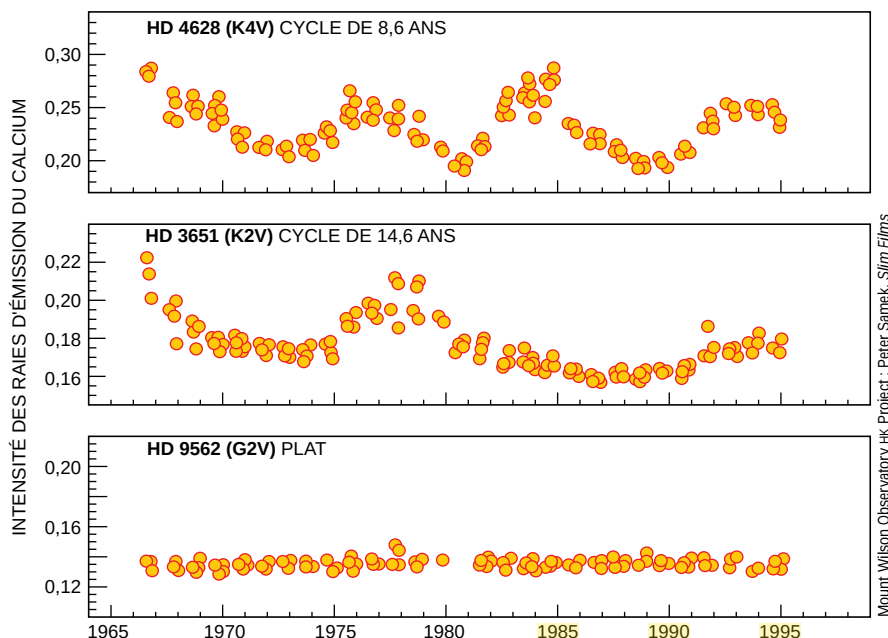




7. LES CYCLES STELLAIRES, c'est-à-dire les variations d'activité magnétique dans les étoiles analogues à notre Soleil, sont révélés par les émissions du calcium dans la région violette du spectre lumineux. Les trois étoiles considérées ici présentent un comportement magnétique semblable à celui du Soleil : des cycles bien marqués (*en haut*), un cycle suivi d'un minimum de type Maunder (*au centre*), et un état totalement calme, comme le minimum de Maunder (*en bas*). L'étude de ces étoiles indique que la luminosité du Soleil peut varier bien plus qu'elle ne le fait actuellement.

activité (lorsque l'éclat du Soleil croît ou diminue, son énergie totale est sans doute redistribuée sous d'autres formes : cinétique, magnétique, thermique ou potentielle). Au cours des 16 dernières années d'observation par satellite, l'émission totale d'énergie par le Soleil a varié d'environ 0,1 pour cent au cours du cycle, entre la phase plus brillante, de forte activité magnétique, et la phase moins brillante, plus calme.

Les observations par satellite sont si récentes que nous ignorons la variabilité de l'éclat du Soleil avant 1978. Cette information est néanmoins cruciale pour évaluer l'influence que le Soleil exerce sur la Terre. L'examen des cycles de «taches stellaires», sur d'autres étoiles que le Soleil, aide à comprendre ce lien.

L'étude de la surface des étoiles n'est pas facile, car elles sont si éloignées qu'elles nous apparaissent sous la forme de points. Si l'on ne voit pas les taches stellaires individuellement, on peut cependant les détecter en étudiant le champ magnétique qui leur est associé. Le champ magnétique qui chauffe les couches externes de l'atmosphère d'une étoile provoque une émission d'énergie à des longueurs d'onde spécifiques. Par exemple, dans le cas du Soleil, l'intensité des deux raies d'émission violettes du calcium

(aux longueurs d'onde de 396,7 et de 393,4 nanomètres) est proportionnelle à l'intensité et à l'étendue des champs magnétiques. L'intensité de ces raies mesure donc le magnétisme de surface d'une étoile.

