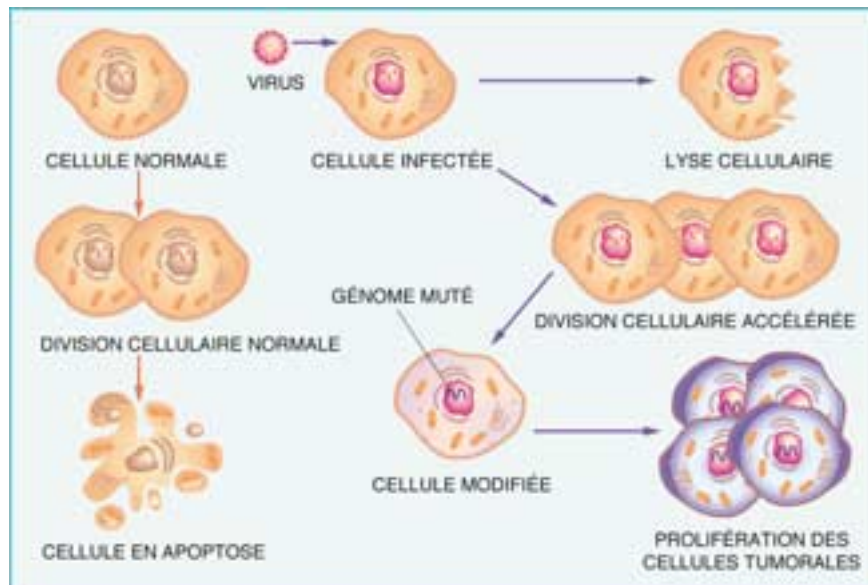


Comment un virus peut-il participer aux mécanismes tumoraux ? Tous les gènes viraux requis pour l'immortalisation des lymphocytes B et pour leur transformation sont des gènes exprimés durant la latence. On en a identifié 11, et, parmi eux, cinq jouent un rôle direct ou indirect dans l'immortalisation cellulaire : EBNA2, EBNA3A, EBNA3C, EBNA5 et LMP-1. Une autre protéine, EBNA1, est nécessaire au maintien du génome viral durant la division des lymphocytes B infectés de façon latente, puisqu'elle assure la réplication synchrone de l'ADN viral et de l'ADN cellulaire durant la mitose. La protéine EBNA2 est indispensable à la transformation tumorale : c'est une protéine nucléaire qui active plusieurs gènes cellulaires, notamment le proto-oncogène *c-fgr* (un proto-oncogène est un gène cellulaire qui, activé, devient un oncogène, un gène du cancer). La protéine EBNA2 active la division des cellules infectées et empêche leur apoptose (normalement, l'apoptose oblige les cellules anormales à se « suicider »).

La protéine EBNA5 empêcherait les gènes suppresseurs de tumeurs *p53* et *Rb* d'agir. Ces protéines agissent en synergie pour activer la division des lymphocytes B infectés et empêcher leur mort par apoptose. La conjugaison de ces mécanismes provoque une prolifération incontrôlée des lymphocytes et favorise l'émergence de mutations dans le génome cellulaire. Les mécanismes tumoraux se mettent progressivement en place dans la cellule modifiée, laquelle se multiplie au détriment des cellules environnantes.

Chez les personnes immunodéprimées, par exemple chez les patients infectés par le VIH ou ayant reçu une greffe d'organe, les lymphocytes contenant le virus Epstein-Barr se multiplient sans être éliminés par le système immunitaire. Toutefois, on s'interroge : comment un lymphome peut-il se développer chez une personne qui n'est pas immunodéprimée ? Le virus Epstein-Barr agirait comme un interrupteur, activant temporairement la division des cellules infectées au gré d'une immunodépression passagère, par exemple. L'évolution de cette prolifération déclenchée par un virus vers un mécanisme tumoral requiert nécessairement plusieurs étapes au cours desquelles un ou plusieurs proto-oncogènes cellulaires sont activés et plusieurs anti-oncogènes inhibés.

Le virus de l'hépatite B et les papillomavirus peuvent aussi participer à



6. APRÈS S'ÊTRE DIVISÉE plusieurs fois, une cellule normale finit par s'autodétruire, par un mécanisme d'apoptose. Lorsqu'une cellule est infectée par un virus, elle est généralement détruite par un mécanisme de lyse. Toutefois, des cellules infectées peuvent persister. Quand le virus active la division cellulaire et bloque les mécanismes d'apoptose, des mutations du génome cellulaire risquent de se produire, et les cellules modifiées peuvent survivre : quand une cellule dont le génome est muté se multiplie de façon incontrôlée, une tumeur apparaît.

l'apparition de cancers. L'infection chronique par le virus de l'hépatite B prédispose au cancer du foie. La régénération intensive des cellules hépatiques, due à l'élimination des cellules infectées par les lymphocytes cytotoxiques, serait à l'origine de la genèse des tumeurs.

L'infection persistante due au papillomavirus peut aussi jouer un rôle déterminant dans l'émergence de pathologies tumorales : dans le cas des cancers du col de l'utérus associés aux papillomavirus de types 16 et 18, l'intégration accidentelle du génome viral dans l'ADN cellulaire peut déclencher une expression renforcée des protéines virales *E₆* et *E₇*. Parce qu'elles neutralisent les deux gènes suppresseurs de tumeurs *p53* et *Rb*, ces deux protéines entraînent la cellule vers une prolifération incontrôlée et favorisent le développement d'un cancer.

Ainsi, les infections virales persistantes, dont l'expression clinique reste longtemps silencieuse, sont parfois le lit d'affections plus graves qui témoignent soit de l'action cancérigène du virus, soit de son action délétère sur une population cellulaire particulière. Les infections chroniques ou latentes se manifestent cliniquement quand l'équilibre entre le virus et l'hôte est rompu. Le traitement des infections persistantes repose sur des agents thérapeutiques qui enrayent le cycle répli-

catif de ces virus sans perturber la physiologie des cellules saines.

Ces traitements inhibent temporairement les réactivations virales et réduisent la quantité de virus produit lors des infections chroniques, ce qui diminue à la fois le potentiel contagieux des patients infectés et les effets du virus sur l'organisme. Cependant, la spécificité d'action de ces molécules explique l'émergence de variants viraux résistants, et l'échec, à long terme, des traitements disponibles aujourd'hui.

Jean-Claude NICOLAS dirige le Service de virologie de l'Hôpital Rothschild, à Paris. Avec Vincent MARÉCHAL, il mène des recherches sur les mécanismes de tumorigenèse déclenchée par les virus chez les patients immunodéprimés.

