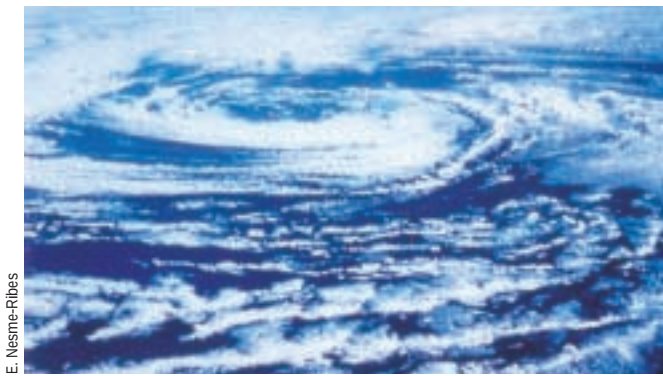
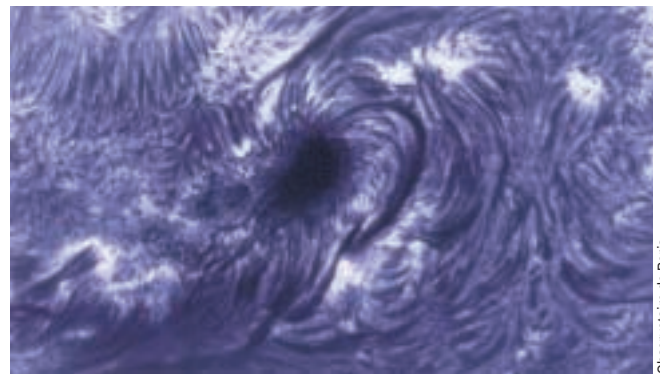




E. Nesme-Ribes



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.

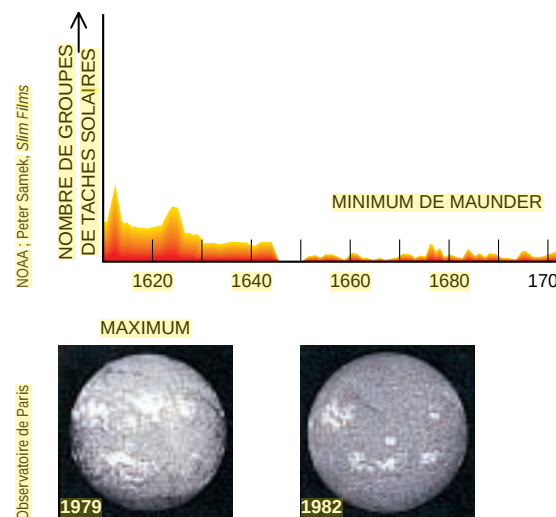
J. Eddy remarqua aussi que la quantité de carbone 14 dans les cernes de croissance des arbres augmentait durant le minimum de taches solaires. Le carbone 14 est un isotope radioactif que les rayons cosmiques galactiques (essentiellement des protons) produisent quand ils heurtent l'azote de l'atmosphère 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

