

Réchauffement de la Terre: la faute des étoiles?

L'activité humaine était jugée principale coupable du réchauffement climatique actuel. Le crime était presque parfait. Et puis... de nouveaux indices sont apparus. D'autres suspects sont tombés du ciel : le Soleil et les rayons cosmiques. La parole est à l'accusation.



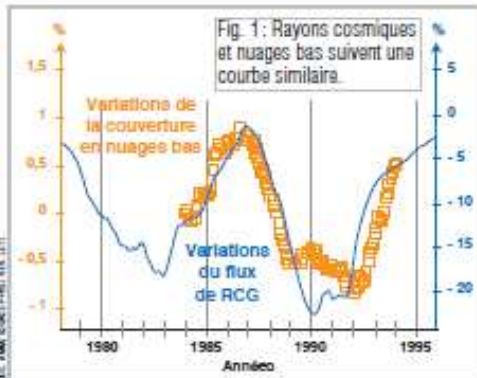
Activité humaine = CO₂ = réchauffement climatique: le grand public, ardois devant le décalage des phénomènes naturels, a enregistré l'équation. Nous savons que le réchauffement terrestre observé au cours du dernier siècle risque d'être dévastateur s'il se poursuit. Nous sommes conscients qu'il est de notre devoir de lutter contre ce déséquilibre dont nous sommes responsables.

Mais justement: **l'augmentation de la température terrestre est-elle en majeure partie de notre faute? Aucune modélisation de l'évolution climatique ne l'a encore prouvé avec certitude.** Une chose est en tout cas certaine: nous sommes en cause, mais nous ne sommes pas seuls au banc des accusés. Une foule d'effets climatiques résultent de phénomènes astronomiques et astrophysiques, extrinsèques à la Terre. Les facteurs astronomiques, notamment, sont connus depuis longtemps (voir encadré ci-contre). L'astrophysicien Milutin Milankovitch a proposé le premier que les mouvements du système solaire étaient la cause essentielle des changements climatiques. En 1938, déjà, il présentait des séquences climatiques déduites de calculs astronomiques à des géologues. Ceux-ci toutefois n'en ont pas tenu compte... jusqu'à ce qu'on découvre des strates de sédiments marins confirmant la relation entre climat et perturbations astronomiques.

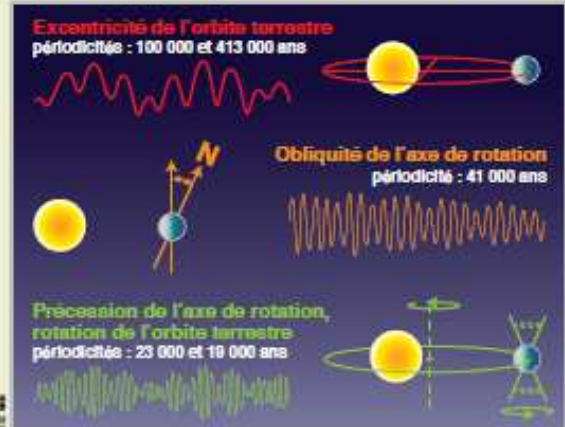
Mais des phénomènes astrophysiques, eux, se trouvent dans la ligne de mire depuis peu. En 1997, la découverte inattendue, par un satellite, d'une corrélation [réf. ●, voir p. 11] entre l'intensité des rayons cosmiques provenant de notre galaxie et l'étendue de la couverture nuageuse globale de la Terre (qui influe sur la température) a déclenché de multiples investigations expérimentales et théoriques (figure 1). Elles se sont penchées sur trois grandes périodes: les âges phanérozoïques (depuis 545 millions d'années), le dernier millénaire, et le dernier siècle.