En 1966, à l'Observatoire du mont Wilson, Olin Wilson entreprit de déterminer l'activité magnétique d'une centaine d'étoiles de la séquence principale, c'est-à-dire les étoiles qui brûlent de l'hydrogène, comme le Soleil (plus tard, lorsque l'hydrogène s'épuise, l'étoile gonfle et forme une géante rouge). Les émissions violettes du calcium ont révélé que la plupart de ces étoiles sont magnétiquement actives. Les fluctuations varient en amplitude et en durée, principalement selon l'âge et la masse de l'étoile.

Toutes ces étoiles ont un nombre dynamo supérieur à la valeur critique nécessaire pour engendrer des champs magnétiques. Les étoiles plus jeunes que le Soleil (un à deux milliards d'années) ont une courte période de rotation (environ 10 à 15 jours); leur nombre dynamo élevé correspond à des fluctuations chaotiques d'activité magnétique sur des intervalles aussi courts que deux ans, sans cycles bien définis. Les fluctuations se répètent parfois, avec des périodes comprises entre 2 et 20 ans, et qui s'allongent avec l'âge de l'étoile.

En vieillissant, les étoiles ralentissent, parce que leur moment cinétique est dissipé par le vent stellaire ; le nombre dynamo D diminue. Un cycle dynamo apparaît alors, avec une période d'environ six à sept ans et, parfois même, avec deux périodes indépendantes. Plus tard, lorsque la valeur de D a encore diminué, une des deux périodes devient prépondérante, s'allongeant avec l'âge de l'étoile, jusqu'à 8 à 14 ans ; des minimums de Maunder apparaissent parfois. Pour les étoiles très vieilles, dont la vitesse de rotation a encore diminué, nous prédisons que le champ magnétique est stationnaire. L'échantillon de O. Wilson contient quelques étoiles très vieilles, mais elles présentent encore des cycles indiquant qu'une dynamo stationnaire ne serait pas atteinte en dix milliards d'années, juste avant que l'étoile ne devienne une géante rouge.

Afin de mieux comprendre la dynamo solaire, S. Baliunas et ses collègues du mont Wilson et de l'Université du Tennessee n'ont conservé du vaste échantillon de O. Wilson que les étoiles semblables au Soleil par la masse et par l'âge. Ce groupe contient une trentaine d'étoiles observées pendant 30 ans. La plupart d'entre elles ont des cycles analogues à ceux du Soleil, en amplitude et en période. Environ un quart des données montre que les étoiles sont dans un état calme, qui ressemble au minimum de Maunder solaire. Aussi les étoiles de type solaire passeraient-elles le quart de leur existence dans un état calme.

Nous venons de découvrir une étoile, HD 3651, en transition entre la phase cyclique et le minimum de Maunder : HD 3651 a eu un comportement périodique pendant environ 12 ans, puis ses fluctuations ont cessé lorsque son activité magnétique de surface a diminué. L'apparition de son minimum de Maunder fut étonnamment rapide. Ainsi les étoiles de type solaire observées pendant quelques décennies nous offrent-elles des «instantanés» de la variabilité solaire que l'on n'obtiendrait qu'après des siècles d'observation du Soleil.

Nous pouvons aussi comparer l'éclat de ces étoiles de type solaire avec leur activité magnétique. En 1984, des observations photométriques de certaines des étoiles de O. Wilson commencèrent aux Observatoires Lowell et du pic Sacramento ; depuis 1992, ces observations sont automatisées. Toutes

les étoiles sont plus brillantes à l'approche de leur activité magnétique maximale. Certaines étoiles ont une variation d'éclat aussi faible que le Soleil – 0,1 pour cent sur le dernier cycle de 11 ans –, alors que la variation d'éclat d'autres étoiles atteint 0,6 pour cent lors d'un cycle. Aujourd'hui le Soleil varierait donc moins que par le passé.