Virus et cancer humain, sous la direction de J.-Cl. Nicolas et V. Maréchal, in *Revue française des laboratoires*, vol. 265, 1994.

J. M. MCCUNE, *Viral Latency in HIV Disease*, in *Cell*, vol. 82, pp. 183-188, 1995.

Le virus Epstein-Barr, biologie et clinique, sous la direction de J.-Cl. Nicolas et V. Maréchal, in *La lettre de l'infectiologue*, tome X, n° 5, 1995.

R. AHMED, L.A. MORRISON, D.M. KNIPE, *Persistence of Viruses*, in *Fields Virology*, third edition, pp. 219-249, 1996.

La dynamo stellaire

ELISABETH NESME-RIBES • SALLIE BALIUNAS
DMITRY SOKOLOFF

Les cycles des taches sombres observées sur le Soleil et sur d'autres étoiles aident les astronomes à comprendre les cycles d'activité magnétique du Soleil et leur impact sur le climat de la Terre.

En 1801, méditant sur les caprices du climat anglais, l'astronome William Herschel observa une relation entre le prix du blé et la disparition des taches solaires. Toutefois, cette relation ne dura pas, de sorte que les scientifiques la reléguèrent parmi les nombreux mythes d'une correspondance entre événements terrestres et solaires. Les variations de l'éclat du Soleil et l'action du Soleil sur le climat de la Terre n'étaient pas démontrées.

Aussi, lorsque trois satellites d'étude du Soleil révélèrent simultanément une diminution du rayonnement solaire, au milieu des années 1980, les astronomes crurent d'abord à une panne fortuite des trois détecteurs. Cependant, lorsque la mesure du rayonnement augmenta conjointement dans les trois appareils, il fallut admettre que le hasard devenait excessif : le Soleil se refroidissait et s'échauffait proportionnellement au nombre de taches visibles à sa surface.

Ces dernières années, l'un de nous (S. Baliunas) a observé que d'autres étoiles ont également un éclat variable. Ces études affinent notre compréhension de la «dynamo» qui produit le champ magnétique du Soleil et des autres étoiles. De surcroît, elles ont révélé un lien entre les «taches stellaires» et la luminosité, confirmant les découvertes effectuées dans le cas du Soleil. Toutefois, la signification des cycles solaires et leur influence sur le climat terrestre restent débattues.

