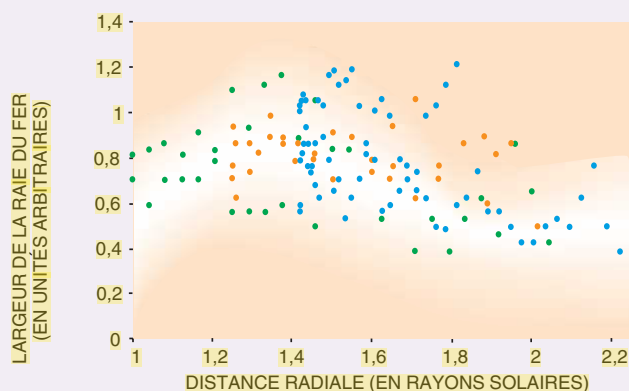


Le diagnostic spectroscopique

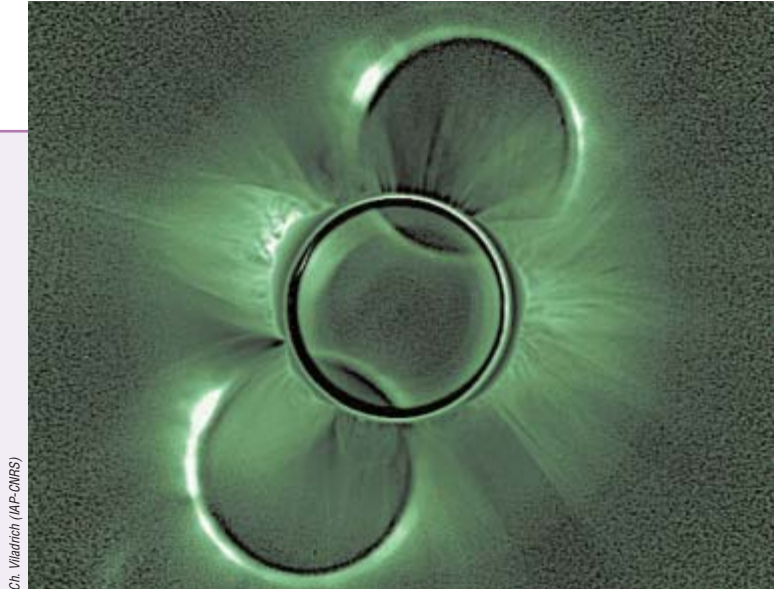
La recherche des ondes responsables de l'échauffement de la couronne est délicate. Néanmoins, au-delà de l'imagerie rapide monochromatique utilisée notamment par K. Phillips, la méthode dite du «diagnostic spectroscopique» permet de tester les prévisions théoriques. Elle a été proposée depuis longtemps et testée lors des éclipses, au gré des performances des détecteurs. Des progrès notables ont été enregistrés ces dernières années.

Cette méthode consiste à mesurer soigneusement le profil d'une raie spectrale d'émission de la couronne, en général la raie verte très intense du fer ionisé 13 fois. La largeur d'une raie spectrale contient des informations sur les conditions «d'agitation» des ions de la couronne. À cause de l'effet Doppler, les ondes émises par une source en mouvement sont décalées d'une quantité proportionnelle à sa vitesse le long de la ligne de visée (vers les courtes longueurs d'ondes si la source se rapproche de l'observateur, vers les grandes longueurs d'ondes si elle s'en éloigne). Lorsque les ions responsables d'une raie d'émission sont agités, cette raie est étalée sur un intervalle de longueurs d'ondes d'autant plus grand que la distribution des vitesses des ions est large. De ce fait, la largeur de la raie verte du fer ionisé 13 fois nous renseigne à la fois sur l'agitation thermique des ions, c'est-à-dire sur la température coronale, et sur les mouvements d'ensemble qui agitent le plasma.

