

LE CONTEXTE ▸ L'activité solaire varie selon différentes échelles de temps. Ainsi, le cycle solaire de onze ans entraîne une variation d'éclairement d'environ 0,1%. Après plusieurs décennies d'observation et de modélisations,

certaines chercheurs estiment que des fluctuations d'éclairement solaire ont pu être à l'origine de changements climatiques importants, comme l'épisode froid qui s'est abattu sur l'Europe entre 1550 et 1850. Une récente

analyse de l'éclairement sur les trois derniers cycles suggère une augmentation de 0,005% par an, qui contribuerait de façon non négligeable au réchauffement. Pour le moment, cette analyse ne fait pas l'unanimité.

Coups de Soleil sur la planète

Pendant le dernier millénaire, la Terre a connu de brèves périodes de réchauffement ou de refroidissement. Peut-on relier les bouleversements climatiques du XI^e et du XVI^e siècle aux anomalies de l'éclairement solaire ? Certains scientifiques le pensent. D'autres vont jusqu'à mettre en avant, modèle à l'appui, le rôle indirect des cycles d'activité solaire dans le réchauffement actuel.

Cet article est la version revue et mise à jour par l'auteur du texte paru dans le n° 352 de *La Recherche*.

Édouard Bard, professeur au Collège de France, est titulaire de la chaire d'évolution du climat et de l'océan. Il travaille au Cerege (CNRS - Université Aix-Marseille-III), Europôle de l'Arbois, à Aix-en-Provence.

bard@cerege.fr

Le Soleil a-t-il une influence sur le climat ? Cette question peut sembler saugrenue car notre étoile est à l'origine de pratiquement tous les phénomènes affectant l'atmosphère et l'océan. Pourtant, la relation entre Soleil et climat est restée un « sujet tabou » jusqu'au début des années 1980. La raison ? Un manque cruel de connaissances sur le lien entre l'activité du Soleil et son éclairement. Pendant de nombreuses années, l'énergie rayonnée par le Soleil était supposée invariable. D'où l'utilisation du terme de « constante solaire » (voir l'encadré, p. 28). Néanmoins, certains doutaient de cette stabilité. Leurs arguments : des corrélations troublantes entre des fluctuations de l'activité solaire et des phénomènes atmosphériques mal expliqués. Les recherches sur les mécanismes de l'influence

solaire sur le climat bénéficient d'un formidable regain d'attention [1-5], non sans controverses. Une certitude : l'activité solaire varie selon différentes échelles de temps. Un témoin de ces fluctuations est la variation du nombre de taches solaires* selon des cycles de onze ans. Grâce aux mesures réalisées par les sondes spatiales, il est maintenant clair que la « constante solaire » fluctue elle aussi à court terme et que le cycle de onze ans se caractérise par une variation de l'éclairement total d'environ 0,1% [fig. 1]. Paradoxalement, l'éclairement augmente avec le nombre de taches solaires : les taches assombrissent le Soleil, mais leur effet est masqué par celui des zones brillantes qui leur sont associées. Plusieurs équipes d'astrophysiciens ont développé des modèles pour traduire



L'ÉNERGIE RAYONNÉE PAR LE SOLEIL A LONGTEMPS ÉTÉ CONSIDÉRÉE COMME INVARIABLE. Cette supposée stabilité est à l'origine du terme « constante solaire », qui désigne l'éclairement solaire au niveau de la Terre.

©François Henry/REA

les observations de l'activité solaire en termes d'éclairement. Leurs travaux ont permis d'estimer que l'éclairement solaire varie également à long terme, avec des périodes de faible éclairement qui correspondent à des baisses d'activité du Soleil [fig. 1]. Hélas, nous ne disposons de données que pour les quatre derniers siècles, et aucune observation astronomique fiable ne permet de quantifier l'éclairement solaire avant l'invention de la lunette astronomique. Il est cependant possible de reconstituer l'activité magnétique du Soleil (reliée à l'éclairement) en étudiant l'abondance sur Terre de certains isotopes*, les cosmonucléides. Ces derniers se forment par interaction du rayonnement cosmique (surtout des protons) avec les molécules de l'atmosphère, et leur production est modulée par l'intensité du champ magnétique

solaire. Les géochimistes mesurent l'abondance des cosmonucléides dans des « archives naturelles » : les glaces polaires (pour le béryllium 10 et le chlore 36), les anneaux d'arbre ou les coraux (pour le carbone 14). Les fluctuations de l'éclairement ainsi reconstituées sont en bon accord avec celles établies à partir des enregistrements du nombre de taches solaires [fig. 1].

