

SOUS LES FEUX DU SOLEIL

Depuis sa naissance, notre planète baigne dans le flux permanent des radiations solaires. Ce flux continu, non content d'avoir joué un rôle dans son histoire ancienne, est également impliqué dans les vicissitudes de l'histoire humaine et déterminant pour le futur proche et lointain de notre « point bleu pâle »...

Aux commencements : le paradoxe du soleil faible	2
L'erreur de « la divine providence »	3
Aux petits bonheurs de l'orbite	4
Le soleil aussi est en orbite	6
Des variations rapides	6
le cycle solaire	7
Le soleil a rendez-vous avec la Terre	9
Rayons cosmiques vs magnétisme solaire	10
L'atmosphère terrestre se comporte comme un détecteur de particules	11
Les rayons cosmiques sont déviés par l'activité magnétique solaire.	12
Une confirmation astronomique	13
L'avenir profond	14
Notes & références	15

Aux commencements : le paradoxe du soleil faible

Pendant les 4 milliards d'années de l'histoire de la Terre, le climat de cette dernière, variant selon l'évolution du soleil et la composition de l'atmosphère a été, pendant 90 % du temps, de type tropical (1) à cette échelle, nous vivons une époque exceptionnellement froide de l'histoire de notre planète.

Toutefois, dans les brumes de l'enfance de notre étoile, nous étions très loin des ardeurs tropicales : tous les modèles de l'évolution stellaire, ainsi que les observations des autres étoiles nous montrent que le rayonnement de notre étoile ne devait représenter que 75 % de sa valeur actuelle. Cela est dû au mécanisme de fonctionnement du soleil, la fusion nucléaire : dans le cœur de l'étoile, l'hydrogène fusionne en Hélium, une partie de la masse des atomes étant convertie en énergie. Au fur et à mesure que l'H est converti en He dans le cœur solaire, la luminosité solaire augmente. Le soleil jeune était donc moins lumineux que le nôtre d'un facteur oscillant entre 15 et 35 % (2). Or, toute variation supérieure à 5 % en moins devrait conduire à une terre complètement gelée, des sommets au fond des océans, et donc sans vie, alors que cette dernière était déjà bien installée... Seul un effet de serre massif impliquant des conditions très particulières (quasiment peu ou pas de masses continentales, ce qui est assez peu réaliste, et une atmosphère très riche en CO₂, mais aussi, sans doute, en d'autres gaz aujourd'hui disparus, comme le méthane et l'ammoniac) pourrait expliquer que notre planète ne se soit pas transformée en glaçon.

Une solution au problème pourrait être donnée par l'existence possible, à cette époque, d'un anneau de poussière autour du soleil, capable d'augmenter quelque peu son rayonnement. Ce mécanisme, observé sur certaines étoiles, est toutefois loin d'être général.

Par la suite, des dépôts glaciaires nommés tillites ainsi que des roches striées par les glaciers montrent deux périodes glaciaires anciennes majeures, la première, dite

huronienne, s'étant produite il y a environ 2300 millions d'années. Les formes de vies convertissant le CO₂ de l'atmosphère en O₂, l'effet de serre a diminué alors que le soleil devenait de plus en plus lumineux.

L'erreur de « la divine providence »

À ce sujet, on peut lire très facilement de dithyrambiques commentaires sur la « zone d'habitabilité » et la « chance » que notre planète se trouve à une distance de notre étoile permettant à l'eau d'exister sous ses trois formes, faveur insigne et improbable ayant permis à la vie d'évoluer. Ces commentaires inspirés sont toutefois affectés d'un vice logique rédhibitoire, et ils reviennent un peu, toutes proportions gardées, à s'extasier, comme le faisait Bernardin de St Pierre, sur la présence des côtes sur les Melons les prédestinant à être partagés en famille ! En effet, ce ne sont pas les « conditions initiales » qui ont permis le développement de la vie, mais bel et bien l'inverse : les premières formes de vies ont profondément modifié l'atmosphère terrestre au point de créer des conditions qui, au travers des pressions de sélection évolutives, ont conduit à l'émergence et à la diversification de formes de vies pleinement adaptées aux conditions qu'elles ont contribué à créer ; la terre n'a pas été d'emblée habitable, elle l'est devenue par l'action des organismes vivants, des premières et robustes bactéries qui ont configuré et bâtie leur propre oasis dans l'espace.