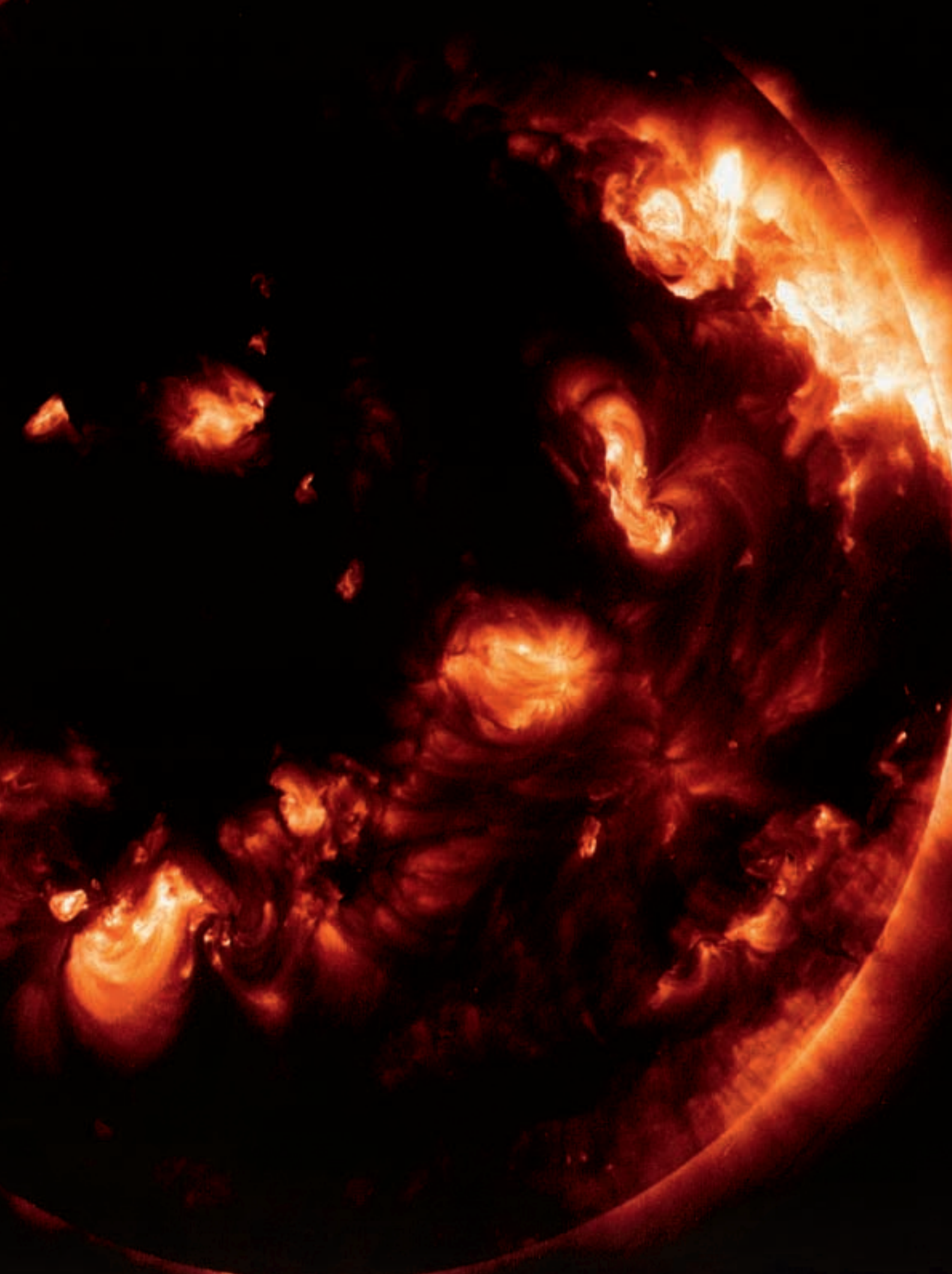
Les taches solaires

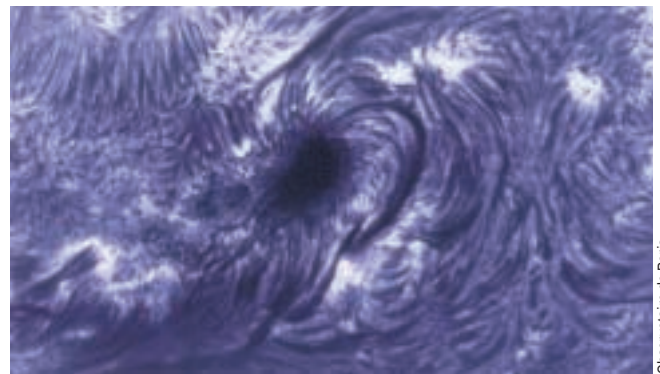
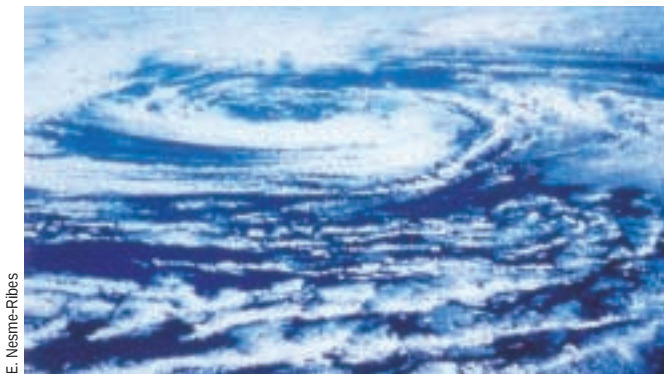
Il y a 2 000 ans, les astronomes chinois avaient déjà observé les taches solaires à l'œil nu. Cependant, il fallut l'invention de la lunette astronomique, au début du XVII^e siècle, pour que David Fabricius, Thomas Harriot, Christoph Scheiner et Galilée fissent une étude systématique de ces taches. En 1843, l'astronome allemand Samuel Heinrich Schwabe détecta une périodicité d'environ dix ans dans le nombre de taches solaires. Puis, au début du XX^e siècle, George Hale, de l'Observatoire du mont Wilson, en Californie, découvrit que ces taches sombres étaient le siège de champs magnétiques dont l'intensité était des milliers de fois supérieure à celles du champ magnétique terrestre.

Les taches solaires ont un aspect sombre, car leur température est de 2 000 degrés inférieure à celle de la surface solaire environnante ; sur un fond noir, elles apparaîtraient rouge orangé. Ces taches sont des lieux d'intenses champs magnétiques. Comme le mouvement ascendant (de convection) du gaz évite les zones magnétiques, le transport de chaleur provenant de l'intérieur du Soleil est bloqué localement, là où le champ magnétique est intense. C'est pourquoi il se forme des régions froides et sombres : les taches. Les lignes de champ magnétique émergent à la surface du Soleil sous la forme de boucles, les deux «pieds» d'une boucle correspondant à une paire de taches. Autour

1. LE CHAMP MAGNÉTIQUE à la surface du Soleil est délimité, sur cette photographie en rayons X, grâce aux contours incurvés des éruptions solaires. Les lignes des champs magnétiques qui émergent de la surface solaire chauffent les gaz de la couronne environnante jusqu'à 25 millions de degrés, ce qui les rend brillantes. Les éruptions sont plus fréquentes lorsque les taches solaires sont nombreuses.

IBM Research and Smithsonian Astrophysical Observatory





E. Nesme-Ribes

Observatoire de Paris

2. UN CYCLONE dans l'atmosphère terrestre (à gauche) ressemble à un cyclone dans l'atmosphère solaire (à droite). Les astronomes pensent que de tels mouvements existent aussi sous la surface du Soleil, dans la zone convective.

des taches solaires, on peut observer également des plages brillantes, les facules. L'ensemble des taches et des facules dans une zone donnée constitue une région active.

Au début de chaque cycle de 11 ans, les taches et les facules apparaissent d'abord autour de 40 degrés de latitude, dans les deux hémisphères; puis, au cours de la progression du cycle, elles se forment de plus en plus près de l'équateur, qu'elles atteignent au minimum du cycle. Outre le champ magnétique local qui relie des paires de taches et de facules, le Soleil possède un champ magnétique global dipolaire (analogue à celui d'un barreau aimanté). À l'intérieur d'une région active donnée, la tache solaire de tête, c'est-à-dire celle qui apparaît la première à la surface du Soleil, quand le Soleil tourne, possède la même polarité que celle de son pôle le plus proche; la tache de queue est de polarité opposée. Les paires de taches orientées Est-Ouest ressemblent à des aimants dont les polarités sont opposées dans chaque hémisphère. En outre, l'orientation des paires de taches s'inverse tous les 11 ans, de sorte que le cycle magnétique total dure 22 ans.

Le comportement du Soleil n'a pas toujours été aussi régulier. Après la fondation de l'Observatoire de Paris, en 1667, les astronomes observèrent systématiquement le Soleil, accumulant plus de 8 000 jours d'observation en 70 ans. Ces enregistrements indiquent une très faible activité de taches, bien inférieure à celle observée aujourd'hui. Cette découverte ne prit toute son importance qu'à partir de 1852, lorsque Johann Rudolf Wolf reconstitua l'histoire du cycle solaire à partir des archives disponibles. Cependant les résultats de Wolf furent mis en doute par des astronomes modernes qui lui

reprochaient de n'avoir utilisé qu'une partie des archives existantes.

Vers la fin des années 1880, Gustav Spörer et Walter Maunder remarquèrent la coïncidence entre l'anomalie solaire du XVII^e siècle et un refroidissement du climat en Europe. Cette observation étonnante retomba dans l'oubli pendant près d'un siècle. C'est seulement en 1976 que John Eddy, du Groupement universitaire pour l'étude de l'atmosphère à Boulder, rouvrit le débat; dix ans plus tard, l'un d'entre nous (E. Nesme-Ribes) et ses collègues examinèrent les archives de l'Observatoire de Paris et confirmèrent l'existence de cette anomalie que J. Eddy nomma alors le minimum de Maunder.