Tournis galactique

Remontons 545 millions d'années en arrière, et passons en accéléré le film des fluctuations des rayons cosmiques grâce aux diverses traces qu'ils ont laissées dans les couches géologiques (voir encadré p. 10). Nous nous apercevons alors que ces fluctuations suivent un cycle de période longue: cela suggère que les rayons cosmiques ont leur origine



La Terre et ses cycles : des causes astronomiques



Le Soleil, étoile moyenne parmi une multitude, gouverne le système solaire par sa masse et par l'énergie qu'il émet. Il est entouré de neuf planètes, de douzaines de lunes, d'astéroïdes et autres objets dont le mouvement en orbites presque circulaires et coplanaires est contrôlé par la gravitation. L'ensemble de ces corps obéit en première approximation aux lois de Kepler, mais chacun d'eux est plus ou moins perturbé par les autres. C'est Laplace (dans sa «Mécanique Céleste», en 1773) qui a inventé la théorie des perturbations. Les analyses modernes des perturbations astronomiques expliquent de nombreuses variations d'insolation de la Terre dans le temps :

■ **Les faibles variations d'excentricité de l'orbite terrestre** autour du Soleil induisent des cycles de périodicité (110 000 ± 15 000) ans, auxquels se superposent des perturbations dues à Vénus de pseudo-périodicité 400 000 ans (allant de 50 000 à 2 millions d'années).

■ **La précession de la Terre**, qui lui donne un mouvement analogue à celui d'une toupie quelque peu déséquilibrée, est la conséquence du renflement équatorial du globe. L'axe des pôles devrait balayer dans l'espace, en environ 26 000 ans, un cône dont l'axe est perpendiculaire au plan de l'orbite. En réalité, suite aux effets gravitationnels dits de «marée» du Soleil et de la Lune sur la Terre, la période observée est de 22 000 ans, et le cône est festonné par une petite perturbation, la nutation, de période 18,6 ans. La précession a pour effet de décaler les saisons, ainsi, l'hiver fait place à l'été en une demi-période de 11 000 ans.

■ **L'obliquité**, angle entre les plans équatorial et écliptique, oscille de 22° à 25° en 41 000 ans. Elle est la cause du rythme annuel des saisons dans chacun des deux hémisphères, en raison de l'irradiance solaire qui dépend de trois facteurs :

- l'épaisseur variable d'atmosphère traversée suivant l'angle d'incidence des rayons solaires,
- le flux solaire par unité de surface, proportionnel au sinus de l'élévation du Soleil (les zones polaires reçoivent très peu de flux),
- la durée variable de la présence du Soleil au-dessus de l'horizon.

Par leur nombre élevé et par leurs périodes différentes qui se chevauchent, les perturbations astronomiques induisent des effets climatiques variés dont la réponse est plus ou moins altérée par des enchevêtrements de mécanismes complexes, intrinsèques à la planète, tels que dynamique des calottes glaciaires, circulation de l'eau des océans, éruptions volcaniques, dérive des continents,...



Spectaculaire explosion d'une supernova.

PHOTO: AP/ARND BRONKHORST

■ De nombreux objets dans l'univers possèdent une forte activité interne, source de phénomènes continus ou cataclysmiques : les supernovae qui explosent génèrent des ondes de choc, certaines galaxies ont un noyau actif... Ces objets projettent dans l'espace un énorme flux de particules diverses : **les rayons cosmiques**. Une infime partie d'entre eux atteint l'atmosphère terrestre, interagit, se multiplie en cascade, et engendre au niveau du sol un flux analogue à une pluie copieuse. Une bonne proportion de ces particules (atomes démunis de certains électrons de leur cortège) portent une charge électrique : elles ionisent et excitent les atomes et molécules de l'atmosphère.

■ **Les nuages** sont des systèmes complexes influencés par de petits écarts de température et d'humidité de l'atmosphère. Les nuages hauts ont un effet de

Des nuages grâce au cosmos



PHOTO: GUY AROCH

richauffement sur la surface terrestre. Plus épais, les nuages bas du genre stratocumulus (d'altitude inférieure à 4 kilomètres) réfléchissent plus qu'ils ne stockent l'énergie solaire de courte longueur d'onde, refroidissant ainsi la température terrestre de surface. Ce sont ces nuages bas qui sont surtout affectés par le phénomène des rayons cosmiques galactiques.