Un cycle de 1 500 ans ?

Le principal enseignement de ces études est que les minima d'éclairement sont nombreux et que le Soleil a passé une partie importante des derniers millénaires en phase calme, avec probablement un éclairement plus faible que la valeur actuelle de 1 368 Watts par mètre carré. Pour le dernier millénaire, il semble que les fluctuations solaires soient à l'origine de chan-

gements climatiques importants, tels l'« optimum médiéval* » ou le « petit âge glaciaire* » qui lui a succédé. Gerard Bond, de l'université Columbia à New York, émet même l'hypothèse que ces variations d'activité solaire sont responsables de fluctuations climatiques et océanographiques quasi périodiques, avec un cycle d'environ mille cinq cents ans [2]. La succession optimum médiéval-petit âge glaciaire constituerait le dernier cycle. Selon cette hypothèse, notre climat serait actuellement en phase ascendante, en passe d'atteindre un nouvel optimum chaud dans quelques siècles. Les climatologues restent prudents car ces hypothèses sont uniquement fondées sur des correspondances approximatives entre des enregistrements paléoclimatiques et les variations de l'activité solaire.

*Les taches solaires sont des zones sombres visibles à la surface du Soleil, caractérisées par des températures plus froides et de très forts champs magnétiques.

*Les isotopes sont des atomes ayant le même nombre d'électrons et de protons, mais dont la quantité de neutrons diffère.

*Le « petit âge glaciaire », période de froid qui a touché l'Europe entre environ 1550 et 1850, a succédé à un « optimum médiéval », période plus chaude centrée sur le XII^e siècle. Il s'agit en fait de fluctuations climatiques complexes dont le caractère global reste l'objet de controverses.

[1] J. Lean, D. Rind, *Science*, 292, 234, 2001.

[2] G. Bond et al., *Science*, 294, 2130, 2001.

[3] D.T. Shindell et al., *Science*, 294, 2149, 2001.

[4] N.D. Marsh, H. Svensmark, *Phys. Rev. Lett.*, 85 (23), 5004, 2000.

[5] A. Ganopolski, S. Rahmstorf, *Phys. Rev. Lett.*, 88 (3), 038501-1, 2002.

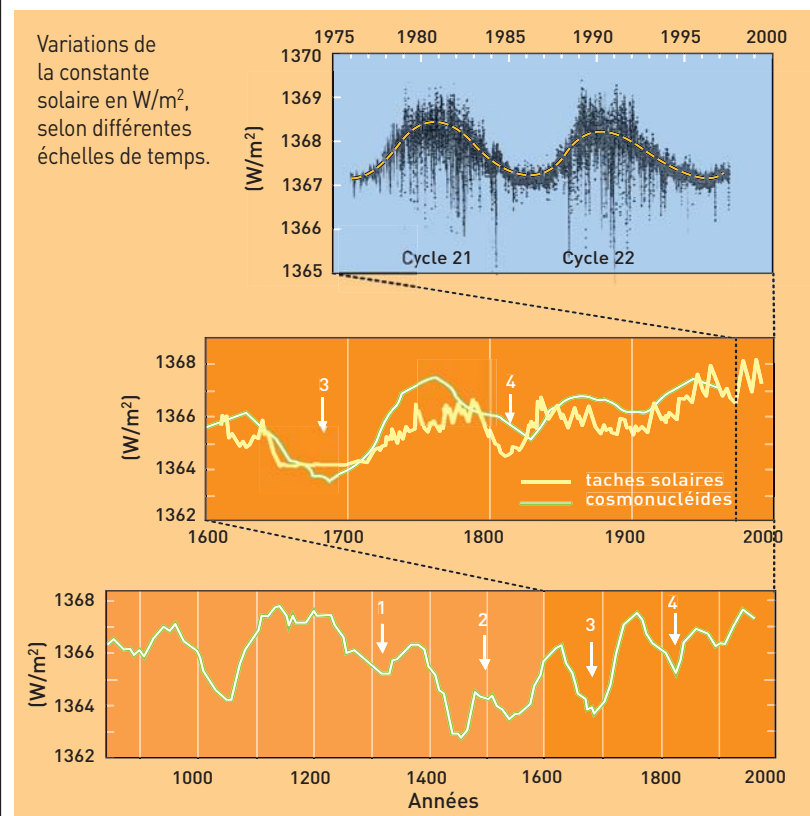
Les modèles mathématiques de la circulation globale de l'atmosphère et de l'océan suggèrent qu'un minimum solaire entraîne un refroidissement du climat de l'ordre de 0,5 °C à 1 °C. Par ailleurs, ce refroidissement ne serait pas réparti de façon homogène, mais les baisses de température se concentreraient sur l'Europe et l'Amérique du Nord [3]. À long terme, les fluctuations solaires pourraient être aussi la cause de changements hydrologiques qui affecteraient la circulation océanique en Atlantique nord [5]. Le système océan-atmosphère serait donc susceptible de puissamment amplifier ces petites variations solaires.