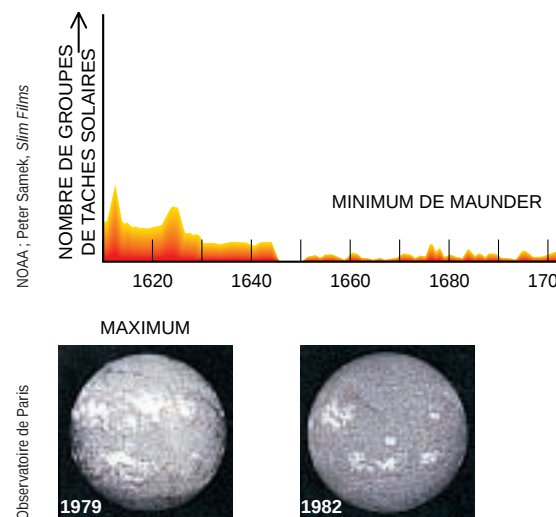
J. Eddy remarqua aussi que la quantité de carbone 14 dans les cernes de croissance des arbres augmentait durant le minimum de taches solaires. Le carbone 14 est un isotope radioactif que les rayons cosmiques galactiques (essentiellement des protons) produisent quand ils heurtent l'azote de l'atmosphère terrestre. Or le flot de particules cosmiques est dévié par le vent solaire et le champ magnétique général associé; ceux-ci varient au cours du cycle, de sorte que la production de carbone 14 sur Terre est modulée. En particulier, il se forme davantage de carbone 14 lors du minimum du cycle de 11 ans et des anomalies de type minimum de Maunder. La forte augmentation de carbone observée dans les cernes des arbres à l'époque du minimum de Maunder renforce le lien entre le minimum des cycles de onze ans et les grandes anomalies solaires.

Les archives de Paris révélèrent un autre fait étrange: entre 1661 et 1705, les quelques taches observées sont apparues essentiellement dans l'hémisphère Sud, et elles ont traversé plus lentement le disque du Soleil que les taches visibles

aujourd'hui. Le Soleil ne reprit son apparence actuelle qu'au début du XVIII^e siècle, avec des taches réparties assez également entre les deux hémisphères.

La dynamo solaire

Comment interpréter ces observations? L'activité magnétique du Soleil prend naissance dans la zone convective, cette couche de 200 000 kilomètres d'épaisseur située juste sous la surface solaire (la rayon du Soleil est égal à 700 000 kilomètres soit plus de 100 fois le rayon terrestre). Dans la zone convective, la matière se déplace pour transférer l'énergie de l'intérieur du Soleil à la surface, où la convection se manifeste sous des formes variables. À la surface du Soleil, on observe toujours un ensemble de granules dont le diamètre atteint 1 000 kilomètres mais dont la durée de vie n'est que de quelques minutes. On a également observé des «supergranules», de 30 000 à 50 000 kilomètres de diamètre, et même des écoulements méridiens (de l'équateur vers les pôles) de plus grandes dimensions.



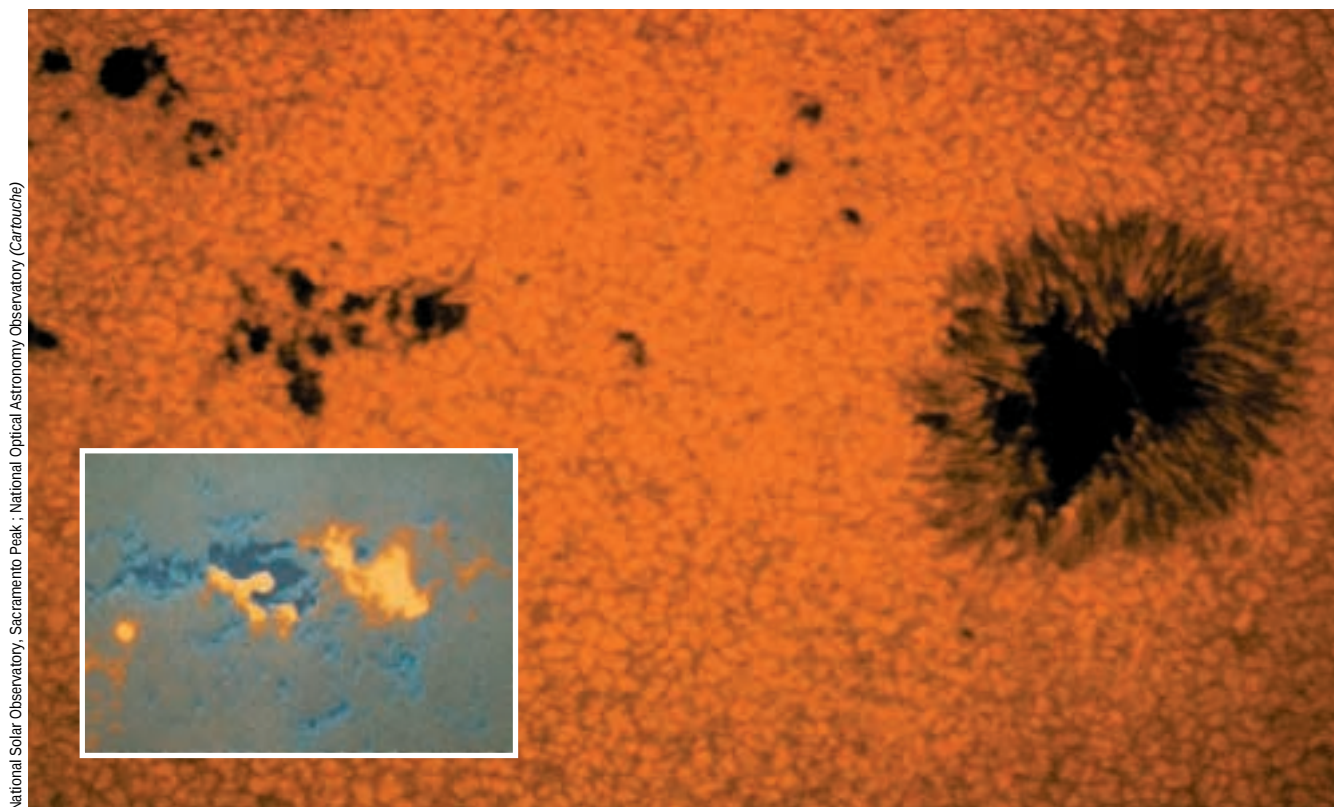
Dans l'atmosphère de la Terre, les forces de Coriolis sont à l'origine des cyclones que l'on connaît bien depuis les observations des satellites MÉTÉOSAT (satellites européens de météorologie) : les mouvements cycloniques s'effectuent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et dans le sens inverse, dans l'hémisphère Nord. Des mouvements cycloniques semblables à

ceux de l'atmosphère terrestre existent dans l'atmosphère solaire et on suppose qu'ils se prolongent sous la surface du Soleil (voir la figure 2).