■ Le phénomène a de quoi surprendre : en regard de l'énorme énergie transportée par les radiations thermiques solaires, celle qu'apportent les RCG est très faible. Cela suppose l'existence de **facteurs microphysiques** d'amplification, mal connus pour l'instant, qui démultiplient l'impact des RCG. En l'absence d'une théorie complète de la physique-chimie des interactions entre RCG et nuages, plusieurs hypothèses sont envisagées :

- les ions cosmiques créeraient et feraient croître des noyaux de condensation et développeraient des nucléations (phénomène confirmé par des observations en laboratoire et dans l'atmosphère),
- les rayons cosmiques formeraient des aérosols chargés électriquement, produisant dans la vapeur d'eau un état métastable, source de la naissance et de la durée de vie des nuages,
- les RCG, seule source d'ionisation dans l'atmosphère qui contribue à faire circuler un courant électrique vers la Terre, influenceraient la croissance de noyaux de glace, etc.

au-delà du système solaire, et plutôt dans notre Galaxie. En effet, celle-ci, de type spiral, est assimilable à un corps visqueux dont le disque – la Voie lactée –, est animé d'une rotation différentielle. D'après la théorie de l'onde de densité, la structure spirale peut se considérer comme une variation ondulatoire de la densité du disque, dont la vitesse angulaire est inférieure de moitié à celle de la matière galactique. **Ainsi, le passage du système solaire à travers les bras spiraux, zones de forte activité stellaire, provoque des bouffées du flux de rayons cosmiques galactiques (RCG), de période (143 ± 10) millions d'années, mesurées à l'aide des radio-isotopes trouvés dans les météorites.**

Or, la température de la mer varie elle aussi cycliquement. 4 500 mesures de l'isotope ¹⁸O dans des coquillages fossiles ont mis en évidence une période de (135 ± 9) millions d'années. Ces mesures sont d'interprétation délicate. Aucun cycle terrestre d'une telle période n'est connu actuellement... À noter que ces résultats [réf. ②] ont été traités par une modélisation multi-paramétrique incluant à la fois la dynamique des bras spiraux et les variations de température. La minimisation de la variance entre les périodes des deux cycles semble indiquer l'existence d'une véritable anti-corrélation entre RCG et température (figure 2) : **plus il y a de RCG, moins il fait chaud, et inversement... Cette anti-corrélation est d'autant mieux établie qu'elle se vérifie sur plusieurs périodes d'oscillation.** Le modèle tient compte également des estimations, à partir de coquillages fossilisés, de la teneur en CO₂ (dépourvue de périodicité). En regroupant les données par tranches de dix millions d'années, il met hors-jeu les effets de la variabilité solaire. Un lien se trouve donc établi entre des études indépendantes, en astrophysique et en géo-sciences...

LA TEMPÉRATURE DES OcéANS EN PHASE AVEC LA GALAXIE

Certes, on constate aussi l'existence de «bouffées» de RCG non cycliques il y a 250 millions d'années (valeurs élevées des résidus) : outre les mouvements du système solaire et de la galaxie, d'autres phénomènes ponctuels générateurs de RCG, comme des supernovae proches ou des chocs de météorites, ont pu participer aux variations du flux.

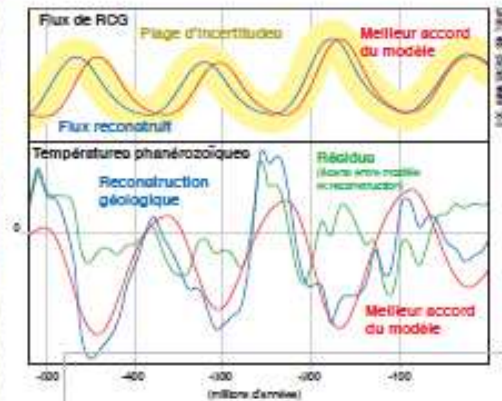
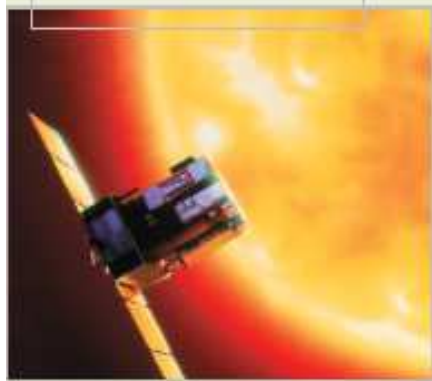


