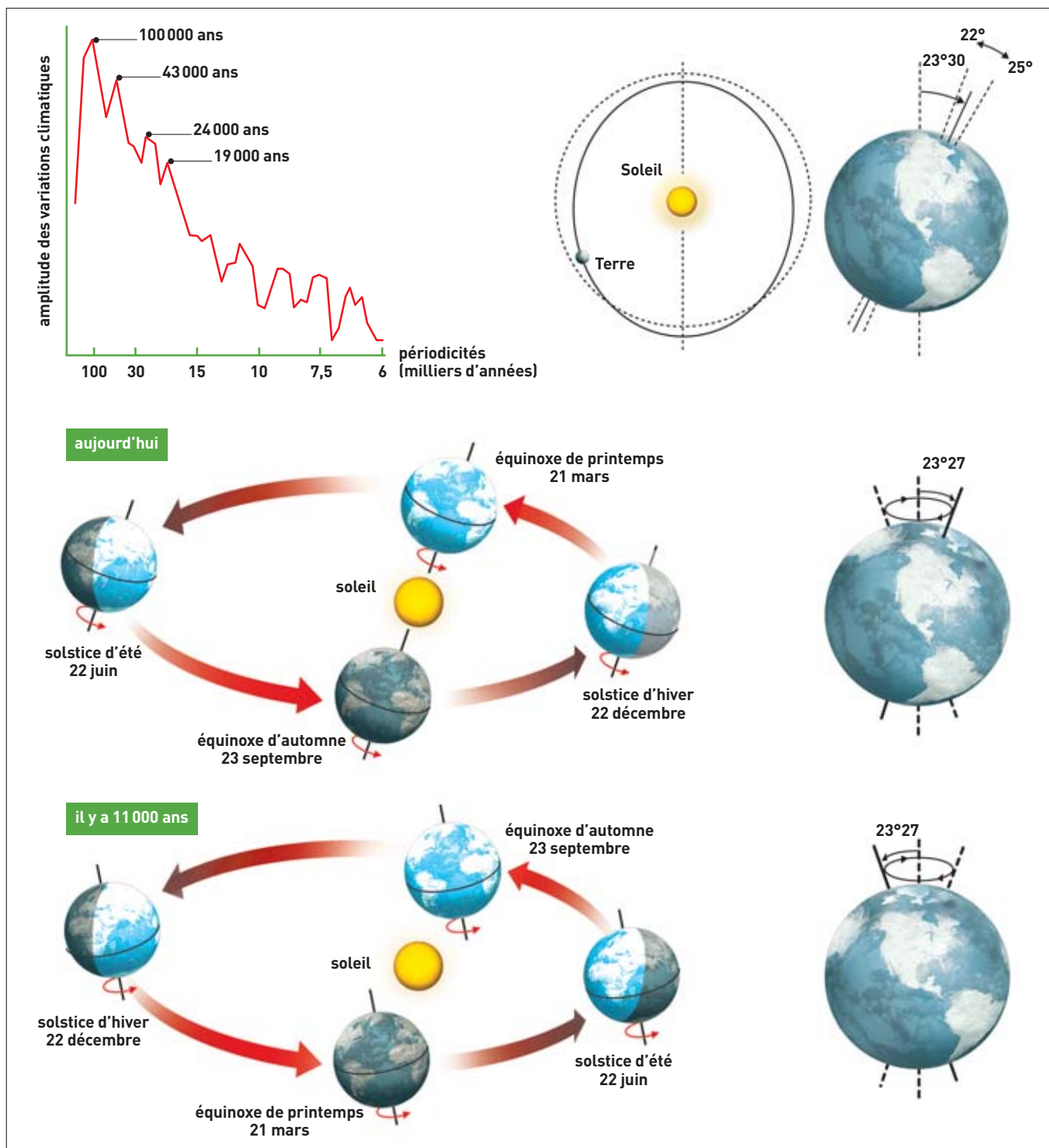
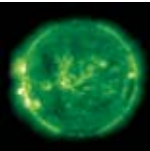


Figure 4. Les paramètres orbitaux de la Terre varient, qu'il s'agisse de l'excentricité de son orbite (en haut, au milieu), de l'obliquité de son axe de rotation (en haut, à droite) ou de la précession des équinoxes.