Sous la zone convective, l'énergie émise dans le cœur du Soleil est transportée directement par les photons, c'est la zone radiative qui occupe 500 000 kilomètres et qui semble tourner comme un corps rigide. Plus profondément encore, le cœur du Soleil

est le siège des réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium.

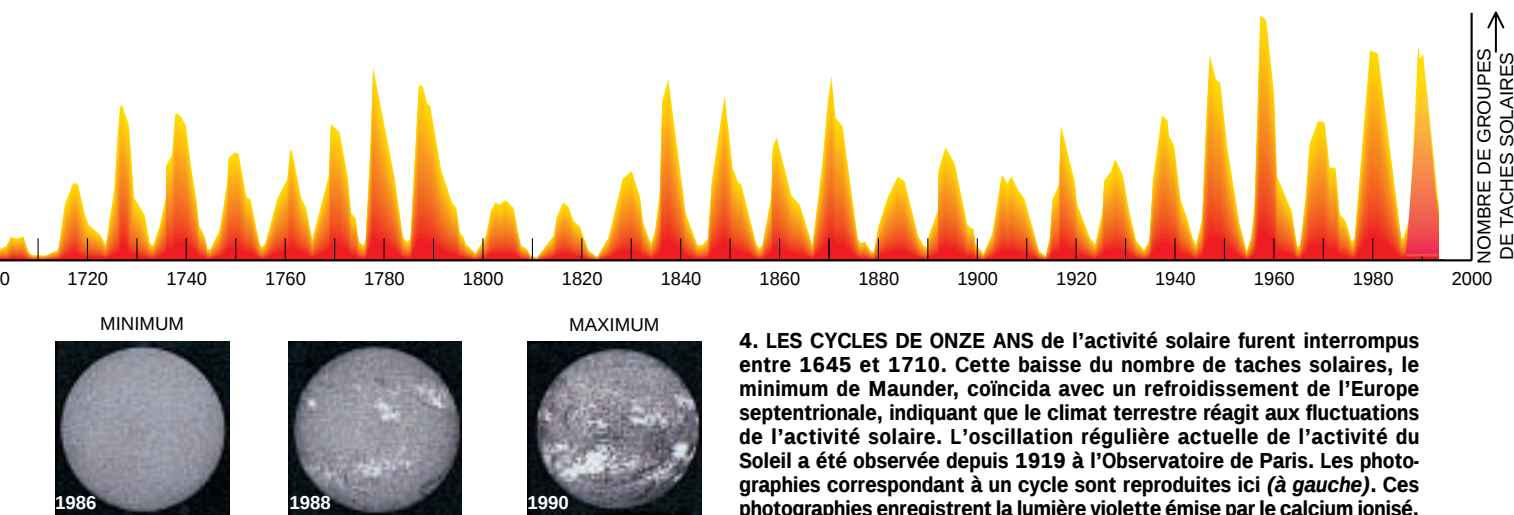
En 1955, à l'Université de Chicago, Eugene Parker expliqua pour la première fois comment le champ magnétique est créé à l'intérieur du Soleil. En raison de la température élevée qui y règne, les atomes d'hydrogène et d'hélium du Soleil ont perdu leurs électrons et forment un plasma, électriquement chargé. Or le déplacement des parti-

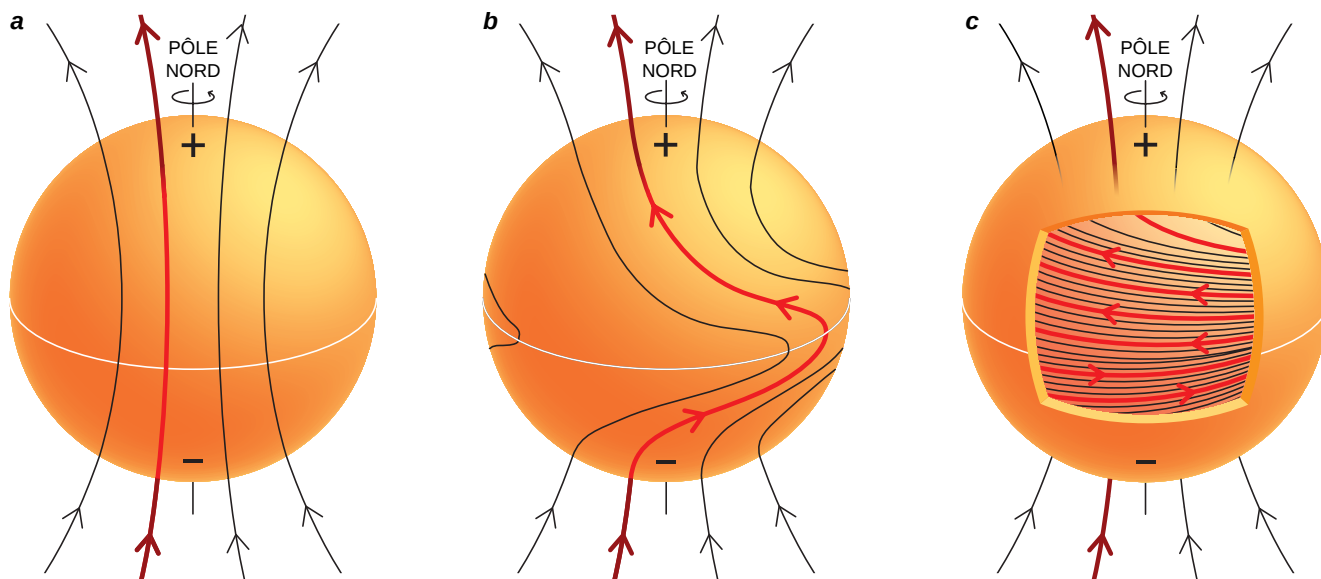


National Solar Observatory, Sacramento Peak; National Optical Astronomy Observatory (Cartouche)

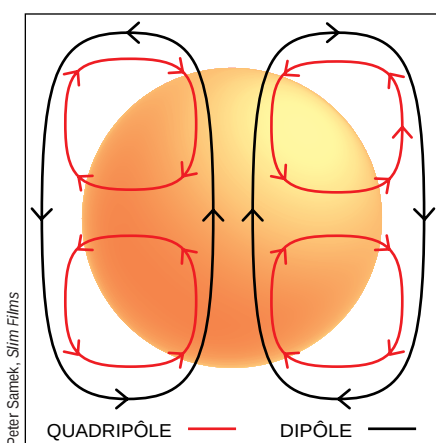
3. LES TACHES SOLAIRES sont des régions relativement froides, qui se forment là où les champs magnétiques suppriment les mouvements de convection ascendants. Ailleurs sur la surface, la convection se manifeste sous la forme de cellules jointives, les granules. Autour des taches solaires, le champ magnétique oriente le mouvement du gaz, provoquant l'apparition de lignes analogues à celles

qui sont formées par de la limaille de fer posée près d'un aimant. Le magnétogramme (cartouche) montre les régions de forte concentration de champ magnétique (la couleur bleue et la couleur jaune indiquent les orientations opposées du champ) ; selon l'activité du Soleil, on observe une centaine à un millier de telles paires de taches au cours d'un cycle d'activité normal.





