

indique une densité de plasma environ 100 fois supérieure à celle de la couronne solaire. Cette haute densité indique que les couronnes de Capella sont beaucoup plus petites que celle du Soleil ; chacune doit avoir une épaisseur ne dépassant pas un dixième du rayon de l'étoile. Par ailleurs, il semble que la répartition du champ magnétique varie d'une étoile à l'autre. Dans certains cas, quand des planètes circulent très près d'une étoile, elles peuvent en modifier le champ magnétique.

Après plusieurs décennies de recherches, une explication semble enfin plausible : le champ magnétique du Soleil serait capable de transférer de l'énergie directement de l'intérieur de l'étoile jusqu'à la couronne, lui conférant sa température élevée. Un champ magnétique ne transporte pas l'énergie sous forme de chaleur, ce qui lui permet de court-circuiter les restrictions thermodynamiques d'usage (qui exigent que la chaleur ne s'écoule que des sources

chaudes vers les sources froides). De plus, les observations montrent que la couronne est plus chaude là où le champ magnétique est plus intense. Les astrophysiciens essaient maintenant de comprendre comment cette énergie magnétique est convertie en chaleur.

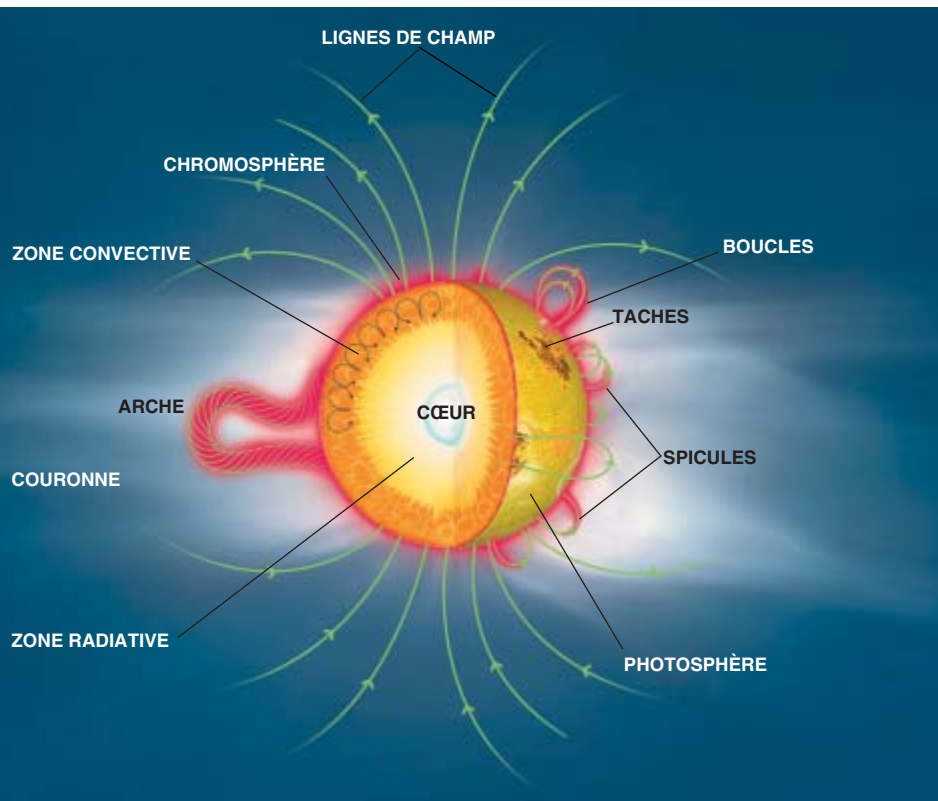
Les astronomes observent le Soleil à l'aide de sondes spatiales captant des longueurs d'onde (notamment des rayonnements X ou ultraviolets) que l'atmosphère terrestre nous empêche d'observer de la Terre. Par ailleurs, en utilisant des télescopes au sol pendant les éclipses, ils collectent de grandes quantités de données sans être limités par le débit restreint des communications entre l'espace et la Terre. Ces deux méthodes complémentaires nous ont apporté des indices qui ont partiellement éclairci le mystère de la température coronale.

En 1973 et en 1974, les télescopes à ultraviolets et à rayons X de la station spatiale américaine *Skylab* ont fourni

les premières images à haute résolution de la couronne. Sur ces images, on observe, dans les régions actives de la couronne qui surplombent les taches solaires de la photosphère, des complexes de fines boucles qui apparaissent et disparaissent en quelques jours. Plus loin, des arches diffuses, brillantes en rayons X, s'étendent sur des millions de kilomètres. À l'écart de ces régions actives, dans les zones calmes du Soleil, la surface de l'étoile, photographiée en ultraviolet, présente une structure en nid d'abeille. Enfin, près des pôles magnétiques solaires, la couronne émet peu de rayons X ; c'est pourquoi on nomme ces zones des «trous coronaux». Depuis *Skylab*, chaque nouvelle sonde spatiale a fourni des images du Soleil dont la résolution n'a cessé d'être améliorée.