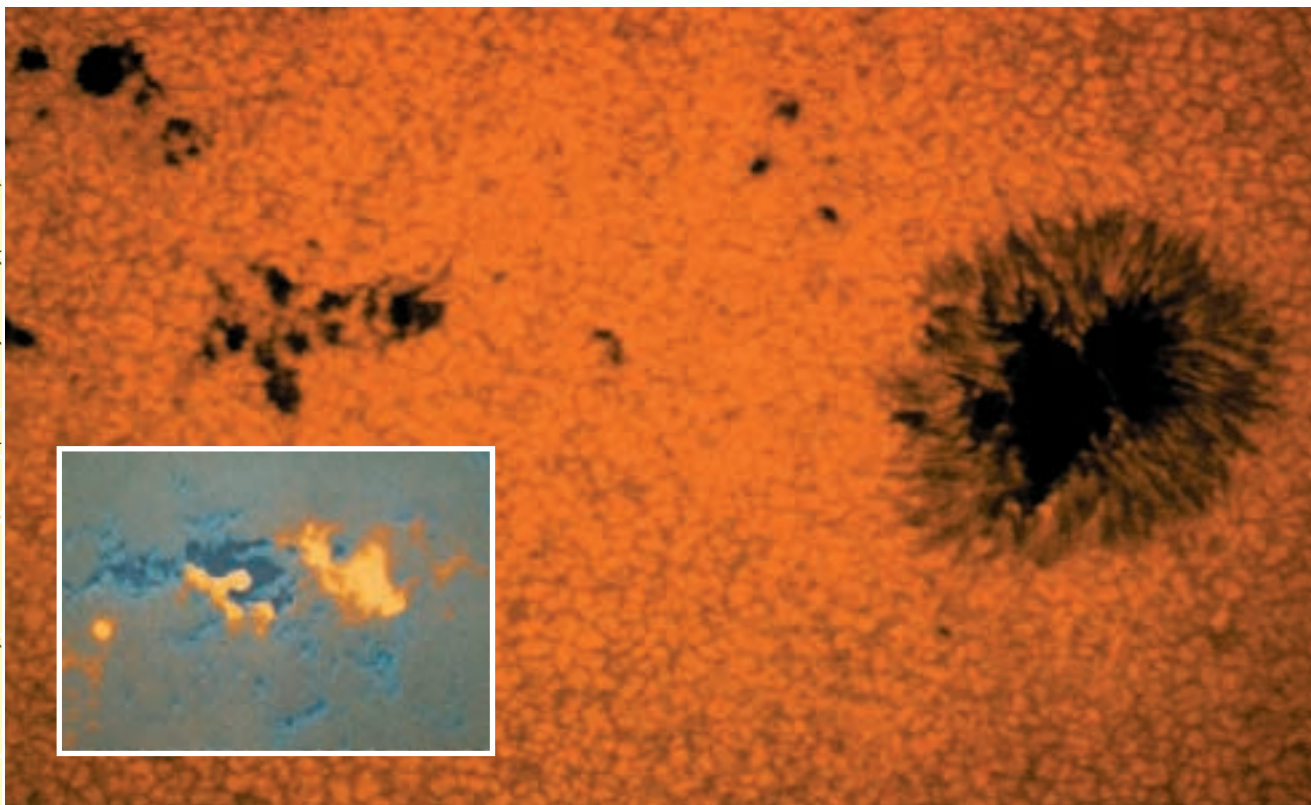
ceux de l'atmosphère terrestre existent dans l'atmosphère solaire et on suppose qu'ils se prolongent sous la surface du Soleil (voir la figure 2).

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

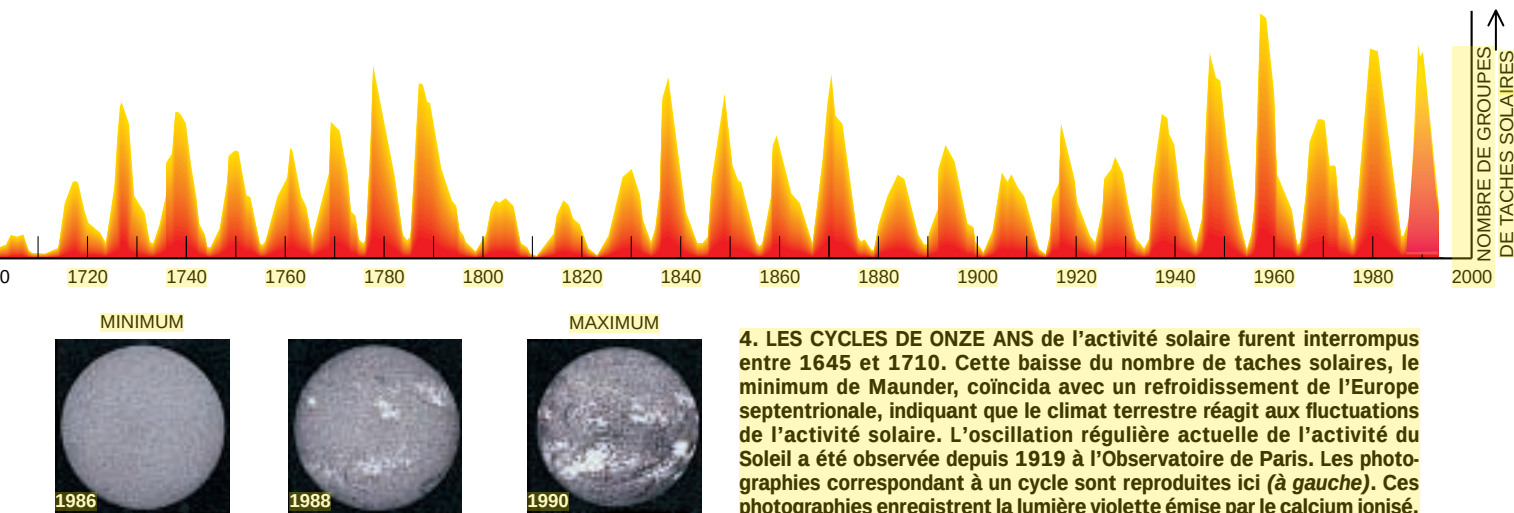
En 1955, à l'Université de Chicago, Eugene Parker expliqua pour la première fois comment le champ magnétique est créé à l'intérieur du Soleil. En raison de la température élevée qui y règne, les atomes d'hydrogène et d'hélium du Soleil ont perdu leurs électrons et forment un plasma, électriquement chargé.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