5. LA DYNAMO SOLAIRE engendre le champ magnétique du Soleil et provoque aussi son changement d'orientation tous les 11 ans. Supposons que le champ magnétique initial (a) ressemble à celui d'une tige aimantée dont le pôle positif (+) soit au pôle Nord géographique du Soleil. Les lignes de champ magnétique sont solidaires des gaz électriquement chargés qui constituent le Soleil. La rotation, plus rapide à l'équateur, déforme ces lignes de champ (b) jusqu'à ce qu'elles soient serrées à la surface du Soleil (c). Les lignes de champ finissent par résister à cette déformation. Elles se détendent, s'appro-



champs chargés crée, à son tour, un champ magnétique. C'est le principe même de la dynamo. Les champs magnétiques sont matérialisés par des lignes de champ magnétique dont la densité est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, tandis que leur orientation révèle la direction du champ.

Le plasma solaire étant un excellent conducteur électrique, il se déplace avec le champ magnétique qu'il crée (les lignes de champ sont «gelées» dans le plasma). Ainsi, sous l'effet des mouvements de convection, les champs magnétiques locaux sont créés, tordus, amplifiés ou annihilés, par les mouvements du plasma. Nous verrons comment la rotation de notre étoile et les mouvements du plasma convectif font et défont périodiquement les entrelacs magnétiques pour produire des champs magnétiques variables au cours du temps.

La dynamo solaire possède deux ingrédients essentiels : les cyclones convectifs, que nous avons déjà considérés, et la rotation non uniforme du

Soleil. Au milieu du XIX^e siècle, un astronome amateur anglais Richard Carrington observa que les taches solaires naissant près de l'équateur tournent environ deux pour cent plus vite que celles apparaissant près des tropiques. Comme les taches solaires, manifestation du champ magnétique, sont solidaires du plasma, cela implique que la surface solaire ne tourne pas uniformément, d'où le nom de rotation différentielle donnée à ce phénomène. La période de rotation est d'environ 25 jours à l'équateur, 28 jours à 40 degrés de latitude, et plus longue encore près des pôles. On sait aujourd'hui que la rotation différentielle persiste dans toute la zone convective.

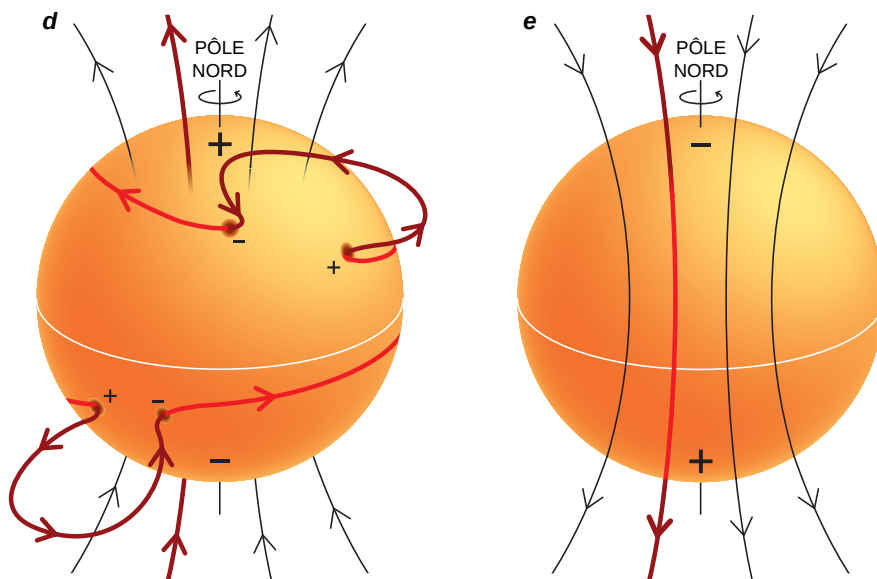
Supposons que la forme initiale du champ magnétique solaire soit celle d'un dipôle orienté Nord-Sud. À l'équateur, les lignes de champ du dipôle seront étirées dans la direction Est-Ouest, en raison de la rotation différentielle. Il se forme donc une composante magnétique Est-Ouest. Sous l'effet d'instabilités affectant la zone convective, ces lignes de champ (ou boucles magnétiques) sont ensuite poussées à la surface du Soleil et donnent naissance aux régions actives. Les taches représentent les pieds des boucles magnétiques qui apparaissent par paires (voir la figure 5).

Les cyclones organisent les taches de sorte qu'une tache de queue, dans

l'hémisphère Nord par exemple, se trouve placée à une latitude légèrement supérieure à celle de la tache de tête correspondante. Les taches meurent très rapidement (en moins de 30 jours), mais le champ magnétique des facules associées subsiste beaucoup plus longtemps (plusieurs mois, voire une année). La «polarité» du champ magnétique associé à la facule située à l'arrière de la région active migre lentement vers les pôles, renverse le champ magnétique général et le cycle recommence.

Cette description qualitative nécessite d'être confrontée aux résultats d'héliosismologie, la science des tremblements du Soleil : on vient de découvrir, d'après les observations des oscillations solaires, que la vitesse de rotation près de l'équateur diminue avec la profondeur. Des expériences d'héliosismologie comme GONG et SOHO (GONG est un réseau terrestre américain d'observation des oscillations solaires et SOHO est un satellite américano-européen qui étudie le Soleil depuis décembre 1995) fourniront des informations précises sur les mouvements internes du Soleil et permettront d'affiner la théorie de la dynamo.