Les mouvements du plasma peuvent être provoqués par des ondes sonores ou des ondes magnétohydrodynamiques (pour lesquelles des oscillations du champ et des fluctuations de pression du plasma s'entretiennent mutuellement). L'amplitude de ces mouvements est d'autant plus grande que la densité du milieu est faible (le mouvement est alors faiblement «entravé»). Comme la densité de l'atmosphère solaire décroît régulièrement avec l'altitude, la théorie prévoit que la largeur à mi-hauteur de la raie du fer croît avec la distance au Soleil. Par ailleurs, on suppose généralement que des collisions se produisant dans le plasma ont le double



2. LA LARGEUR DE LA RAIE VERTE DU FER, mesurée à mi-hauteur, augmente avec la distance radiale – comme le prévoit la théorie – jusqu'à environ 1,5 rayon solaire. La décroissance observée ensuite n'était pas prévue et semble indiquer que les ions sont faiblement agités dans la direction de la ligne de visée. Chaque série de mesures (chaque ensemble de points de même couleur) indique des largeurs de raie différentes pour une même distance radiale, car les résultats dépendent des détails de la structure coronale ; les variations de la largeur de raie du fer en fonction de la distance radiale apparaissent seulement lorsque le nombre de mesures est élevé.



1. LA COURONNE VERTE a été photographiée lors de l'éclipse totale de juin 2001. Elle montre que les atomes de fer ionisés 13 fois émettent jusqu'à des distances de 3,5 rayons solaires. Les deux répliques, de part et d'autre du Soleil, sont des images parasites.

effet d'arracher 13 électrons aux atomes de fer et de porter les ions ainsi formés au niveau d'énergie correspondant à la raie verte. Dans ce cas, l'intensité de la raie est approximativement proportionnelle au carré de la densité du plasma, et elle décroît très rapidement avec cette distance.

L'expérience confirme ces prévisions pour la couronne interne (jusqu'à 1,5 rayon solaire). Toutefois, à plus grande distance, nos observations, confortées par une nouvelle série de spectres réalisés lors de l'éclipse de juin 2001 observée en Angola, révèlent des effets inattendus. Tout d'abord, la raie verte reste intense à grande distance (voir la figure 1), révélant les structures de la «couronne verte» jusqu'à une altitude record de 3,5 rayons solaires. Ceci signifie que la raie n'est plus produite par collision, mais par un nouveau mécanisme : les atomes de fer ionisés 13 fois seraient excités par le rayonnement solaire et émettraient de la lumière selon un processus de désexcitation, semblable à la fluorescence. De plus, il faut expliquer la présence de ces atomes ionisés 13 fois, et par conséquent d'une température de l'ordre de deux millions de kelvins.

Or, l'analyse montre que la largeur de la raie décroît de façon spectaculaire (voir la figure 2). Ce résultat indique que les mouvements du plasma ne correspondent pas à la présence d'ondes, et il faut supposer qu'un nouveau mécanisme permet au champ magnétique de réchauffer la couronne à cette distance. Ce résultat est d'autant plus frappant, qu'à des distances de l'ordre de deux rayons solaires, la largeur de la raie devient très faible, plus faible même qu'elle ne devrait l'être à une température de l'ordre de deux millions de kelvins (température nécessaire pour ioniser le fer 13 fois).

Nous pensons que, dans cette région, les ions sont animés de vitesses faibles dans la direction de la ligne de visée, mais de grandes vitesses dans le sens radial (un tel mouvement anisotrope s'apparente à celui du vent solaire, le flot de particules éjecté de la couronne et qui emplit le Système solaire). Nous faisons l'hypothèse que des tubes de champ magnétique canalisent des flots de plasma et les accélèrent radialement ; ce mécanisme fournirait aux atomes de fer l'énergie nécessaire à leur très forte ionisation.

Serge KOUTCHMY,
Institut d'Astrophysique de Paris-CNRS.

des ondes selon le mécanisme décrit pour les ondes d'Alfvén. Il faut aussi que sa viscosité soit suffisante pour en dissiper l'énergie mécanique contenue dans les fluctuations de pression.