Grâce aux observations stellaires des dernières années, les astrophysiciens ont retracé l'évolution des étoiles de type solaire. Les étoiles jeunes ont une période de rotation relativement courte, de quelques jours, et une activité magnétique intense et irrégulière. Des variations d'éclat de quelques pour cent accompagnent ces variations d'activité magnétique. Les étoiles jeunes sont toutefois moins lumineuses lors du pic d'activité, sans doute parce que les taches sombres sont si grandes qu'elles dominent les facules brillantes qui les entourent. Quand les étoiles vieillissent, leur rotation ralentit et leur activité magnétique décroît. Des minimums de Maunder apparaissent pour ces étoiles «plus vieilles». Leur éclat est maximum lorsque leur nombre de taches est élevé. La luminosité peut alors varier de un pour cent au cours d'un cycle.

Quelle influence sur la Terre?

Ces résultats indiquent un changement de luminosité d'au moins 0,4 pour cent entre la phase cyclique et le minimum de Maunder. Cette valeur correspond à une décroissance de l'émission nette d'énergie du Soleil de un watt par mètre carré au sommet de l'atmosphère terrestre. Des simulations effectuées au Laboratoire de météorologie dynamique, à Paris, montrent qu'une telle accalmie, si elle dure plusieurs décennies, peut refroidir la température moyenne de la Terre de un ou deux degrés. Ainsi s'expliquerait le refroidissement observé durant le minimum de Maunder.

Toutefois, les gaz à effet de serre libérés par l'activité humaine depuis le début de la Révolution industrielle, à la fin du XVIII^e siècle, peuvent réchauffer la Terre, en piégeant la chaleur qui autrement serait rayonnée vers l'espace. Ce réchauffement équivaut à l'apport de deux watts par mètre carré au sommet de l'atmosphère. Le Soleil n'a apparemment fourni qu'entre 0,5 et 1 watt par mètre carré à la Terre ces

derniers siècles. Si le chauffage direct est le seul moyen par lequel le Soleil fait varier le climat terrestre, le rôle des gaz à effet de serre devrait être dominant et avoir supplanté toute influence de l'activité solaire.

Le lien entre climat et taches solaires semble néanmoins persistant. Au cours des 100 dernières années, les températures sur la Terre ont varié parallèlement aux cycles solaires. En outre, les cernes de croissance des arbres révèlent que, au cours des 5 000 à 6 000 dernières années, six minima du magnétisme solaire sur sept coïncident avec des périodes de refroidissement terrestre. Et le cycle des taches solaires est corrélé à la circulation des vents stratosphériques, pour des raisons encore mystérieuses. Ainsi le Soleil influencerait aussi la Terre par des voies indirectes, mais puissantes.

Les variations des émissions ultraviolettes solaires, par exemple, peuvent modifier la quantité d'ozone dans la haute atmosphère, de même que sa dynamique. Des simulations récentes indiquent également que des vents dans la stratosphère inférieure peuvent répercuter des variations de l'éclat du Soleil jusqu'à la troposphère, où elles interagissent plus directement avec le système climatique. Ces sujets sont maintenant vigoureusement débattus. La découverte des moyens par lesquels le Soleil réchauffe la Terre fournit des informations cruciales concernant le rôle joué par l'humanité – et le rôle joué par le Soleil – dans le mécanisme de modification du climat.

Elisabeth NESME-RIBES est astronome à l'Observatoire de Paris. Sallie BALIUNAS est chercheur au Centre d'astrophysique de Cambridge (Massachusetts). Dmitry SOKOLOFF est professeur de mathématiques au Département de physique de l'Université de Moscou.

Jean-Claude PECKER, *Sous l'étoile Soleil*, Fayard, 1984.

Peter FOUKAL, *Le Soleil : une étoile variable*, in *Pour la Science* n° 150, avril 1990.

Robert SADOURNY, *Le climat de la Terre*, Dominos Flammarion, 1994.

Kenneth J.H. PHILLIPS, *Guide to the Sun*, Cambridge University Press, 1992.

Helen WRIGHT, *Explorer of the Universe: A Biography of George Ellery*, American Institute of Physics Press, 1994.