Que s'est-il passé durant le minimum de Maunder? Pour expliquer cette accalmie, deux d'entre nous (E. Nesme-Ribes et D. Sokoloff) ont imaginé que le champ magnétique général pouvait avoir une composante



chent de la surface et en émergent, créant des paires de taches solaires (d). Ces taches meurent rapidement, mais le champ magnétique intense qui leur est associé demeure. La polarité de la tache de queue arrive en premier vers le pôle et inverse le champ global (e). En plus du champ dipolaire ci-dessus, le Soleil possède probablement un champ «quadripolaire» (en rouge sur le schéma inférieur de la page ci-contre) dont les oscillations, couplées à celles du champ dipolaire, provoquent le minimum de Maunder, au XVII^e siècle.

quadripolaire comme si le champ magnétique général était produit par deux barreaux aimantés placés tête-bêche, un dans chaque hémisphère. Sous l'influence de la rotation différentielle, le champ quadripolaire engendre, lui aussi, des régions actives. Cependant à la différence du dipôle, qui crée des régions actives d'orientation opposée d'un hémisphère à l'autre, le quadripôle produit des régions actives qui ont la même orientation (la polarité de leurs taches de

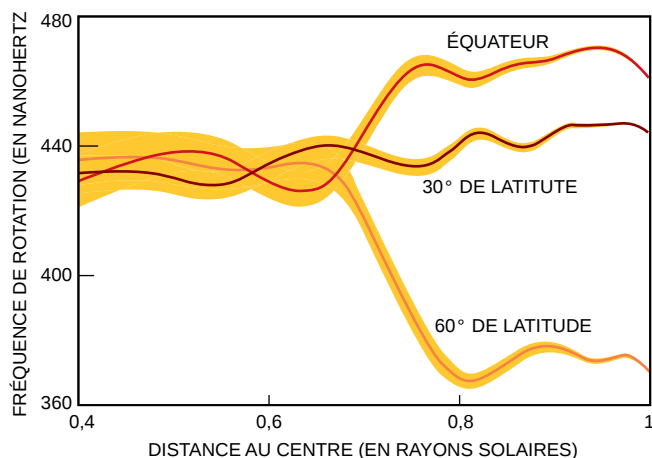
tête est la même dans les deux hémisphères). On comprend alors que la superposition d'un dipôle et d'un quadripôle d'intensités comparables crée une dissymétrie de l'activité solaire, au profit d'un hémisphère. Cette dissymétrie entre les deux hémisphères est observable aujourd'hui. En outre, au cours des quatre derniers siècles, des nombres différents de taches solaires sont apparus, dans les deux hémisphères, lors de certains cycles solaires, et le phénomène semble se

répéter chaque siècle, exactement comme si le dipôle oscillait avec un quadripôle plus faible. Si le dipôle et la quadripôle sont présents et de faible intensité, l'activité sera faible et localisée dans un seul hémisphère. C'est précisément ce qu'observèrent des astronomes au XVII^e siècle pendant le minimum de Maunder.

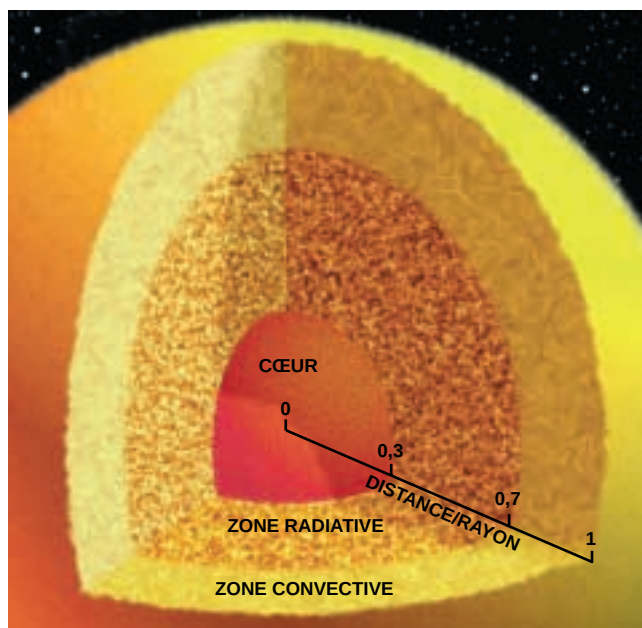
Nous décrivons la relation complexe entre les champs dipolaires et quadripolaires par le «nombre dynamo» D . Ce nombre est le produit de l'hélicité, une mesure de la torsion des cyclones, par une mesure de la rotation différentielle du Soleil. Lorsque le nombre dynamo D est faible, le champ magnétique est rapidement dissipé. À partir d'un seuil, le dipôle et le quadripôle apparaissent, mais les champs créés sont stationnaires. Lorsque le nombre D augmente encore, la dynamo devient périodique, oscillant régulièrement. C'est dans ce régime que se trouve le Soleil aujourd'hui. Un faible champ quadripolaire, oscillant en phase avec le champ dipolaire, conduit à des cycles courts et intenses. Un champ quadripolaire plus fort, légèrement déphasé par rapport au dipôle, allonge et affaiblit le cycle des taches solaires. Bien au-delà du nombre dynamo critique, le chaos s'installe.

Des étoiles dynamiques

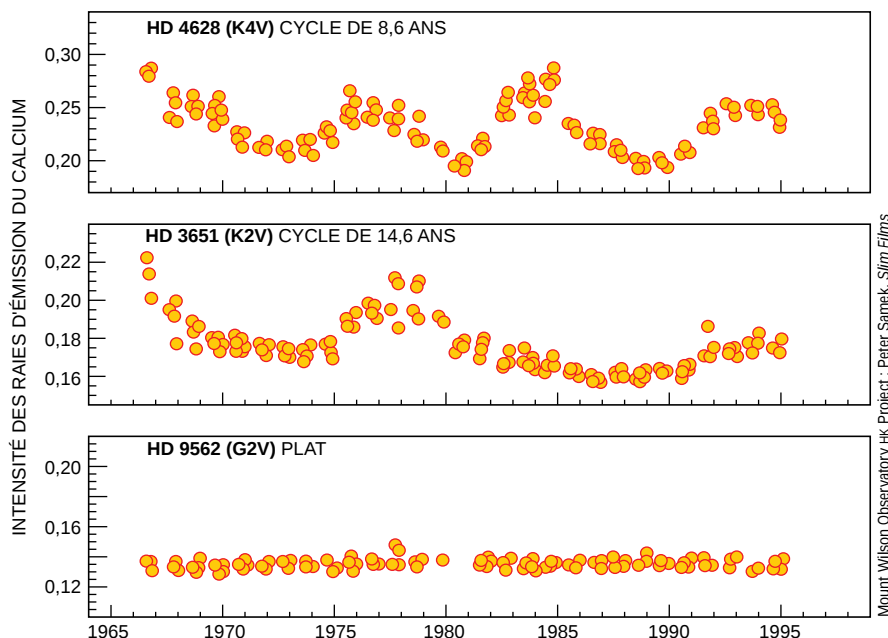
Nous savons aujourd'hui que l'éclat du Soleil varie avec l'activité magnétique, au cours des cycles : les facules brillantes entourant les taches renforcent l'éclat du Soleil en période de forte