globalement, ont été multipliés par 2,3 entre 1900 et 2000. La plus grande partie de cette demande a été satisfaite par la combustion de carbone fossile. L'écorce terrestre recèle en effet de vastes réserves de charbon, d'**hydrocarbures** liquides et de gaz naturel qui se sont formées au long de l'histoire de la Terre et ont une grande inertie vis-à-vis des changements qui affectent ses enveloppes superficielles. Aujourd'hui, la demande d'énergie mondiale est de 400 EJ (exajoules = 10^{18} joules). Le charbon a dominé jusqu'en 1950 mais sa contribution a baissé pour atteindre 27%, au profit de celle du pétrole (40%), et plus récemment du gaz naturel (23%). La génération d'énergie par les centrales nucléaires représente environ 7%, soit 30 EJ.

Or, l'extraction de carbone fossile et sa combustion pour en tirer de l'énergie sont la cause de rejets de CO_2 dans l'atmosphère. Le CO_2 est un gaz à effet de serre, qui capte le rayonnement infrarouge thermique émis par la Terre vers l'espace pour le réémettre dans toutes les directions, ce qui réchauffe l'atmosphère et la surface des océans et des continents. Le CO_2 est présent à l'état de traces dans l'atmosphère (0,03%), mais il absorbe dans un large domaine du **spectre** infrarouge entre $2 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$. Sa teneur est passée de 280 ppm il y a 200 ans à 360 ppm actuellement, soit un bond de 30%, pour atteindre les niveaux les plus élevés des derniers 25 millions d'années⁽²⁾. L'*amplitude* de l'augmentation du CO_2 enregistrée depuis 1800 est comparable à celle qui a été observée lors de la dernière déglaciation, lorsque le climat s'est réchauffé de 4°C . Par contre la *vitesse* d'augmentation du CO_2 est beaucoup plus importante, et n'a sans doute pas d'équivalent dans l'histoire du Quaternaire.

Pour comprendre une telle augmentation, il faut ajouter aux rejets de CO_2 fossile ceux qui sont dus à la déforestation et aux changements d'usage des sols, et prendre en compte la réabsorption d'une partie de l'excès de CO_2 par l'océan et la végétation. Depuis environ quarante ans, on a pu observer que la moitié seulement des émissions anthropiques s'accumule dans l'air en créant un supplément d'effet de serre. La dissolution dans l'océan, par simple effet de solubilité et de mélange des masses d'eau, et la

séquestration de carbone par les écosystèmes terrestres, plus mystérieuse car on n'en connaît pas encore tous les processus, sont des alliés précieux pour limiter l'effet de serre et le changement climatique. Sans ces deux puits de carbone, le CO_2 augmenterait deux fois plus rapidement.

Le grain de sable dans la machine climatique

Si, comme c'est probable, le CO_2 venait à doubler dans le futur proche, chaque région de la surface du globe recevrait en moyenne 4 W/m^2 supplémentaires, une quantité somme toute modeste comparée aux quelque 242 W/m^2 reçus du Soleil⁽³⁾. Ce petit surplus d'énergie joue pourtant le rôle du grain de sable qui détraque la machine climatique. Comme on a vu que dans le passé une faible perturbation orbitale de l'énergie reçue du Soleil avait pu, à travers un jeu de rétroactions et d'amplifications du système climatique, faire apparaître ou disparaître d'immenses calottes de glace, on peut anticiper que la faible perturbation induite par le CO_2 émis par l'homme va avoir des conséquences importantes sur le climat. Un doublement du CO_2 , voire une augmentation, à effet radiatif équivalent, d'autres gaz à effet de serre encore plus "réchauffants", comme le méthane CH_4 (20 fois l'effet du CO_2 sur une durée de 100 ans) ou l'oxyde nitreux N_2O (200 fois l'effet du CO_2) provoque une augmentation des températures de $1,5$ à 6°C . Ce réchauffement est calculé par des modèles numériques complexes mettant en équation bon nombre de mécanismes d'amplification de la perturbation du CO_2 , *via* les changements non linéaires de circulation des océans et de l'atmosphère, de l'albédo des surfaces continentales, de la vapeur d'eau, des nuages et de l'étendue de la glace de mer. Les modèles numériques du climat sont faits pour calculer aux échelles régionales non seulement la température moyenne, mais aussi sa variabilité et celle d'autres

(2) Une teneur de 1 ppm correspond à une molécule de CO_2 pour un million de molécules d'air.

