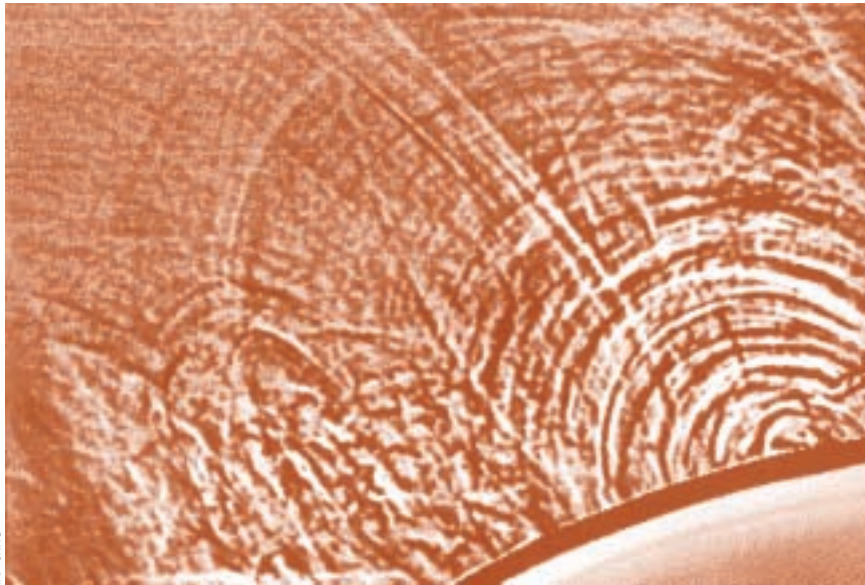


toutefois que la zone d'observation intéressante est située relativement loin du Soleil (à plus de un rayon solaire de la surface), zone révélée lors des éclipses totales. Ainsi, tout récemment, les données du spectromètre de

diagnostic coronal (CDS) à bord de l'observatoire spatial SOHO ainsi que d'autres expériences, ont montré des comportements différents des types d'ions du plasma (selon leur masse et leur charge).



5. LA MEILLEURE RÉOLUTION jamais obtenue pour une image de la couronne solaire en lumière blanche (la lumière diffusée par les électrons libres de la couronne). On distingue sur cette image un enchevêtrement de structures gazeuses dont la plupart ont la forme de boucles. Environ 400 clichés assez semblables ont été pris lors de l'éclipse de 1991 au foyer du télescope CFH de 3,60 mètres de diamètre, à Hawaii. Le traitement de ces images met en évidence les structures dont l'échelle est voisine de trois secondes d'angle. Des structures plus fines existent, mais elle ne ressortent pas sur cette image. La largeur de l'image correspond à environ 400 000 kilomètres sur le Soleil.

Attention les yeux !

Les éclipses de Soleil sont des spectacles naturels magnifiques dont les conséquences sur les observateurs imprudents peuvent être graves : après chaque éclipse de Soleil qui passe dans des lieux densément peuplés, on recense de nombreuses lésions oculaires, non que le Soleil soit plus dangereux lors des éclipses, mais parce que les gens regardent le Soleil plus longtemps, sans précautions particulières.

Durant toute la phase partielle, le Soleil émet presque autant de rayonnement que s'il n'était pas éclipsé. Sans protection oculaire, le danger est grand. La protection la plus sûre est le « verre de soudeur » de grade 14. Cette petite plaque de verre absorbant, que l'on trouve dans les bonnes quincailleries, vous permettra d'observer sans danger toutes les phases de partialité. Durant les deux minutes de la totalité, enlevez votre verre et admirez le spectacle à l'œil nu. Moins onéreuses, des lunettes filtrantes en polymère noir assureront une sécurité et un confort excellents. À défaut, vous pouvez utiliser du Mylar aluminé, à condition qu'il ne

soit pas craquelé ou fendu ; ou bien des filtres solaires spéciaux.

Les protections insuffisantes à proscrire absolument sont : les lunettes de soleil, même plusieurs paires superposées ; le verre noirci à la flamme d'une bougie ; les films couleurs ou les diapositives voilées (en revanche, on peut utiliser une double épaisseur de négatifs noir et blanc, entièrement voilés et développés, à condition que ceux-ci contiennent une émulsion argentique).

Enfin, si vous ne voulez pas regarder le Soleil directement, vous pouvez percer un trou dans un carton et projeter l'image du Soleil à travers le trou sur une feuille de papier.

Dans tous les cas, ne regardez jamais le Soleil partiellement éclipsé avec un instrument (jumelles, télescope) sans vous être assuré que celui-ci est équipé d'un filtre adéquat placé sur l'objectif (et non sur l'oculaire).