6. LA SURFACE SOLAIRE tourne plus rapidement à l'équateur que près des pôles. Cette rotation différentielle semble exister dans la couche convective. Le cœur du Soleil, où la fusion nucléaire produit l'énergie qui alimente la dynamo, ainsi que la zone radiative, tournent très probablement à vitesse angulaire constante, comme un corps solide.



Peter Samok, Slim Films



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.

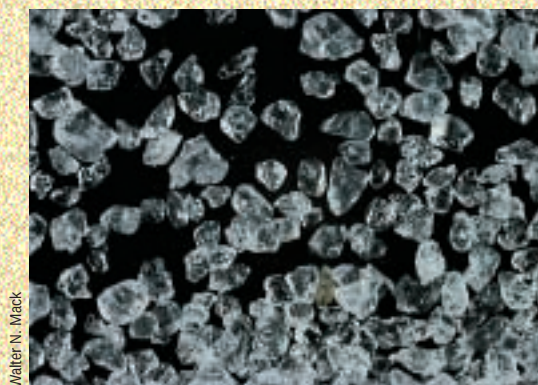
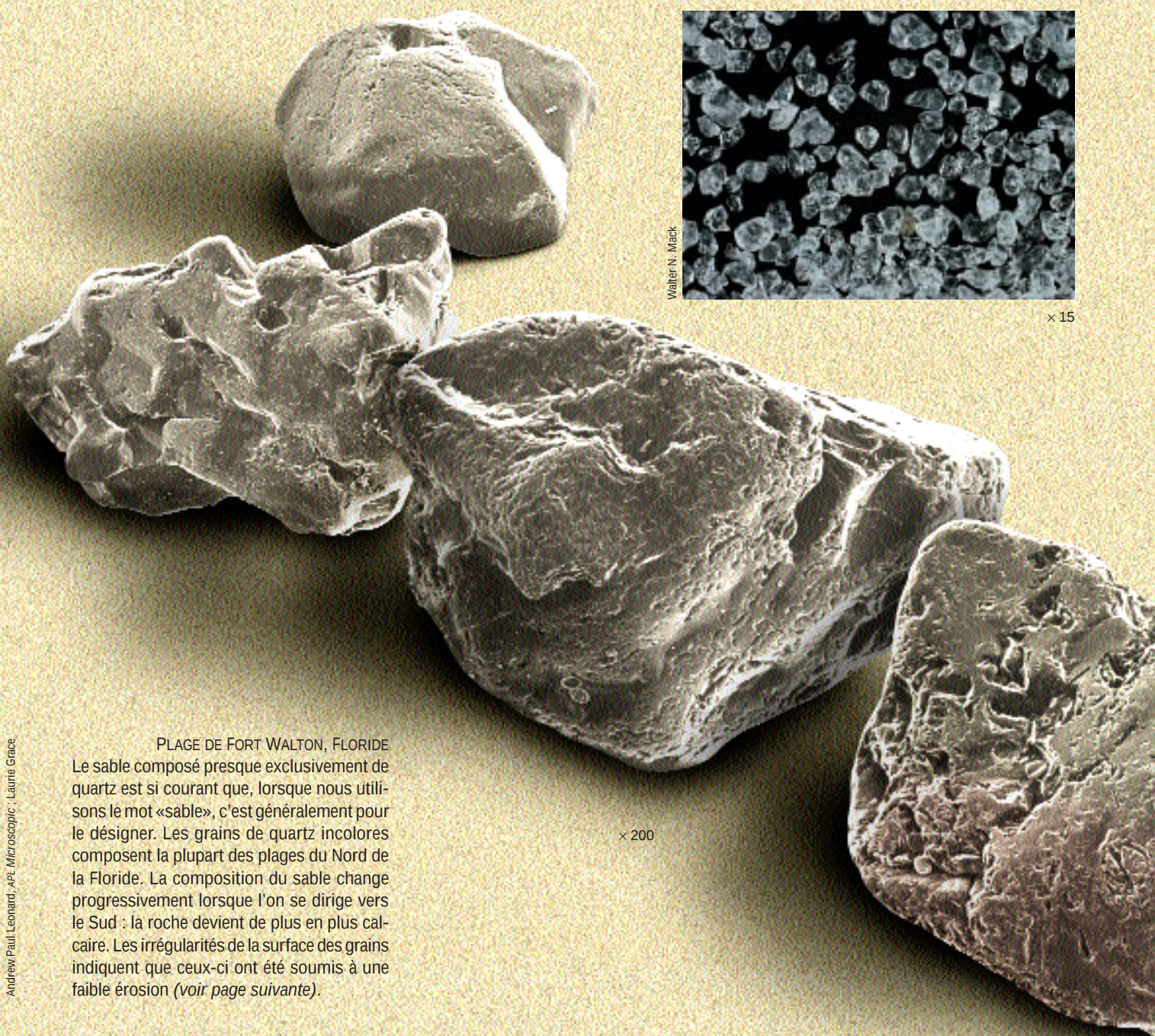
Kenneth J.H. PHILLIPS, *Guide to the Sun*, Cambridge University Press, 1992.

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

Les sables du monde

WALTER MACK • ELIZABETH LEISTIKOW

*Le sable est l'un des matériaux les plus banals à la surface de la Terre.
C'est aussi l'un des plus variés.*



Walter N. Mack

× 15

× 200

PLAGE DE FORT WALTON, FLORIDE

Le sable composé presque exclusivement de quartz est si courant que, lorsque nous utilisons le mot «sable», c'est généralement pour le désigner. Les grains de quartz incolores composent la plupart des plages du Nord de la Floride. La composition du sable change progressivement lorsque l'on se dirige vers le Sud : la roche devient de plus en plus calcaire. Les irrégularités de la surface des grains indiquent que ceux-ci ont été soumis à une faible érosion (voir page suivante).