(3) Globalement, le flux solaire ($I = 1365 \text{ W/m}^2$) intercepté par la Terre (rayon R) d'albédo α est de $\pi R^2 I (1-\alpha)$, soit par unité de surface $T = 242 \text{ W/m}^2$.

Icebergs dans l'Antarctique. L'évolution de la banquise est l'une des grandes questions que pose aux climatologues le réchauffement de la planète.



PhotoLink



EyeWire

L'extraction de carbone fossile et sa combustion pour en tirer de l'énergie sont la cause de rejets dans l'atmosphère de CO₂, dont la moitié s'accumule dans l'air en créant un supplément d'effet de serre.

variables climatiques, en particulier les précipitations. Toutefois, pour se rendre compte de la robustesse du réchauffement à l'équilibre pour un doublement du CO₂, il suffit d'appliquer la formule $d(\sigma T^4)/\sigma T^4 = 4 \text{ W/m}^2 / 242 \text{ W/m}^2$ pour obtenir un "ordre de grandeur" de + 1,2 °C, valeur qui ne tient pas compte des amplifications par le système climatique. Ce n'est pas tant la valeur moyenne du réchauffement associé à une augmentation du CO₂ qui est inquiétante – après tout la Terre en a vu d'autres au cours de son histoire tourmentée –, mais sa vitesse comparée aux facultés d'adaptation des écosystèmes et des sociétés humaines. Un des impacts les plus importants du réchauffement concerne les modifications régionales des régimes des pluies, et leurs conséquences sur l'agriculture et les ressources en eau en général. Il faut aussi prendre en compte les événements extrêmes (canicules, pluies diluviennes, tempêtes...) et une déstabilisation des conditions d'existence bioclimatique des écosystèmes, qui pourrait avoir des effets importants par exemple sur la dispersion des maladies à vecteur, ou l'augmentation du régime des feux.

L'ère du dioxyde de carbone est-elle inéluctable ?

Si l'on calcule qu'il reste dans l'écorce terrestre environ 10 000 pétagrammes de carbone fossile (1 Pg = 10¹⁵ g), leur combustion totale dans l'atmosphère entraînerait une augmentation des concentrations de 5 000 ppm ! En réalité, l'océan absorbera une grande partie du CO₂ émis. À l'équilibre, on peut même calculer que 85 % d'une perturbation du contenu en CO₂ de l'atmosphère se retrouvera *in fine* (en quelques siècles) dans l'océan, induisant une teneur asymptotique dans l'air de $0,15 \times 5000 = 750$ ppm. Toutefois, au cours des

prochaines décennies, période transitoire pendant laquelle nous allons continuer à utiliser du carbone fossile pour produire de l'énergie, le réservoir de carbone océanique ne va pas immédiatement se mettre en équilibre avec l'atmosphère, et nous risquons de connaître au XXI^e siècle un "pic" de CO₂ bien plus élevé que 750 ppm, avec à la clé des climats bien plus chauds que l'actuel. On se rend compte aussi que 15 % de la perturbation du CO₂ atmosphérique due à l'utilisation des énergies fossiles est plus ou moins irréversible, et nous conduira dans quelques siècles à un climat durablement plus chaud. Il se peut, en outre, que pendant la période transitoire où les concentrations de CO₂ passeront par un pic, le climat dépasse un "seuil de stabilité" et change véritablement d'état, avec par exemple un mode de circulation océanique différent de l'actuel. Le climat des prochains millénaires va donc se jouer au XXI^e siècle et dépendra de notre capacité à limiter, voire à réduire les teneurs de l'atmosphère en CO₂. Les scénarios futurs pour les émissions de carbone fossile vont de 20 PgC par an en 2100, pour le cas le plus "polluant", à 3 PgC par an pour le scénario le plus "environnemental". Pour stabiliser le CO₂ en 2050 à un niveau proche du doublement, il faudra passer par la trajectoire basse à 3 PgC par an. Cela montre en quelque sorte que l'humanité a devant elle deux futurs : l'un verra le CO₂ augmenter et le climat changer pour rendre notre planète moins habitable, l'autre le verra stabilisé, voire réduit, et l'effet de serre atténué, faisant écho à la citation de Saint-Exupéry : « *On n'hérite pas de la terre de ses ancêtres, on l'emprunte à ses enfants.* »

► Gilles Ramstein et Philippe Ciais
Laboratoire des sciences du climat
et de l'environnement (CEA-CNRS)
CEA centre de Saclay