Les 500 premiers lecteurs qui nous enverront une enveloppe auto-adressée, affranchie au tarif normal, recevront une paire de lunettes en polymère noir distribuées par la Société astronomique de France.

Structures ultra-fines

Les structures qui apparaissent dans la couronne émanent de la chromosphère et de la région de transition entre la chromosphère et la couronne. À l'aide d'une caméra CCD, lorsque le recouvrement de la chromosphère par la Lune est bon, on distingue la hauteur des structures dans ces régions où la température est intermédiaire entre la faible température de la photosphère et la température élevée de la couronne. Dès la fin des années 1960, on distinguait des structures chromosphériques avec une résolution meilleure que deux secondes d'angle ; on obtient aujourd'hui des résolutions bien supérieures.

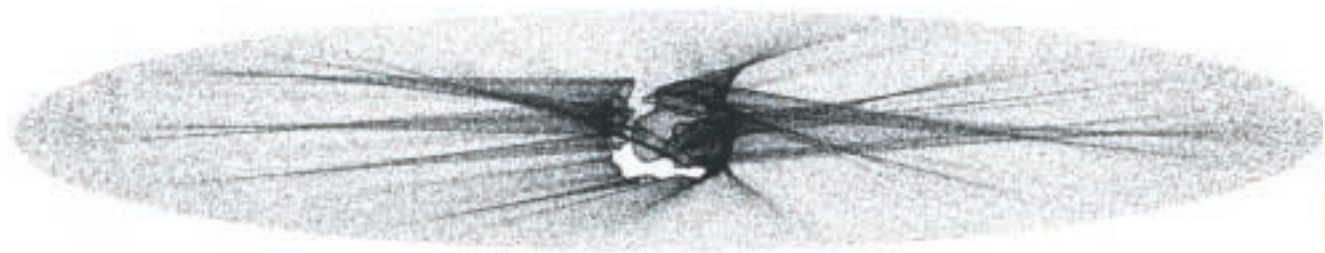
Ainsi, avec un télescope de 20 à 30 centimètres de diamètre équipé d'une petite caméra CCD, nous espérons une coupe de la région de transition entre la chromosphère et la couronne.

Outre l'image observée purement statique, les techniques modernes abordent la dynamique aux petites échelles, comme cela avait été tenté au foyer du télescope CFH de 3,60 mètres de diamètre, à Hawaii, lors de l'éclipse totale de 1991. En superposant plusieurs images, cette observation a révélé dans la couronne un enchevêtrement de structures (voir la figure 5). La plupart des structures ont une forme de boucle.

Lors de la même éclipse, l'observation de raies émanant de l'hydrogène a révélé pour la première fois de petites structures froides, très proches de la surface, au comportement parfois complètement nouveau. La plus petite structure mesurée avait une taille de 0,4 seconde d'angle, et sa durée de vie était de l'ordre d'une quarantaine de secondes seulement. Ces échelles de taille et de temps sont vraisemblablement proches des échelles où la turbulence domine, c'est-à-dire où les vitesses non thermiques sont grandes devant la vitesse propre du vent solaire. Autrement dit, avec quelques progrès dans la résolution, nous serons capables de voir directement la turbulence !

La dynamique à très petite échelle

Peut-on observer des phénomènes encore plus rapides, c'est-à-dire des structures qui varient en moins de 40 secondes ? Le bord Est du Soleil, lors de l'éclipse de 1991 a été observé à l'aide d'une caméra CCD. Nous avons enregistré 6 100 images durant 210 secondes,



S. Koutchmy - M. Molodensky

6. À PARTIR DE MESURES DU CHAMP MAGNÉTIQUE à la surface du Soleil, on a représenté ici la surface en grisé où la composante radiale du champ magnétique est nulle, là où sont piégées les particules chargées. De plus, en plaçant 400 000 particules dans

cette structure magnétique, on illustre les effets de projection observés sur les images d'éclipses. En raison de la courbure des feuilles de courant, certaines zones apparaissent comme des discontinuités, alors qu'elles sont en réalité repliées.

soit près de 30 images par seconde. La résolution spatiale était de l'ordre de 0,7 seconde d'angle, et un filtre permettait de soustraire les émissions qui émanaient des régions froides.

Sur ces images, nous avons suivi un nuage de particules, un «plasmaïde». Ce petit nuage, dont les dimensions ne dépassent guère trois secondes d'angle, a un comportement complexe, impossible à décrire par une simple trajectoire balistique : il serait soumis à d'importantes forces magnétiques. Lorsque la vitesse de propagation d'une perturbation de pression, telle ce nuage, est supérieure à la vitesse du son (qui dépend de la température locale), un choc se forme et des effets dissipatifs ralentissent le nuage. Or, la vitesse typique du nuage est de l'ordre de 100 kilomètres par seconde, ce qui est sans doute inférieur à la vitesse du son aux températures coronales, mais est du même ordre de grandeur que la vitesse du son à la température présumée du petit nuage. Ainsi, ce nuage devrait être ralenti.