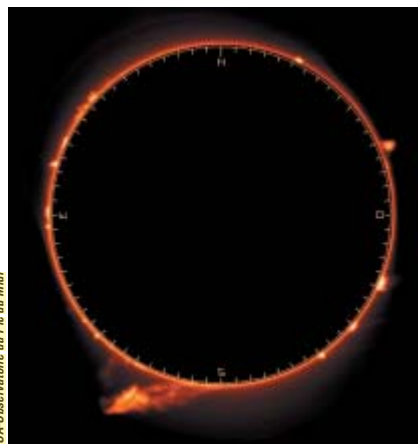
L'existence de ce phénomène a été confirmée en 1998 par le satellite TRACE, lors d'une puissante éruption solaire qui déclencha des vibrations dans les fines boucles coronales. Les boucles, avec le plasma qu'elles enfermaient, oscillèrent plusieurs fois d'avant en arrière avant de retrouver leur équilibre. Ces vibrations magnétohydrodynamiques furent amorties des millions de fois plus vite que ne le prédisait la théorie classique. Cela signifiait, comme le démontrèrent Valeri Nakariakov et ses collègues de l'Université de Saint-Andrews, en Écosse, que les caractéristiques physiques du plasma coronal (en particulier sa résistivité) le rendaient bien capable de dissiper rapidement, sous forme de chaleur, l'énergie des ondes magnétohydrodynamiques qui le traversent.

Le rôle des éruptions

Il existe aujourd'hui une autre hypothèse quant à la source de chaleur qui alimente la température coronale. L'échauffement de la couronne serait dû à de petits événements semblables aux éruptions solaires. Dans le champ magnétique mouvant du Soleil, des lignes de force de direction opposée se rencontrent parfois et s'annulent mutuellement : c'est la reconnexion du champ magnétique. Au cours d'un tel événement, l'énergie magnétique est transformée en ondes électromagnétiques, c'est-à-dire en rayonnement capable de chauffer le plasma alentour. Dans les régions actives du Soleil, une éruption libère brutalement des quantités d'énergie de l'ordre de 10^{25} joules en une rafale de rayons X et ultraviolets. Pendant le maximum d'activité du cycle solaire (comme c'est le cas en ce moment), il se produit, sur l'ensemble de l'étoile, plusieurs éruptions par heure. Les sondes *Yohkoh* et SOHO ont montré que des événements de plus faible ampleur, mais plus fréquents, se produisent non seulement dans les régions actives, mais également dans des régions réputées calmes. Ces événements mettent en jeu des quantités d'énergie un million de fois moindre qu'une véritable éruption : on les nomme «microéruptions». En 1980, des rayons X durs émis par des microéruptions ont été détectés pour la pre-

mière fois par Robert Lin et ses collègues de l'Université de Berkeley, à l'aide d'un détecteur installé sur un ballon. Au cours du minimum solaire de 1996, *Yohkoh* a également repéré des événements ne faisant intervenir que 10^{17} joules.

Les microéruptions atteignent des températures de l'ordre du million de kelvins, c'est-à-dire précisément celle de la couronne. Comme nous en avons fait la démonstration, avec Pawel Pres, de l'Université de Wroclaw, en Pologne, il pourrait exister des événements encore plus petits et fréquents, que l'on nomme des «nanoéruptions». Le débit d'énergie fourni au plasma coronal par ces événements correspondrait exactement au débit d'énergie rayonné dans l'espace par la couronne, soit environ 3×10^{18} watts (joules par seconde). Ce bilan énergétique est un argument en faveur d'un rôle prépondérant des nanoéruptions. Par ailleurs, lorsque les échelles de temps sur lesquelles se déroulent les mouvements de matière dans la photosphère sont, comme c'est souvent le cas, de l'ordre de une demiminute ou plus, aucune onde magnétohydrodynamique ne peut être engendrée. En revanche, d'étroites nappes de courant peuvent se former, au sein desquelles se produisent des reconnections – et donc des événements de type éruptif.