Ainsi, si la présence d'une faible quantité d'ammoniac dans l'atmosphère primitive suffisait à provoquer un effet de serre suffisant à réchauffer la Terre, ce gaz est très soluble dans l'eau et le rayonnement UV solaire, à l'époque non filtré par une couche d'ozone inexistante (faute d'oxygène) le dégradait en azote. Ce gaz devait donc être produit en permanence (pour une quantité variant entre 1/10 000 et un millionième seulement de l'atmosphère primitive) par voie biologique. Le métabolisme de l'ammonium, qui subsiste chez tous les êtres vivants, serait une trace de cette ancienne activité biologique ayant transformé la planète. L'activité tectonique de cette dernière conduira

d'ailleurs à une autre glaciation majeure il y a 670 millions d'années, dont la fin coïncidera avec une multiplication des formes de vies nommée « l'explosion cambrienne », mais ceci est une autre histoire.

Aux petits bonheurs de l'orbite

Comme le disait déjà Darwin : « *tandis que notre planète ne cesse, depuis l'origine, de tourner sur son orbite, obéissante à la loi fixe de la gravitation, de très belles et merveilleuses formes vivantes, issues d'un commencement simple, sont apparues et continuent sans fin d'apparaître par évolution* ».

Mais cette orbite, justement, est elle aussi immuable que Newton et Laplace l'ont cru aux débuts de la mécanique céleste ? L'orbite actuelle de notre planète est très proche d'un cercle de 149 millions de km de rayon : c'est une ellipse de 2 % d'excentricité seulement, ce qui fait varier notre distance au soleil entre 147 millions de km (périhélie) et 152 millions de km (aphélie). Toutefois, ces variations annuelles ne sont pas les seules. Il existe trois autres composantes du mouvement de notre planète influençant son exposition au rayonnement solaire. Elles ont été caractérisées entre 1920 et 1941 par un astronome serbe, Milutin Milankovic. Bien que ce dernier soit aujourd'hui considéré comme un des scientifiques les plus éminents au monde, il mourut en 1958 sans voir ses idées prises en compte... Elles ne le seront qu'au milieu des années 70, lorsque l'examen des sédiments marins confirmera les prévisions du scientifique serbe, la plupart de ses collègues de l'époque préférant, hier comme aujourd'hui, privilégier des hypothèses purement terrestres dans leur volonté « isolationniste » visant à ne jamais considérer les influences extraterrestres sur leur objet d'étude... Nous verrons par la suite que cette attitude perdure dans l'étude actuelle du climat terrestre et de son évolution.

Milankovic (3) montra que sous l'influence des autres planètes du système solaire, et en particulier de la plus massive, Jupiter, l'orbite terrestre subissait des modifications cycliques conduisant à des variations importantes du climat, en particulier à une

alternance de périodes froides, les glaciations, caractérisées par un fort développement des calottes glaciaires et un niveau marin bas, avec des périodes plus chaudes, dites interglaciaires, comme celle où nous vivons. Ces variations touchent aussi l'orientation de la Terre par rapport au soleil.

L'excentricité de l'orbite terrestre augmente ainsi régulièrement jusqu'à 6 % et se déplace dans l'espace, la distance au soleil pouvant ainsi varier entre 129 et 187 millions de km... Cette variation de l'excentricité génère les effets les plus importants sur le climat de notre planète, la différence d'énergie reçue entre l'aphélie et le périhélie pouvant atteindre 30 % sur une très longue période. Cette influence se superpose alors à celle des saisons, dont l'amplitude est modifiée par la variation de l'inclinaison de la Terre sur son orbite (c'est une variation d'obliquité) entre 22 et 24,5° (4), tous les 41 000 ans. De plus, comme notre planète n'est pas une sphère parfaite, l'attraction du soleil et de la lune fait lentement osciller son axe de rotation (précession) qui effectue un cercle en 25 560 ans, ce qui modifie régulièrement les dates des saisons. De par le caractère foncièrement chaotique, récemment mis en évidence (5) des orbites planétaires, les chercheurs ne peuvent reconstruire ces cycles de variations orbitales que sur 50 millions d'années environ. Bien que des indices existent dans un passé plus lointain de l'existence de variations liées à l'orbite terrestre, c'est surtout pour le dernier million d'années que l'influence des cycles dits « de Milankovic » est démontrée. Ainsi, sur une durée de cet ordre, la plupart des indicateurs climatiques montrent des variations liées aux modifications régulières des paramètres de l'orbite terrestre et de l'orientation de la planète. Ces variations orbitales provoquent donc des modifications du climat sur des échelles de temps allant de 10 000 à 100 000 ans, mais il existe d'autres sources de variations: la Terre n'est pas seulement soumise, dans sa marche titubante, à se rapprocher plus ou moins du soleil en tanguant au grès des influences luni-solaires : notre