L'observation spatiale

Depuis 1991, le télescope à rayons X embarqué à bord du satellite japonais *Yohkoh* prend régulièrement des clichés de la couronne. L'intensité de l'activité magnétique du Soleil croît et décroît selon un cycle assez régulier de 11 années. Ainsi, ce satellite a surveillé l'évolution des caractéristiques de la couronne sur la totalité d'un cycle d'activité solaire. Par ailleurs, l'observatoire spatial SOHO (un observatoire héliosphérique et solaire), un satellite lancé conjointement par l'Europe et par les États-Unis en 1995, est en orbite entre le Soleil et la Terre, à 1,5 million de kilomètres de cette dernière, dans une position qui lui permet de scruter l'astre du jour sans interruption. Un de ses instruments, LASCO (un coronographe spectroscopique à grand angle) observe la couronne en lumière visible en masquant le disque éblouissant du Soleil à l'aide d'un masque opaque. Il suit l'évolution des structures coronales à grande échelle se déplaçant avec la rotation du Soleil (dont la période est d'environ 27 jours). D'autres instruments de SOHO, telle la caméra EUV (ultraviolet extrême), permettent d'obtenir des images très supérieures à celles de *Skylab*. Enfin, le satellite TRACE (explorateur de la couronne et de la région de transition), du Laboratoire Stanford-Lockheed pour la recherche spatiale, a été placé en orbite polaire autour de la Terre en 1998. Grâce à une résolution sans précédent, son télescope ultraviolet a révélé une grande quantité de détails nouveaux. On sait



2. LE SOLEIL EST CONSTITUÉ DE COUCHES DISTINCTES : l'énergie est produite dans le cœur par des réactions thermonucléaires, puis elle diffuse pendant près de 200 000 ans à travers la zone radiative avant d'atteindre la zone convective où d'immenses rouleaux de matière l'évacuent rapidement dans l'espace. Le champ magnétique solaire est produit à la frontière entre les zones convective et radiative. Les lignes de champ sont déformées par la rotation différentielle du Soleil (les hautes latitudes tournent moins vite que les latitudes équatoriales) et s'emmêlent progressivement. Elles percent la surface aux emplacements correspondant aux taches solaires. Elles piègent le plasma de la couronne et de la chromosphère et forment des spicules, des boucles, voire de gigantesques arches. À grande échelle, dans la couronne, le plasma coronal, très fortement ionisé, rend visible la structure du champ magnétique solaire, comme de la limaille de fer saupoudrée autour d'un aimant.

désormais que les boucles des régions actives sont des structures filiformes, dont l'épaisseur n'excède pas quelques kilomètres. Leurs vacillements saccadés donnent une idée de l'origine de la température élevée de la couronne.

Une atmosphère mouvementée

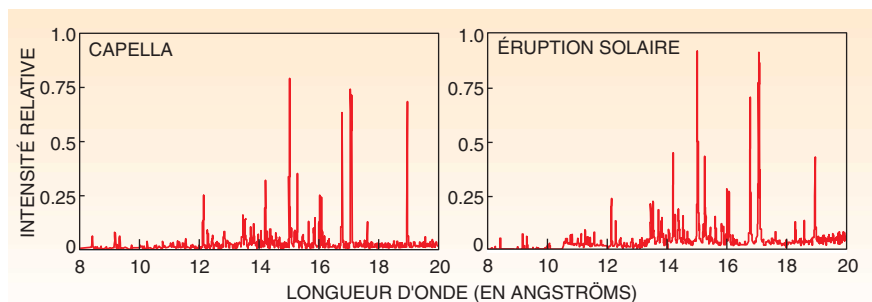
Ces boucles, arches et trous coronaux se superposent aux structures invisibles du champ magnétique solaire. Ce champ semble être produit dans le tiers externe du Soleil, 200 000 kilomètres sous la photosphère. À ce niveau, l'énergie en provenance du cœur de l'étoile ne progresse plus simplement par radiation, mais par convection : d'énormes rouleaux de matière solaire transportent l'énergie jusqu'à la photosphère avant de replonger vers les profondeurs. Les «grains» formant la structure en nid d'abeille visible sur les images prises par les satellites ne sont autres que ces cellules de convection vues de dessus. Comme le Soleil est constitué de plasma, un gaz contenant des électrons et des noyaux atomiques chargés, cette circulation se comporte comme une dynamo naturelle qui convertit 0,01 pour cent du rayonnement sortant en énergie magnétique.

Par ailleurs, les lignes de champ magnétique ne traversent pas le plasma facilement : elles y sont piégées. Or, le Soleil étant fluide, il ne tourne pas sur lui-même d'un seul tenant : les basses latitudes, près de l'équateur, tournent légèrement plus vite que les latitudes élevées, près des pôles. Cette rotation différentielle entraîne les lignes de champ magnétique et les déforme. Elles s'emmêlent progressivement pour former des nœuds et des boucles caractéristiques. Par endroits, de véritables tresses de lignes de champ se tordent et pénètrent dans la couronne en perçant la photosphère aux endroits marqués par des taches solaires sombres.

L'action de ces lignes de champ issues des profondeurs sur le plasma de la couronne serait responsable de sa température si élevée. Depuis un siècle, les astronomes mesurent le magnétisme de la photosphère à l'aide de magnétographes. Le principe de ces appareils est fondé sur l'effet Zeeman : en présence d'un champ magnétique, une raie spectrale peut se séparer en deux, voire en plusieurs



3. UNE PROTUBÉRENCE SOLAIRE a été arrachée de la surface de l'étoile et projetée dans la couronne. Elle y reste momentanément suspendue dans la structure tourmentée d'une tresse de lignes de champ magnétique. Le plasma de la couronne est invisible sur cette image qui montre, en lumière ultraviolette, les gaz plus froids de la chromosphère.



4. LES SPECTRES EN RAYONS X de l'étoile binaire Capella et d'une éruption solaire se ressemblent. Tous deux indiquent des températures de l'ordre de six millions de kelvins, typiques de la couronne de Capella, mais très élevées pour celle du Soleil.