Fig. 2 : RCG et température sont anti-corrélés dès les temps géologiques. Le pic du résidu à -250 millions d'années provient de la Grande extinction alors connue par la Terre.



Lancé le 2 décembre 1995, le satellite international Soho (Solar and Heliospheric Observatory) a mis le Soleil sous haute surveillance (voir <http://sohowww.nascom.nasa.gov>).

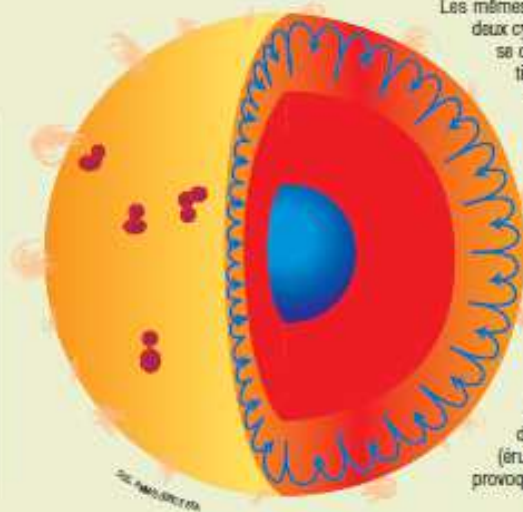


Sous la surface du Soleil, de forts courants de convection transfèrent l'énergie thermonucléaire vers la surface et font émerger des tubes de flux magnétique, perturbés par la rotation différentielle de la masse fluide de l'étoile. Ces tubes émergent dans une zone de polarité donnée, s'élevèrent, puis replongent dans une zone de polarité opposée. Ils créent ainsi un fort effet dynamo, et font apparaître des taches sombres à la surface. Leur périodicité, liée à la variation d'ensemble du magnétisme solaire, s'inverse en gros tous les onze ans (cycle de Schwabe), de même que le champ dipolaire du Soleil.

Les aurores polaires, effet du magnétisme solaire.



“Acné” solaire : une activité magnétique de surface



Les mêmes polarités reviennent au bout de deux cycles (20 à 22 ans), et les taches se chevauchent en gardant leur identité : les dernières taches d'un cycle se forment après les premières du cycle suivant. Un supercycle, dit «de Gleissberg» (période de 80 à 100 ans) a été aussi mis en évidence. Parfois, en raison de mécanismes encore mal élucidés, les tubes magnétiques deviennent instables, produisant au maximum du cycle des éruptions plus nombreuses et violentes (figure 3, p. 10), capables de perturber les télécommunications terrestres, d'endommager des satellites (éruption du 11 janvier 1997) et de provoquer des aurores polaires.

La chaîne de processus successifs se manifesterait donc ainsi (voir encadré p. 8) : **moins de RCG implique moins de nuages, donc davantage de chaleur sur Terre, et inversement. D'après ces travaux, la variation des RCG seule serait responsable des trois quarts des perturbations climatiques** au cours de cette longue période sans activité humaine ! Cette anti-corrélation RCG/température sur les 545 derniers millions d'années va-t-elle être confirmée ? Des études complémentaires sont en cours pour tenter de le déterminer : dossier à suivre.