étoile décrit-elle aussi une orbite, entraînant sa cour planétaire dans son sillage, dont l'influence sur notre planète, son histoire et son devenir doivent être pris en compte.

Le soleil aussi est en orbite

Comme W. Herschel l'a mis en évidence dès 1783, notre étoile est animée d'un mouvement propre (6), emportant ses planètes avec elle : le soleil tourne en 250 millions d'années autour du centre de masse de la Voie lactée, situé à 27 000 années-lumière de lui. Il tournicote donc à près de 240 km/s, parcourant une année-lumière en 1400 ans, mais son orbite n'est pas une ellipse plane : au fur et à mesure de sa progression il monte et descend au travers du plan galactique, qu'il traverse tous les 30 millions d'années environ, et dont il s'éloigne au maximum de 230 années-lumière. Certaines des extinctions massives ayant frappé la vie terrestre ont pu être corrélées avec ces périodes où le soleil traverse un milieu où les ondes de choc causées par l'explosion de supernovae par exemple, mais aussi les perturbations causées par des étoiles moins lointaines, peuvent déstabiliser les confins du système solaire et précipiter comètes et astéroïdes vers l'intérieur de ce dernier. Toutefois, un autre danger, moins spectaculaire, peut aussi être pris en compte : une variation soit à la hausse (à cause de sources proches, astronomiquement parlant) ou à la baisse (à cause de « l'écran » constitué par l'épaisseur des gaz et poussières concentrés dans le plan galactique) du flux de rayons cosmiques frappant le système solaire, et qui peuvent avoir, nous le verrons, un effet important sur le climat terrestre, pour peu que le soleil les dévie peu ou beaucoup. Le même mécanisme, nous allons le voir, pourrait être impliqué dans des variations bien plus rapides

Des variations rapides

La surface du soleil est à une température d'environ 6000 K. elle émet des radiations dont la longueur d'onde varie de 0,2 à 4 μm , de l'ultra-violet jusqu'à l'infrarouge. Notre planète renvoie directement dans l'espace environ 30 % de l'énergie solaire qu'elle

reçoit, et que les chercheurs ont baptisé du nom discutable de constante solaire. Pourquoi discutable ? Et bien cette constante est... variable ! Elle passe de 1410 W / m² lorsque la Terre passe au périhélie, le 3 janvier, à 1320 W / m² au point le plus éloigné du soleil, l'aphélie, franchi le 3 juillet actuellement. La « constante moyenne » est donc de 1360 W/m² actuellement (7).

le cycle solaire

À l'échelle du siècle, voire de la dizaine d'années, notre étoile passe donc par des cycles d'activités liés à l'évolution de ses champs magnétiques. Les taches solaires sont des régions de la surface solaire à l'activité magnétique interne, qui diminue localement la convection qui brasse la photosphère (la partie visible du soleil), ce qui provoque une diminution locale de la température (1200° de moins que la surface à 5800 K) qui fait apparaître cette région plus sombre que le reste de la surface. (**Photo soleil** – *cette vue du soleil cumulant plusieurs longueurs d'onde fait apparaître plusieurs phénomènes intenses liés à son activité - NASA*)

Bien que les astronomes chinois aient pu observer les premiers, l'existence de taches sur le soleil, leur dénombrement systématique, de façon fiable, ne date que des années 1850. Les décomptes précédents, même s'ils ne sont pas réguliers, n'en sont pas moins précieux, la fiabilité maximale ne remontant que jusqu'en 1850. Il fallut attendre cependant bien davantage pour disposer d'une idée sur l'origine des taches solaires, qui met en jeu des phénomènes magnétiques et des éléments de la physique des plasmas qui sont, aujourd'hui encore, loin d'être pleinement compris.