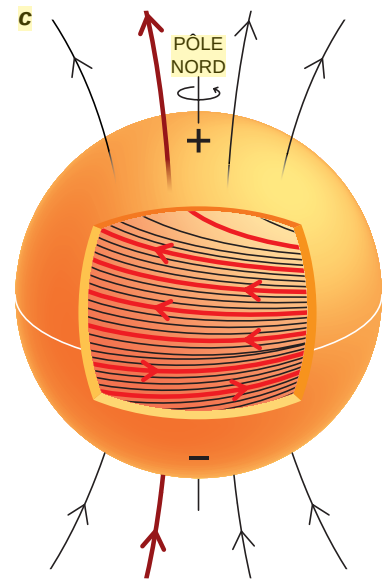
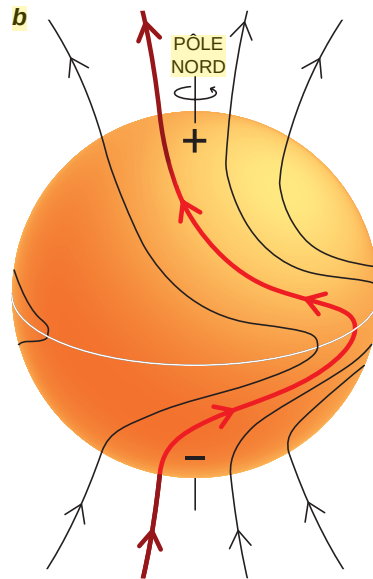
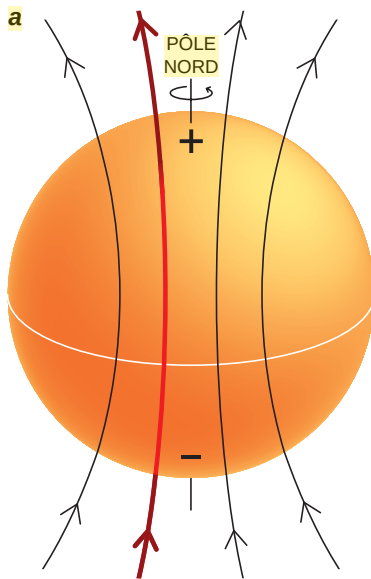
National Solar Observatory, Sacramento Peak ; National Optical Astronomy Observatory (Cartouche)



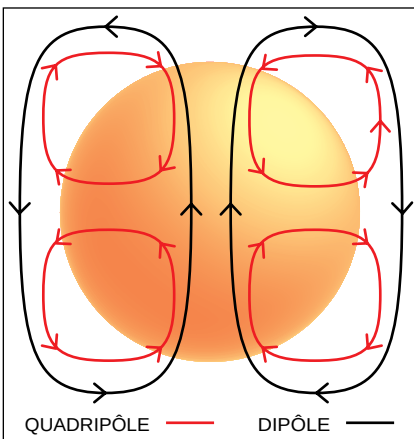
3. LES TACHES SOLAIRES sont des régions relativement froides, qui se forment là où les champs magnétiques suppriment les mouvements de convection ascendants. Ailleurs sur la surface, la convection se manifeste sous la forme de cellules jointives, les granules. Autour des taches solaires, le champ magnétique 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-



Peter Samek, Slim Films

cules chargées 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