Modulation du rayonnement cosmique

Quelle est l'importance de la variabilité solaire dans le réchauffement global récent? Rappelons pour commencer le consensus actuel : l'augmentation rapide de 0,4 °C pendant les trente dernières années serait essentiellement due aux gaz à effet de serre rejetés par l'industrie. La contribution solaire n'excéderait pas le quart, voire le tiers de ce réchauffement. Plusieurs scientifiques pensent aussi qu'une partie du réchauffement d'environ 0,8 °C depuis le milieu du XIX^e siècle est liée à la lente augmentation de l'éclairement solaire à partir de 1750.

Selon certains spécialistes, le réchauffement des dernières décennies serait une conséquence indirecte des fluctuations solaires et non de l'augmenta-

Fig.1 Les hauts et les bas de la « constante solaire »

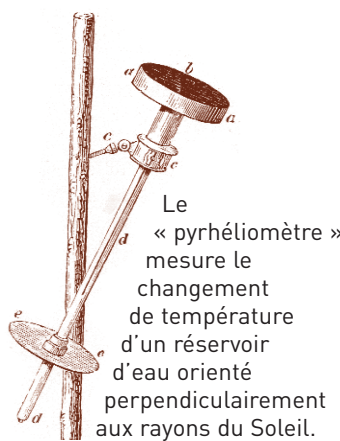


LA CONSTANCE SOLAIRE fluctue à différentes échelles de temps, et particulièrement selon des cycles de onze ans, comme le suggèrent les deux derniers cycles solaires (courbe du haut), d'après les données de R.C. Willson compilées par E. Nesme-Ribes et G. Thuillier). La variation de l'éclairement estimée à partir des observations de taches solaires est représentée par la courbe jaune [8]. Les minima ont été baptisés d'après des noms de scientifiques : 1) Wolf, 2) Spörer, 3) Maunder, 4) Dalton. Le minimum de Maunder, entre 1645 et 1715, est le plus connu ; durant cette période, les taches solaires étaient pratiquement absentes. Ces résultats sont confirmés par la reconstitution approximative des fluctuations d'éclairement à partir des cosmonucléides [9].

ÉCLAIREMENT SOLAIRE : LES PREMIÈRES MESURES

La constante solaire traduit l'éclairement solaire reçu au niveau de la Terre : une surface de 1 m² perpendiculaire aux rayons du Soleil reçoit 1 368 watts. Cette notion a été introduite par le physicien français Claude Pouillet (1790-1868), qui mesura le flux de chaleur généré par les rayons du Soleil.