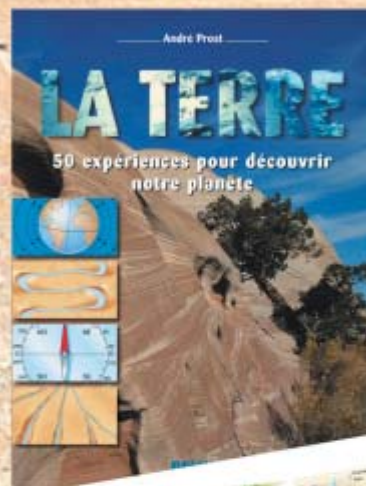


O.A.-Observatoire du Pic du Midi

8. LA CHROMOSPHERE peut être photographiée de la Terre à l'aide d'un coronographe (ici, celui de l'Observatoire du Pic du Midi). Un tel instrument réalise une éclipse artificielle à l'aide d'un cache qui masque le disque éblouissant du Soleil (la photosphère). Toutefois, ce cache ne suffit pas, car la chromosphère et la couronne du Soleil sont bien moins lumineuses que le ciel en plein jour et, contrairement au cas d'une véritable éclipse, l'atmosphère terrestre continue ici à recevoir et à diffuser la lumière solaire ! Les astronomes placent devant leur instrument un filtre qui ne laisse passer que la lumière caractéristique de la chromosphère : un rayonnement rouge dû à l'hydrogène.

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète



Comment naissent les dunes ?
Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ?
Comment se forment les grottes ?
Pourquoi les pierres éclatent-elles sous le froid ?
Ce livre propose une série d'expériences pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau modelent le visage de la Terre.

ANDRÉ PROST est géologue, ancien enseignant à l'université d'Orléans et à Paris VI, et ingénieur au Bureau des Recherches Géologiques et Minières à Orléans.

Code 002401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 96

BELIN • POUR LA SCIENCE



9. LE CHAMP MAGNÉTIQUE SOLAIRE ÉVOLUE selon un cycle de 11 années. Sa forme est rendue visible par le plasma coronal. Elle est relativement régulière en période de faible activité, comme le montre l'image prise lors de l'éclipse totale de février 1998 (à gauche, image prise par Christian Viladrich, Institut d'astrophysique de Paris). On y distingue un pôle



magnétique Nord et un pôle magnétique Sud bien marqués. Lorsque le Soleil est proche de son maximum d'activité, comme c'était le cas en août 1999 (à droite), le champ magnétique solaire présente une structure beaucoup plus chaotique (image IAP-CNRS). Sur l'image de 1998, on distingue la surface de la Lune, éclairée par le clair de Terre.

Institut d'astrophysique de Paris - CNRS

Toutefois, les ondes magnétohydrodynamique ne peuvent être totalement négligeables. Des observations optiques à très haute résolution effectuées au télescope suédois de La Palma, aux Canaries, ont montré que les mouvements de matière s'effectuent sur une multitude d'échelles temporelles différentes. De même, les observations du champ magnétique photosphérique effectuées par les sondes *Yohkoh* et *SOHO* ont révélé que les lignes de champs forment une «moquette» dont les poils de différentes hauteurs oscilleraient rapidement.

Par ailleurs, il est peu vraisemblable que les nanoéruptions puissent chauffer le plasma contenu dans les trous coronaux. Dans ces régions, les lignes de champ s'ouvrent dans l'espace plutôt que de se refermer en boucle sur le Soleil ; elles ne confinent pas le plasma coronal et une reconnexion à la base d'un trou aurait pour effet d'éjecter la matière dans l'espace interplanétaire plutôt que de la chauffer. Les astronomes ont cherché, dans la lumière émise par ces régions, la signature de mouvements ondulatoires, par exemple des fluctuations périodiques de leur éclat ou des décalages des raies spectrales dus à l'effet Doppler. Cette recherche est difficile parce que les ondes magnétohydrodynamiques incriminées ont probablement des périodes très courtes, de l'ordre de quelques secondes seulement. Or, à l'heure actuelle, les instruments embarqués sur les satellites sont trop lents pour pouvoir les mettre en évidence. C'est pour cette raison que les instruments au sol restent incontournables.