À l'Institut d'astrophysique de Paris, Olivier Bouchard et Cécile Delannée ont analysé le phénomène, mais n'ont pu conclure sur la nature de cette structure : s'agit-il de tourbillons de gaz relativement «froid» (50 000 kelvins) ; d'un nuage de particules qui posséderait son propre champ magnétique, indépendant du champ de la couronne environnante ; d'une onde de propagation ; des éléments d'une boucle coronale «invisible» qui se serait cassée par reconnexion de lignes de champ magnétique ? Toutes les possibilités sont concevables.

La résolution est améliorée par les caméras CCD : avec des temps de pose courts, le traitement des images améliore grandement la résolution, limitée par la turbulence de l'atmosphère terrestre. Ces expériences, qui profitent des progrès de l'imagerie moderne, apporteront des moissons de nouvelles découvertes sur la formation des structures

et sur le chauffage de la couronne, mais l'imagerie permet aussi de progresser sur le vent solaire.

La perte de masse

La masse du Soleil diminue continuellement. Cette perte de masse résulte de particules émises par le Soleil, transportées dans la couronne et éjectées dans le milieu interplanétaire. Ce vent solaire émane des structures coronales. Nous avons vu que la couronne interne est très finement structurée en boucles, mais, à partir de 0,3 à 0,5 rayon solaire de la surface, on distingue des lames coronales ou des feuillettes.

La topologie de ces feuillettes échappe encore à l'observation, et seules les modélisations numériques permettent pour l'instant d'appréhender leur structure tridimensionnelle (voir la figure 6). Lors d'éclipses, il est néanmoins possible de profiter du fait que ces structures coronales tournent de manière quasi rigide (à l'échelle de quelques heures) pour photographier les structures à grande échelle, à une heure trente d'intervalle par exemple (depuis deux points éloignés de la ligne de centralité, comme Hawaï et le Brésil pour l'éclipse de 1991), et visualiser ainsi leur forme.

Au cours des éclipses de 1991 et de 1994, les observateurs ont ainsi vu des feuillettes très minces, avec parfois des plis qui s'expliquent bien par des effets de projection : une structure coronale fine vue par la tranche apparaîtrait mince. C'est peut-être la raison des structures très effilées observées dans la couronne.

Les progrès techniques offrent ainsi de nouvelles possibilités pour l'imagerie. Des films d'excellente résolution et suffisamment sensibles sont aujourd'hui disponibles. La numérisation peu coûteuse des clichés et l'utilisation des ordinateurs de bureau équipés de logiciels de traitement d'image font des merveilles. Ainsi, certains amateurs obtiennent des résultats étonnants,

mais ces travaux demeurent qualitatifs : l'analyse scientifique requiert une bonne calibration de la lumière reçue et de sa polarisation (l'orientation du champ électrique).

Les caméras CCD avec de nombreux pixels ($2\,000 \times 2\,000$) ont été utilisées pour la première fois lors de l'éclipse de 1998, aux Caraïbes, mais leur usage semble pour l'instant plus judicieux pour la spectroscopie des raies coronales que pour l'imagerie, car leurs détecteurs, plus sensibles que les films, sont précieux pour exploiter une observation de la couronne nécessairement courte. Dès l'éclipse de 1999, on devrait néanmoins assister à une confrontation sur l'imagerie entre tenants du film et partisans de la caméra CCD.

Au XIX^e siècle, les premières photographies d'éclipses montrent que les protubérances et la couronne sont d'origine solaire, et non lunaire comme beaucoup d'astronomes de l'époque le pensaient. Au XX^e siècle, les astronomes précisent la nature de la couronne et réalisent l'importance des phénomènes dynamiques. Gageons qu'au XXI^e siècle, ils élucideront les mécanismes de chauffage et d'accélération des particules dans la couronne, grâce notamment aux observations d'éclipses totales de Soleil simultanément du sol et de l'espace.

Pierre GUILLERMIER, physicien nucléaire et astrophotographe amateur, est passionné de physique solaire. Serge KOUTCHMY, spécialiste du Soleil, est directeur de recherche au CNRS (Institut d'astrophysique de Paris).

Les éclipses de Soleil, l'éclipse du 11 août 1999, EDP-Sciences, 1999.

P. MARTINEZ et Ph. MOREL, *Observer l'éclipse*, Adagio, 1999.

P. GUILLERMIER et S. KOUTCHMY, *Éclipses totales*, Masson, 1998.

Sur notre site, de nombreux liens commentés vous emmèneront vers des sites pratiques (cartes, calculs des circonstances pour un lieu donné, etc.) : <http://www.pourlascience.com>