Le « pyrhéliomètre » qu'il mit au point pour ses recherches comprend un thermomètre (a) mesurant la température d'un grand réservoir d'eau (a) dont la face supérieure plane,



orientée perpendiculairement aux rayons du Soleil, est peinte en noir (b). Après un temps donné, la différence de température obtenue lors du réchauffement permet, en connaissant la capacité calorifique de l'eau, de calculer le flux de chaleur reçu. Le physicien a estimé empiriquement que ce réchauffement est le produit de deux paramètres : d'une part, « la constante solaire, ou celle qui contient, comme élément essentiel, la puissance calorifique constante du Soleil » et, d'autre part, la

« constante atmosphérique, ou celle qui contient, comme élément essentiel, le pouvoir de transmission variable dont se trouve douée l'atmosphère pour laisser arriver jusqu'à la surface de la Terre des proportions plus ou moins grandes de la chaleur solaire incidente ». Cette seconde constante est portée à la puissance d'un coefficient géométrique qui tient compte de l'épaisseur atmosphérique traversée pendant l'expérience.

D'après C. Pouillet, CRAS, 7, 24, 1838.

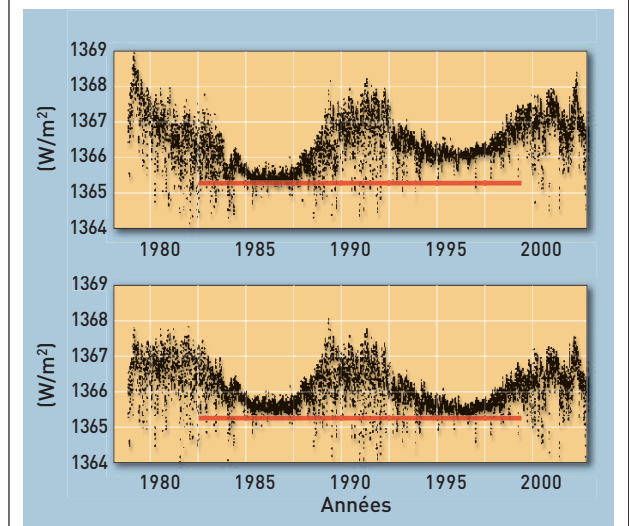
tion des gaz à effet de serre. En particulier, Henrik Svensmark et ses collaborateurs danois ont remis au goût du jour une hypothèse déjà ancienne au sujet de l'influence du rayonnement cosmique sur les nuages. On peut faire le parallèle, simpliste, avec le principe de la « chambre à brouillard », ancien détecteur de physique des particules dans lequel les ions produits par les interactions des particules ionisantes avec le gaz se comportent comme des germes de condensation le long des trajectoires. L'hypothèse défendue par les chercheurs danois met en avant la modulation du rayonnement cosmique par le champ magnétique du vent solaire : un minimum d'activité du Soleil va de pair avec une augmentation du rayonnement cosmique sur Terre et provoquerait une augmentation de la nébulosité. Cette théorie a fait grand bruit en 1997 lorsque l'équipe danoise a signalé une corrélation positive entre la couverture nuageuse et l'intensité du rayonnement cosmique modulée par le Soleil pour la période 1984-1991. Mais aucune étude ultérieure n'est venue confirmer cette correspondance. Qui plus est, les données régionales concernant les États-Unis montreraient même une corrélation opposée à celle proposée par les Danois [6]. Il est important de souligner que l'hypothèse est encore très mal quantifiée à plusieurs niveaux : relation entre les rayons cosmiques et les noyaux de condensation, variation temporelle et spatiale de la modulation solaire... Après l'annonce fracassante de 1997 et les affirmations probablement hâtives sur l'importance du Soleil pour expliquer le réchauffement mondial des dernières décennies (« Le forçage climatique des nuages [causé par les rayons cosmiques] peut donc expliquer presque tous les changements sur la période étudiée [1970-1990] », les conclusions des derniers articles de l'équipe danoise sont devenues beaucoup plus mesurées (« on ne peut exclure un effet possible du flux de rayons cosmiques »). Il faut souligner que l'impact climatique des nuages dépend fortement de leurs propriétés