Les taches se forment lorsque, localement, le champ magnétique solaire se referme en boucles, les bases de la boucle étant les taches solaires, et les lignes de force arquées au-dessus servant de « fil conducteur » à des éruptions solaires. En période de maximum d'activité (maximum de taches) le rayonnement solaire est plus intense. Les taches

solaires révèlent une partie de l'activité interne du Soleil. Le cycle solaire dure 22 ans en moyenne, et se compose de deux périodes de 11 ans séparées d'une inversion du champ magnétique solaire. Ce cycle se traduit par une modification cyclique du nombre de taches solaires visibles. De plus, il existe une variation à plus long terme de l'activité solaire révélée par les taches : le nombre maximum de taches solaires visible au maximum du cycle solaire varie au cours du temps (8).

Les taches ne sont toutefois que les manifestations les plus visibles d'activité magnétique solaire transformant ce dernier en véritable accélérateur de particules. En effet, trois autres phénomènes, dont un est continu, mais variable, et les autres exceptionnels, mais liés aux taches, sont provoqués par l'activité magnétique de notre étoile. Le vent solaire est un flux continu de plasma éjecté de la haute atmosphère solaire. Il est essentiellement composé de particules chargées, ions et électrons, et son débit dépend de l'activité solaire. Au voisinage des taches, par contre la géométrie locale du champ magnétique en boucles qui se reconnecte accélère localement le plasma solaire, projetant vers l'extérieur un ou plusieurs jets de matière ionisée à des centaines de milliers de km. Ces éruptions solaires s'accompagnent d'intenses rayonnements énergétiques (UV, rayons X...) qui lorsqu'ils frappent le champ magnétique terrestre provoquent la formation des aurores boréales et peuvent perturber les transmissions radio.

Les manifestations le plus énergétiques de l'activité solaire, elles aussi cycliques, sont les éjections de masse coronale (CME en anglais). Il s'agit d'une sphère de plasma prenant son origine dans la couronne du soleil, son « atmosphère » chauffée à plusieurs millions de °C et que nous ne pouvons voir que lorsque se produit une éclipse solaire. La taille de ces « bulles » de plasma dépasse allègrement celle du soleil qui leur a donné naissance, et elles se déplacent dans le milieu interplanétaire à une vitesse de l'ordre de 1000 km/s, parcourant le plus souvent la distance entre le soleil et notre planète en 3 Jours. Leur puissant champ magnétique se reconnecte alors avec le champ de notre

planète, pouvant l'affaiblir transitoirement et générer les mêmes phénomènes que les éruptions solaires.

Ces trois types d'activité aboutissent à générer des courants de particules chargées parcourant le système solaire, et dévié par le champ magnétique terrestre.

Le soleil a rendez-vous avec la Terre

L'influence du soleil sur le climat de la Terre, évidente (c'est, après tout, la seule source de chaleur externe à notre globe !) est qui plus est variable : lorsque l'on superpose les courbes montrant ces deux derniers millénaires l'évolution de la température, reconstituée d'après des indices (nommés « proxys » en anglais) et les témoignages humains, et l'activité solaire, bien des surprises apparaissent.

Tout d'abord, la variabilité du climat terrestre sur 200 ans saute aux yeux : alors que le moyen – âge était une époque « chaude », comparable ou supérieure à la nôtre, une période plus récente, le « petit âge glaciaire » de 1645 à 1715, et les années entre 1795 et 1830 montrent des refroidissements aussi subits que difficiles à expliquer.

Courbe 1 – Reconstitution de la variation de température mondiale sur 2000 ans. D'après C. Loehle, Energy and Environment, vol. 18, 2007 - La période chaude du moyen âge ainsi que le « petit âge glaciaire » apparaissent nettement, tout comme le fait que notre situation n'est pas sans précédent !