Le Soleil donne

Outre les mouvements galactiques, les explosions de novae ou les météorites, il existe un autre suspect à appeler à la barre : l'activité magnétique du Soleil peut, elle aussi, faire varier la quantité de rayons cosmiques galactiques que reçoit la Terre. Nous disposons en particulier de deux indices pour nous indiquer cette activité magné-

tique : les taches solaires et le vent solaire. C'est le dernier millénaire, riche en perturbations climatiques bien établies, qui se prête le mieux à l'investigation sur ces points.

Qu'appelle-t-on taches solaires ? En équilibre hydrostatique entre les actions de la gravitation et de la fusion des noyaux légers, notre étoile déverse depuis son cœur une énergie stable, dite la «constante solaire». Mais sa surface, en revanche, est extrêmement agitée : en dessous, des masses énormes de plasma porteuses de charges électriques sont en mouvement et engendrent des effets magnétiques et électriques colossaux... Les taches solaires, des zones sombres (car un peu plus froides) de 5 000 à 50 000 km de diamètre apparaissant à la surface, sont la manifestation de forts courants de convection (voir encadré ci-dessus). Leur nombre et leur intensité suivent un cycle de 11 ans et un autre de 80 à 100 ans. **Avantage de cet indice : les taches solaires sont facilement observées et enregistrées depuis le début des lunettes astronomiques, inventées par Galilée en 1610 ; quant aux astrologues chinois, ils les recensaient déjà il y a 2 700 ans.**

Les radio-isotopes révèlent le passé

Comment déterminer la valeur de certains paramètres dans un passé lointain : le flux de RCG, les températures, les teneurs en CO_2 ? Grâce aux radio-isotopes. Ils jouent le rôle d'une horloge imperturbable à travers les âges permettant une chronologie absolue. Des archives bien datées permettent donc de mettre en évidence des fluctuations climatiques de faible ampleur.

■ **Les RCG** produisent par interaction des radio-isotopes stables et instables dans l'atmosphère, la croûte terrestre, les météorites, les bio-organismes...

Le béryllium ^{10}Be produit dans l'atmosphère, de vie moyenne 7 millions d'années, est lessivé par les précipitations et se retrouve dans les glaces ; avec le chlore ^{37}Cl , de vie moyenne 300 000 ans, il est bien adapté à l'étude des âges paléolithiques. Le carbone ^{14}C , de vie moyenne 5700 ans, est complémentaire du béryllium ; il est absorbé par les substances organiques (coraux, microfossiles et pollens des sédiments marins) et il voit cesser son assimilation à la mort de tout organisme vivant.

■ **La teneur en oxygène ^{18}O** dépend de la composition isotopique de l'eau des précipitations ; mesurée dans les glaces polaires, les sédiments lacustres et marins, elle indique la température. Les températures de surface des océans se déduisent aussi de la croissance des coraux.

■ **Les teneurs en CO_2** sont mesurées dans les bulles de gaz prisonnières des glaces.

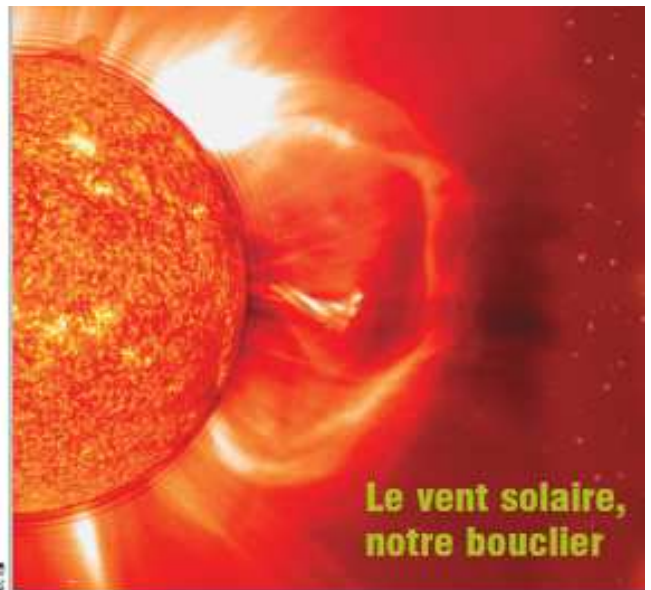


Prélèvement de carottes glaciaires.