radiatives et donc de leur altitude. La modulation solaire envisagée par les Danois devrait induire une diminution des nuages de haute altitude aux hautes latitudes, lors d'une période de forte activité solaire. Or ces nuages de haute altitude ont en fait globalement tendance à réchauffer le climat, et non à le refroidir comme le font les nuages de basse altitude. L'hypothèse serait donc incompatible avec l'apparente corrélation entre l'activité solaire et le réchauffement mondial. Les chercheurs danois ont ensuite modifié leur analyse et proposent désormais une influence solaire limitée aux nuages de basse altitude, dont la couverture semblerait mieux suivre les fluctuations solaires. Bien que les auteurs présentent quelques hypothèses de travail, cette nouvelle proposition semble un peu paradoxale car on s'attend plutôt à un effet solaire maximum pour la partie haute de l'atmosphère et non pour sa partie la plus basse dans laquelle les noyaux de condensation ne manquent pas. Seules les données sur les prochains cycles solaires nous diront si l'équipe danoise est sur une piste sérieuse. Pour l'instant, les mécanismes physico-chimiques d'un éventuel effet du rayonnement cosmique sur la formation des nuages restent très mal compris.

Le prochain minimum

Certains autres sceptiques quant à l'origine anthropique d'un renforcement de l'effet de serre citent des travaux plus conventionnels, comme ceux de Richard Willson, de la Nasa et de l'université Columbia. Pour ce scientifique, l'éclairement solaire augmenterait à long terme. Cette tendance est, à l'heure actuelle, imprécise et controversée. Pour obtenir une bonne estimation, il nous faut pouvoir comparer l'éclairement pendant les minima du cycle solaire de onze ans, car les maxima d'activité se caractérisent par une extrême variabilité de haute fréquence liée à la présence des taches et à la rotation du Soleil. Or l'analyse de Willson ne tient que sur la comparaison des deux minima de 1986 et 1997 [fig. 2]. Il faut aussi noter que les différentes

Fig.2 Deux reconstitutions



ÉCLAIREMENT SOLAIRE ENREGISTRÉ PAR LES SONDES SPATIALES pour les trois derniers cycles solaires [7]. Ces courbes correspondent à la compilation de mesures brutes réalisées par différents instruments ne couvrant pas la totalité des trois cycles. Les données brutes sont corrigées de plusieurs facteurs qui ne font pas l'unanimité dans la communauté scientifique. Deux reconstitutions ont été publiées : l'une (en haut) montre une lente augmentation de l'éclairement et l'autre (en bas) ne montre pas de tendance à long terme.

bases de données disponibles sont assez fragmentaires et qu'elles doivent d'abord être homogénéisées et corrigées de plusieurs biais, pour certains liés à la dégradation des capteurs dans l'espace. Pour l'instant, il existe essentiellement deux reconstitutions [7] : celle de Willson, qui montrerait une augmentation annuelle de 0,005 % de l'éclairement, et l'autre, sans tendance à long terme, établie par Judith Lean du Naval Research Laboratory de Washington et Claus Fröhlich du World Radiation Center de Davos, en Suisse. Il faudra probablement attendre le prochain minimum, vers 2008, pour trancher entre ces deux interprétations. ■ E.B.

POUR EN SAVOIR PLUS

- ▷ J. Liliensten et J. Bornarel, *Sous les feux du Soleil*, EDP Sciences, 2001.
- ▷ E. Nesme-Ribes et G. Thuillier, *Histoire solaire et climatique*, Belin, 2000.
- ▷ M.W. Friedlander, *Cosmic rays*, Harvard University Press, 1989.
- ▷ <http://earthobservatory.nasa.gov/>
- ▷ La Recherche hors-série n° 15 « Le soleil, les secrets d'une étoile », avril 2004.
- ▷ www.larecherche.fr

[6] P.M. Udelhofen, R.D. Cess, *Geophys. Res. Lett.*, 28 (13), 2617, 2001.
[7] R.C. Willson, A.V. Mordvinov, *Geophys. Res. Lett.* 30 (5), 1199, 2003.
[8] J. Lean, D. Rind, *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.*, 61, 25, 1999.
[9] E. Bard et al., *Tellus*, 52B, 985, 2000.