Ensuite, l'évolution de la température suit l'évolution de la constante solaire, mais surtout semble fortement corrélée à l'activité solaire, mesurée par la quantité de taches solaires visibles. Entre 1645 et 1715, non seulement la constante solaire et la température étaient basses, mais le nombre de taches solaires était anormalement faible, ces dernières ayant même complètement disparu en 1665. Cette période froide (9) de soleil sans tache a été nommée minimum de Maunder. La constante solaire y avait baissé de

0,25 %. Ceci c'est reproduit de 1795 à 1830, pendant une seconde période froide, et la diminution anormale du nombre de taches solaires a été nommée minimum de Dalton.

Toutefois, une diminution de l'insolation de 0,25 % générant peu d'effets en pratique, il serait vain de chercher à ce niveau une explication de l'influence des variations solaires sur le climat (comme le font remarquer, pour éviter d'examiner d'autres données bien plus gênantes, les climatologues « isolationnistes » qui veulent faire croire que seul le CO₂ d'origine humaine conduit actuellement le climat). En effet, la variation de luminosité solaire reste assez limitée, influant très peu sur la température, mais ce n'est pas là son influence essentielle.

Alors, comment expliquer des faits particulièrement têtus, par exemple une baisse globale de la température de 0,5 °C pendant le minimum de Maunder, mais aussi, et surtout, un réchauffement très rapide à la fin de cette période, s'étageant entre 4 °C au Spitzberg et 1 °C dans les Alpes (10) ? Nous avons vu que l'activité cyclique solaire possédait deux composantes, l'une étant liée à la quantité de lumière (et de chaleur) émise et interceptée par la Terre (l'irradiance, pour les spécialistes) ; et l'autre aux variations de l'activité magnétique de notre étoile. Les variations d'irradiance étant trop peu intenses, il nous faut à présent étudier l'influence de **la composante magnétique variable du cycle solaire**

Rayons cosmiques vs magnétisme solaire

Une équipe d'astrophysiciens danois travaillant sur les effets du rayonnement solaire ont eu l'idée de travailler non sur le rayonnement solaire et ses variations, mais sur la durée des cycles solaires complets (autour de 22 ans). Cette durée est en fait un marqueur de la fréquence des éruptions solaires, émissions intenses de particules chargées générant des orages magnétiques, liées au déroulement du cycle solaire.

Le résultat (**Courbe 2** : *La température de surface de l'hémisphère nord varie de la même façon que la durée des cycles solaires. D'après K Labitzke, 16*) est sans appel : il existe une corrélation

indubitable entre la température du globe et la durée des cycles solaires. Toutefois, une corrélation n'est pas un rapport de cause à effet, et ne sert à rien sans un mécanisme causal. Pourquoi la température « moyenne » du globe évoluerait-elle de la même manière que la durée des cycles solaires ? C'est alors que les rayons cosmiques entrent en scène.

L'atmosphère terrestre se comporte comme un détecteur de particules

Dans les espaces effrayants sis entre les étoiles, il n'y a pas que du vide. Il existe aussi des particules filant à des vitesses proches de celle de la lumière. Elles constituent les rayons cosmiques, en provenance d'étoiles en explosion, du centre de la galaxie ou des galaxies lointaines. Il est surtout composé de protons et de noyaux d'hélium, de rayons gamma ainsi que de traces d'antimatière.

Bien que leur détection soit, sinon difficile, du moins imprécise, il apparaît que leur arrivée sur Terre n'est pas régulière. Plus surprenant encore, la quantité de rayons cosmiques arrivant à terre semble bien être corrélée à l'intensité de la couverture nuageuse ! (**courbe 3** – *le lien entre rayonnement cosmique et couverture nuageuse apparaît clairement : une hausse de rayonnement correspond à une augmentation de la couverture nuageuse. D'après Marshand & Svensmark, Physical Review Letters, 2000 – voir 11*). Est-ce une simple coïncidence ? On pourrait le croire, si l'on ne disposait pas d'un mécanisme explicatif non seulement théoriquement valable, mais aussi confirmé expérimentalement ! L'équipe de chercheurs danois (11) a étudié le mécanisme qui permettrait de relier les rayons cosmiques aux nuages : les rayons cosmiques frappent le haut de l'atmosphère, générant une gerbe de particules secondaires qui va provoquer la condensation de la vapeur d'eau en haute altitude, donnant ainsi un coup de pouce nécessaire à la formation des nuages. C'est sur ce même principe que fut réalisé par le physicien Wilson un des premiers détecteurs de particules, la chambre à brouillard.