PHOTO DRAC

Le «vent solaire» constitue un second signe de l'activité magnétique solaire. Ce gaz ionisé est constitué d'électrons et de protons qui se déplacent à vitesse supersonique dans l'espace interplanétaire vide. Il provient des trous coronaux, régions de la surface solaire où le champ magnétique a tendance à être plus ouvert. Le vent solaire transporte une sorte de bouteille magnétique dont les lignes de force parallèles courent la trajectoire des RCG chargés. D'où une sorte de bouclier, qui empêche une partie des RCG d'atteindre l'atmosphère terrestre. **Plus le Soleil est magnétiquement actif (ce qui se voit au nombre de taches solaires), plus le vent solaire est intense... et moins la Terre reçoit de RCG.**

Il serait donc logique que cette activité magnétique solaire ait influé sur les variations climatiques. Une étude récente [réf. 4], utilisant un modèle de régression linéaire (remontant des faits aux causes), est partie des mesures de la concentration des isotopes ^{10}Be dans les glaces du Groenland, et de l'Antarctique, et du ^{14}C dans les anneaux des arbres, pour en déduire la quantité de RCG parvenus sur Terre. S'appuyant sur ce résultat, les chercheurs ont calculé un nombre théorique de taches



Le vent solaire, notre bouclier

DRAC

solaires... Or cette quantité théorique se trouve en plein accord avec les mesures directes effectuées depuis 1610 ! En particulier, le petit âge glaciaire de 1645 à 1715 correspond au Minimum de Maunder, époque où les taches solaires avaient pratiquement disparu. Par contre, la période médiévale chaude a vu une augmentation de leur nombre (figure 3). Tout cela tendrait à prouver que **l'augmentation des RCG, lorsque le magnétisme solaire, moins actif, ne fait plus bouclier, refroidit la planète bleue... et que leur diminution, lorsque le Soleil se déchaine, la réchauffe !**

Taches coupables

Confirmation, si l'on se focalise sur le dernier siècle. Le nombre de taches solaires est en augmentation rapide depuis le début du XX^e siècle, et ce pour la première fois depuis un millénaire. Parallèlement, le flux de RCG sur la Terre a baissé de 10 à 40% (selon leur énergie) :

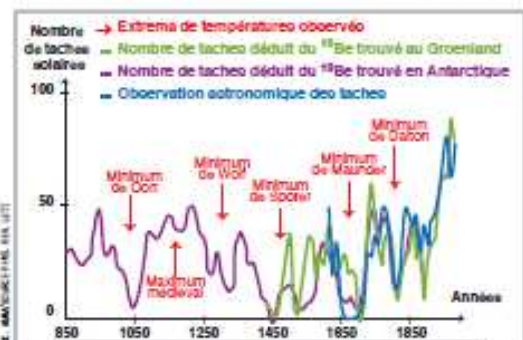


Fig. 3 : La quantité de taches solaires, qu'elle soit mesurée ou déduite des radio-isotopes, se trouve en accord avec les variations climatiques.



c'est attesté à la fois par les mesures de concentrations en ^{10}Be et par des mesures directes des RCG effectuées depuis cinquante ans. Plus probant encore : l'indice géomagnétique aa, enregistré depuis 1868 au moyen de deux magnétomètres antipodaux (Angleterre et Australie) [réf. ①]. Il mesure, au niveau de la Terre, la résultante du champ magnétique terrestre et du champ magnétique induit par le vent solaire. Sa variation depuis 1868 (figure 4) apparaît en forte corrélation avec la température globale moyenne de la Terre (voir encadré ci-dessous). La probabilité que la corrélation soit fortuite est inférieure à 10^{-21} ! **Les variations de l'indice aa sont décalées d'environ 6 ans par rapport à celles de la température, ce qui pourrait être attribué à l'inertie thermique des océans.** Une analyse spectrale des variations de l'indice aa par la méthode des ondeslettes fait apparaître des périodicités de 4, 11, 23, 31, 44, 100, 156 ans... mais aussi un terme non périodique en augmentation de 140 % depuis un siècle ! Cela souligne encore le lien entre le magnétisme solaire «anti-RCG» et le climat.

