

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

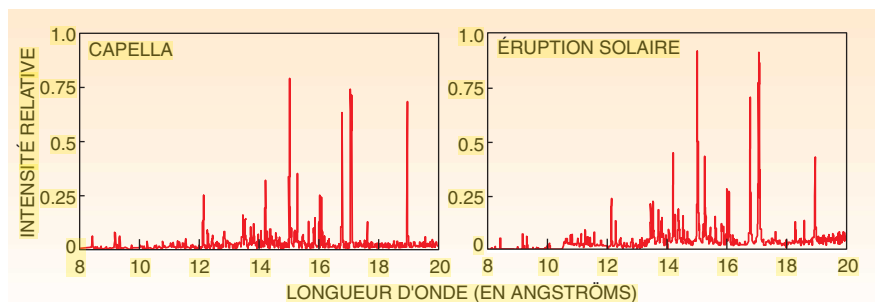
Ces boucles, arches et trous coronaux se superposent aux structures invisibles du champ magnétique solaire. Ce champ semble être produit dans le tiers externe du Soleil, 200 000 kilomètres sous la photosphère. À ce niveau, l'énergie en provenance du cœur de l'étoile ne progresse plus simplement par radiation, 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.

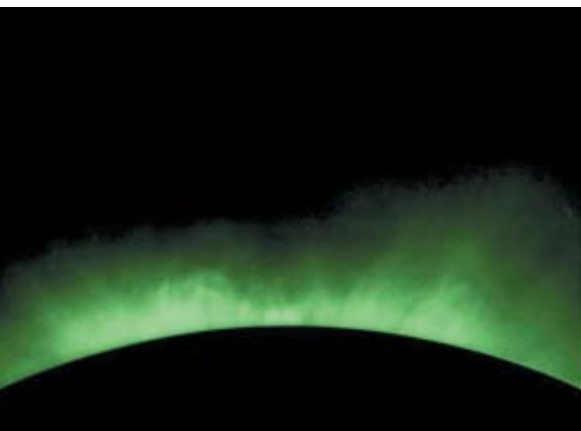
L'action de ces lignes de champ issues des profondeurs sur le plasma de la couronne serait responsable de sa température si élevée. Depuis un siècle, les astronomes mesurent le magnétisme de la photosphère à l'aide de magnétographes. Le principe de ces appareils est fondé sur l'effet Zeeman : en présence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



3. UNE PROTUBÉRANCE 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.



NSO/Sacramento Peak-USA/AFM/CARL/USGS et NSF/NOAO/SDSP

5. LA LUMIÈRE VERTE CARACTÉRISTIQUE émise par la couronne solaire trahit sa température très élevée : elle est produite par le fer ionisé lorsqu'il perd la moitié de son cortège électronique, ce qui nécessite des températures de l'ordre du million de kelvins.

composantes de longueurs d'onde et de polarisation différentes. Malheureusement, dans la couronne, les raies spectrales sont étalées sous l'effet de la température élevée, si bien que l'effet Zeeman est masqué. Pour évaluer le champ magnétique dans la couronne, les astronomes doivent recourir à des extrapolations mathématiques des données dont ils dis-

posent pour la photosphère. Ils prévoient un champ magnétique coronal d'une intensité proche de dix gauss, soit 20 fois le champ magnétique de la Terre aux pôles. Dans les régions actives, ce champ magnétique pourrait atteindre 100 gauss.

Les travaux des champs

Ces intensités magnétiques sont faibles si on les compare à celles que l'on produit dans les laboratoires, mais elles ont une influence décisive sur la couronne solaire. En effet, la température de la couronne est si élevée que la quasi-totalité des atomes qu'elle contient est ionisée : c'est un plasma constitué presque exclusivement de particules chargées (protons, électrons et noyaux atomiques, essentiellement d'hélium).

Le champ magnétique solaire agit sur les particules chargées et, par conséquent, influe sur l'écoulement du plasma. Les particules se déplacent sur des trajectoires hélicoïdales enroulées autour des lignes de champ. De ce fait, elles progressent difficilement dans les directions perpendiculaires aux lignes de champ : tout se passe comme si le champ magnétique exerçait une

pression sur le plasma de la couronne. Dans la couronne, cette pression magnétique (proportionnelle au carré de l'intensité du champ) excède la pression due à l'agitation thermique des particules d'un facteur 100 au moins. Ces limites imposées au mouvement du fluide coronal expliquent les frontières très nettes et les motifs caractéristiques tels que les plumes ou les boucles : comme la limaille de fer autour d'un aimant, le plasma de la couronne cartographie la structure invisible du champ magnétique.

Inversement, le champ magnétique subit l'influence du plasma, qui est un bon conducteur de l'électricité. Les lignes de champ magnétique ne peuvent pénétrer dans le volume d'un conducteur électrique parfait : les charges électriques du conducteur se déplacent instantanément sous l'effet de l'induction électromagnétique et produisent elles-mêmes un champ qui s'oppose au champ intrus. Ainsi, un plasma conducteur et un champ magnétique ne peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre. Pour cette raison, les lignes de champ magnétique sont partiellement piégées dans les plasmas (ce qui explique qu'elles



TRACE/NASA

6. LES BOUCLES CORONALES, peuvent s'élever jusqu'à 120 000 kilomètres au-dessus de la surface du Soleil. Elles ont été photographiées par le satellite TRACE en lumière ultraviolette. Il s'agit de boucles, formées par les lignes de champ magnétique qui percent la surface de l'étoile et piègent le plasma solaire. Quand une érup-

tion se produit au voisinage de boucles coronales, elle peut les faire vibrer. Ces oscillations sont très rapidement amorties, ce qui signifie que l'énergie de vibration est dissipée dans la couronne sous forme de chaleur. Peut-être est-ce là la source de la température anormalement élevée de la couronne.