Expérimentalement, deux ensembles d'expériences, poétiquement baptisées CLOUD et SKY, ont testé ou testent cette formation de nuages induite par le rayonnement cosmique. Leur principe est similaire : il s'agit de recréer une atmosphère de type terrestre dans une enceinte qui est ensuite irradiée avec des particules réparties en deux lots : celles correspondant au rayonnement solaire, et celles correspondant aux rayons cosmiques. Les premiers résultats obtenus ont été surprenants, même pour l'équipe danoise dirigée par H. Svensmark : les rayons cosmiques provoquent bien la formation de nuages (12). Ors, les nuages jouent un rôle de premier plan dans la température de la Terre : schématiquement, une augmentation de la couverture nuageuse renvoie vers l'espace une quantité supplémentaire de lumière et de chaleur solaire, provoquant un refroidissement. Inversement, la diminution de la couverture nuageuse conduit à un réchauffement. Ainsi, s'explique la concordance remarquable entre les variations de la température terrestre et l'abondance des rayons cosmiques, et ce jusqu'à – 500 MA (le taux de rayonnement étant marqué par la production plus ou moins intense de certains isotopes radioactifs dans les dépôts de l'époque), et qui montrent bien que les augmentations de température se produisent bien lorsque le rayonnement cosmique est minimal (13).

Mais peut-on relier, à présent, l'intensité du rayonnement cosmique à l'activité magnétique solaire, et boucler ainsi notre raisonnement ? Sans aucun doute.

Les rayons cosmiques sont déviés par l'activité magnétique solaire.

Lorsqu'une éruption solaire se produit, les perturbations magnétiques qu'elle génère dévient la course des rayons cosmiques, faisant diminuer la quantité de ces derniers qui entrent en contact avec notre atmosphère. Des éruptions brutales diminuent bel et bien le bombardement cosmique de notre atmosphère, ce qui a été vérifié expérimentalement (14). Une fraction non négligeable du climat terrestre est donc sous la

dépendance de l'activité solaire, via l'influence de cette dernière sur la formation des nuages par le biais de la variation induite du flux de rayons cosmiques.

La durée des cycles solaires influe sur le rythme des maxima et minima solaires, et donc sur la déviation forte ou faible du flux de rayons cosmiques atteignant notre planète. Bien que leur origine soit très diverse, les rayons cosmiques pénètrent actuellement le système solaire à un taux à peu près constant (ce qui n'a peut-être pas été le cas dans le passé), et c'est leur déviation périodique, liée donc à la durée des cycles solaires qui en impose le rythme, qui modifie la réflectivité de notre planète et, partant, sa température.

Dans ce cas, pourquoi cet effet n'est pas reconnu, voire nié, par les spécialistes officiels du climat regroupés au sein (des saints) du GIECC ? À cause d'une solide tradition d'isolationnisme, d'autarcie planétaire : les influences extraterrestres sont tout simplement discréditées d'office, minimisées systématiquement ou ignorées, tout comme les idées de Milankovic dans les années 1960.

Une confirmation astronomique

Si les variations de l'activité solaire conditionnent fortement le climat, cela devrait aussi être repérable sur d'autres planètes du système solaire, si tant est qu'elles aussi possèdent une atmosphère. Or, justement, des variations climatiques sont bien observées : que ce soit Vénus ou Mars, les planètes telluriques ont montré les signes d'un léger réchauffement à mettre ne parallèle avec l'activité solaire. Parmi les planètes lointaines, Neptune semble, elle aussi, réagir fortement aux variations de l'activité solaire (15).

L'avenir profond

Si l'activité magnétique solaire agit bien en tant que facteur important du climat terrestre, l'avenir pourrait être sensiblement différent des prévisions millénaristes apocalyptiques mises à la mode en nos temps d'empreinte carbone » : nous sommes actuellement en période de soleil « calme », voire « anormalement calme », ce qui pourrait augurer d'une baisse des températures... qui semblent bien se produire depuis 1998, selon les propres données du GIEC !