Enfin, donnée récente, on a pu mesurer par satellite l'énergie que le Soleil a émise tout au long de deux cycles. Pour s'apercevoir que **l'augmentation des taches solaires coïncide avec un réchauffement de la surface de l'astre lui-même** ! Cela s'explique probablement par la présence sur cette surface de plages et facules chaudes, qui font plus que compenser la «fraîcheur» – toute relative – des taches solaires.

Cet effet direct, de l'ordre de 0,1% de l'énergie solaire, représenterait une augmentation de l'irradiance solaire sur la Terre de $0,3 \text{ W/m}^2$; il pourrait être la cause de 15 à 25% du réchauffement terrestre. Quant à la diminution du flux de RCG due à l'activité magnétique solaire, qui réduit la quantité de nuages bas, elle serait responsable d'un réchauffement global de $1,2 \text{ W/m}^2$, d'après des estimations provenant de l'expérience Erbe (Earth Radiation Budget Experiment). **Ce forçage global, dû au Soleil, est comparable à celui de $1,5 \text{ W/m}^2$ attribué à l'augmentation en CO_2 depuis un siècle...** Bien sûr, vu la complexité des modèles, tous ces chiffres sont entachés d'incertitudes (environ 50%). Mais, si les effets astrophysiques voyaient leur ampleur confirmée, ils expliqueraient de manière naturelle une bonne part du réchauffement de $0,6^\circ\text{C}$ observé.

RÉFÉRENCES :

- ① H. Svensmark, «Physical Review Letters», vol. 81, p. 5 027 (1998).
- ② N. J. Shaviv, J. Veizer, «Geological Society of America Today», p. 4-10 (July 2003).
- ③ I. G. Usoskin et al., «Physical Review Letters», vol. 91, p. 1 101 (2003).
- ④ E. W. Cliver, V. Boriakoff, «Geophysical Research Letters», vol. 25, p. 1 035 (1998).
- ⑤ D. E. Parker et al., «Journal of Geophysical Research», vol. 99, p. 14 373 (1994).

Suspense

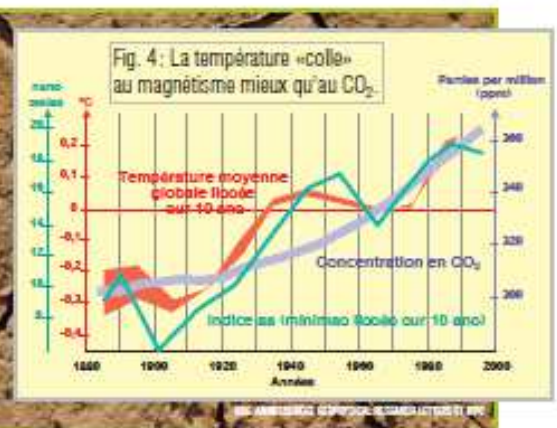
Tout concorde... Pourtant, il restera impossible d'être catégorique, tant que nous ne disposerons pas d'une théorie complète expliquant comment les RCG favorisent la formation des nuages bas. Les divers phénomènes en interaction sont en effet bien trop complexes pour se prêter à des simplifications abusives ; ainsi, curieusement, l'indice aa semble se stabiliser alors que la tempé-

Un siècle de réchauffement

Les modèles servent à déterminer une température globale de la Terre sur ces cent dernières années mettent tous en évidence l'existence de trois périodes :