Depuis les années 1980, on utilise des détecteurs ultrarapides au sol pour repérer d'éventuelles modulations de la lumière coronale durant les éclipses. Les

analyses des meilleures observations font apparaître des oscillations ayant des périodes de une à deux secondes. Serge Koutchmy, de l'Institut d'astrophysique de Paris, a mis en évidence des oscillations dont les périodes sont de 43, 80 et 300 secondes. C'est cette même recherche des oscillations rapides de la lumière coronale qui nous a conduits à Chabla, une petite ville bulgare des bords de la mer Noire, pour suivre l'éclipse d'août 1999. Notre instrument est constitué d'une paire de caméras CCD à lecture rapide, sensibles à la fois à la lumière blanche et aux raies spectrales vertes produites par le fer fortement ionisé. Pendant les 2 minutes et 23 secondes d'éclipse totale, l'instrument a réalisé 44 clichés par seconde, qui ont révélé des oscillations localisées en règle générale le long des structures en boucles. Leurs périodes vont de deux à dix secondes. Ailleurs, cependant, notre instrument n'a détecté aucune oscillation. Nous en concluons que des ondes magnétohydrodynamiques sont vrai-

semblablement présentes, mais qu'elles ne sont ni suffisamment fréquentes ni assez intenses pour jouer le rôle principal dans l'échauffement de la couronne.

Ainsi, grâce aux récentes observations par satellites et à la mise en œuvre de systèmes d'imagerie rapide au sol pendant les éclipses, un des plus anciens paradoxes de l'astrophysique semble être levé. Après avoir intrigué les astronomes pendant plus d'un demi-siècle, le mystère de la température anormalement élevée de la couronne solaire semble élucidé, même si les contributions respectives des ondes magnétohydrodynamiques et des nanoéruptions restent à préciser. Toutefois, un mystère en cache souvent un autre. Alors que l'astrophysique semble entrée dans l'ère des objets exotiques, tels que les trous noirs et la matière sombre, le plus ancien des objets célestes connus, avec la complexité de son système de couches, de son champ magnétique et de son dynamisme bouillonnant, n'a pas livré tous ses secrets.

Bhola DWIVEDI, professeur de physique à l'Université Banaras de Varanasi, en Inde, travaille sur le télescope à ultraviolets SUMER, embarqué sur le satellite *SOHO*. Kenneth PHILLIPS dirige le groupe de recherche solaire du Laboratoire Rutherford Appleton de Didcot, en Angleterre.

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

Klaus WILHELM et al., *The Solar Corona above Polar Coronal Holes as Seen by SUMER on SOHO*, in *Astrophysical Journal*, vol. 500, n° 2, pp. 1023-1038, juin 1998.

Serge KOUTCHMY et Pierre GUILLERMIER, *Éclipses totales*, Masson, 1998.

Serge BRUNIER et Jean-Pierre LUMINET, *Éclipses, les rendez-vous célestes*, Bordas, 1999.

Serge KOUTCHMY et Pierre GUILLERMIER, *Les éclipses de Soleil*, in *Pour la Science*, n° 259, p. 70, mai 1999.

Carolus SCHIJVERB et Alan TITLE, *Today's Science of Sun, Parts 1 and 2*, vol. 101, n° 2, pp. 34-39, février 2001 ; n° 3, pp. 34-40, mars 2001.

Leon GOLUB et Jay PASACHOFF, *Nearest Star : The Exciting Science of Our Sun*, Harvard University Press, 2001.

James BURCH, Pierre LANTOS et Tahar AMARI, *Les fureurs du Soleil*, in *Pour la Science*, n° 284, juin 2001.