Lorsque l'activité solaire augmentera à nouveau, les rayons cosmiques déviés généreront moins de nuages, et la Terre (encore) se réchauffera quelque peu. Rien de nouveau sous le soleil.

Dans quelques milliards d'années, le soleil gonflera et absorbera la Terre. Ce sera le réchauffement ultime, pour peu que notre planète soit toujours sur la même orbite (rien n'est moins sûr !). En attendant ce jour funeste, force est de constater que les feux du soleil échauffent autant les esprits des caciques du GIEC que les sommets de notre bienfaisante atmosphère...

Notes & références

1- Gargaud M. et coll. L'environnement de la Terre primitive, PU de Bordeaux – 2001

2 - Sagan C., Chyba C. The Early Faint Sun Paradox: Organic Shielding of Ultraviolet-Labile Greenhouse Gases - Science. 276 - 23 mai 1997

3 – Milankovic a été précédé au niveau des idées par le mathématicien Adhémar et dans certains calculs par le géologue J Croll dans les années 1850 – Des détails et des animations sur les cycles de Milankovic : <http://www.cours.polymtl.ca/glq1100/milankovich/milankovich.html>

4 – Cette variation reste très faible à cause de l'effet stabilisateur de la Lune.

5 – Laskar J, Robutel P. 1993. Nature 361:608–14

6 - Le Soleil tourne également sur lui-même, avec une période de 27 jours, mais cette durée moyenne ne représente pas grand-chose : étant fluide, l'équateur solaire tourne en 25 jours alors qu'il faut 35 jours aux régions polaires pour accomplir leur rotation.

7- Nous ne recevons qu'un faible reliquat de ce que nous envoie le soleil, car chaque m² de sa surface émet une énergie de 60 MW...

8 - Il existe d'autres cycles liés à l'activité solaire, mais ils sont moins documentés : le cycle de Gleissberg, par exemple, serait de 90 ans et est lié à une variation du diamètre du soleil. Un maximum serait survenu autour de 1984, les prochains devant se produire vers 2069 puis 2159. La variation du diamètre apparent du soleil, infime, est de 0,5 seconde d'arc – le diamètre apparent solaire étant de 30 minutes d'arc environ-

9 - Ces variations ne sont pas seulement liées au soleil : le froid extrême entre 1810-1819 est lié aussi à deux éruptions volcaniques importantes, dont celle du Tambora le 5 avril 1815..

10 - Brigitte van Vliet-Lanoe. La planète des glaces. vuibert 2005

11 - Svensmark H, Pepke Pedersen J.O., Marsh N., Enghoff M., Uggerhoj U. *Experimental Evidence for the role of Ions in Particle Nucleation under Atmospheric Conditions* ». Proceedings of the Royal Society A", 3 / 10/2006 .

Un rapport complet et illustré est disponible ici :

http://esa-spaceweather.net/spweather/workshops/eswwII/proc/Session2/ESTECsww_20051.pdf

12 - Un petit film d'animation résume la théorie de formation des nuages, il est visible ici : ftp://ftp.spacecenter.dk/pub/cosmic/Animations/Cosmic_climate_compressed.avi).

13 - *Veizer J. Celestial climate driver: A perspective from four billion years of the carbon cycle, Geoscience Canada, 2005, 32, 1, 13-28.*

14 *Des éruptions brutales diminuent bel et bien le bombardement cosmique de notre atmosphère, ce qui a été vérifié expérimentalement (14) Svensmark)*

15 - *Hammel H. B. , Lockwood G. W. Geophysical Research Letters , vol. 34, 2007*

16 - *Labitzke K et coll. Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the North Polar region ». Geophysical Research Letters, 1987,14, 535. Des travaux plus récents ont confirmés ce rapport entre température et activité solaire, que ce soit au niveau océanique (travaux de Reid, Nature, 1987, et de White et al, JGR, 1997) continental (Friis-Christensen, Larsen, Nature, 1991) ou de la haute atmosphère (Marshall Svensmark, SSR, 2003) – courbes visibles à l'adresse donnée en 11.*