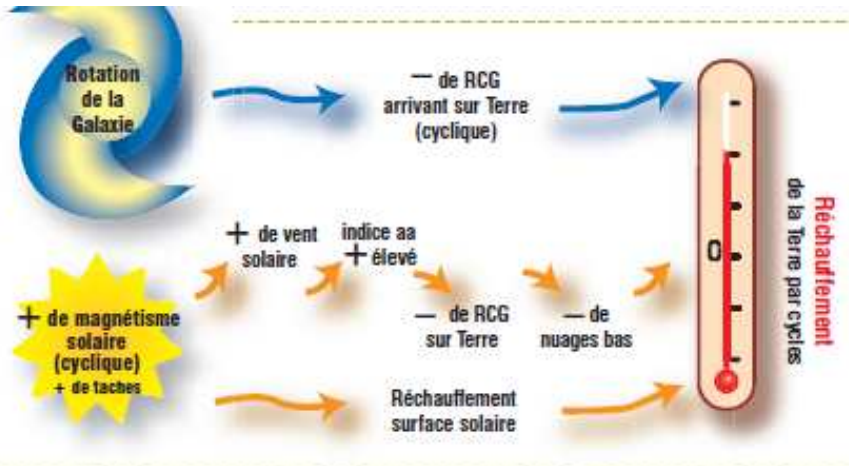
- une montée quasi linéaire d'environ $0,3^\circ\text{C}$ entre 1910 et 1990,
- un léger recul de $0,1^\circ\text{C}$ entre 1940 et 1975,
- une remontée d'environ $0,4^\circ\text{C}$ entre 1975 et 1998.

À noter que la concentration en CO_2 dans l'atmosphère subit, elle, une augmentation linéaire de 1900 à 1960, puis une montée plus rapide ensuite. La croissance des deux phénomènes sur le cours de siècle a suggéré l'existence d'une corrélation, pourtant extrêmement moins significative que la corrélation indice aa/température.



En résumé :

L'impact de ces facteurs astrophysiques sur la température est-il plus ou moins important que celui du CO₂ ?



La température moyenne globale demeure en augmentation ! Les prochaines années devraient permettre de mieux préciser expérimentalement l'origine du réchauffement terrestre. Il reste que, au cours du dernier siècle, le flux magnétique émis par le Soleil a bel et bien augmenté d'un facteur supérieur à 2, entraînant une décroissance du flux des RCG et une diminution de la couverture en nuages bas. Ce processus est-il responsable de 30 % ou 70 % du réchauffement ?

Cela reste à déterminer. Mais il ne s'agit pas pour autant de négliger les conséquences néfastes de l'activité humaine sur le climat, notamment concernant le CO₂ et l'ozone. Sur ces points, au moins, chacun de nous peut agir en changeant son comportement.

PIERRE BAREYRE (AL 64), CONSEILLER SCIENTIFIQUE, PHYSIQUE CORPUSCULAIRE ET COSMOLOGIE, COLLÈGE DE FRANCE.



auto-chassis.com

Auto Chassis International, équipementier automobile, conçoit, fabrique et commercialise des systèmes de liaison au sol pour les constructeurs.

ACI regroupe l'expertise et la maîtrise de l'ensemble des technologies pour offrir un service complet. Spécialiste des modules châssis, ACI assure une présence mondiale.



Auto Chassis International

Your Chassis System Supplier

Japon
KS Bldg 8F, 4-5 Kojimachi
Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083
Tél. +81(3) 3261 1866
Fax +81 (3) 3264 3654

États-Unis
3331 West Big Beaver Road
Suite 101 Troy, MI 48064
Tél. +1 248 458 1600
Fax +1 248 816 3282

HEADQUARTERS
La France - France
15, avenue Pierre Piffault
72086 Le Mans cedex 9
Tél. +33(0)2 43 16 43 43
Fax +33(0)2 43 16 58 02

Brazil
Chapada
83705-570 Araucária-pr
Tél. +5 541 643 10 25
Fax +5 541 216 98 548

Roumanie
Hala Puncti Mioveni
Str Uzinei Nr 2a
Judetul Arges
Tél. +40 248 50 45 05
Fax +40 248 50 45 06