



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>

Éclipses et chronologie

DENIS SAVOIE

La dernière éclipse totale de Soleil du millénaire, le 11 août 1999, sera visible en France. Cet événement céleste majeur est l'occasion de rappeler le rôle des éclipses dans les datations historiques, ainsi que leur utilité dans l'étude des irrégularités de la rotation de la Terre.

L'éclipse de Soleil qui évita à Tintin, au capitaine Haddock et au professeur Tournesol d'être sacrifiés par les Incas dans *Le Temple du Soleil* est connue de tous. On sait moins que la réalité a dépassé la fiction et que Christophe Colomb a tiré avantage d'une semblable situation... pendant une éclipse de Lune.

Lors de son quatrième voyage aux Amériques, Christophe Colomb et son équipage, alors à la Jamaïque, dépendent, pour les vivres, du bon vouloir des Indiens, qui de surcroît menacent de les massacrer. Comme tout navigateur prévoyant, le Génois possède des éphémérides, celles du grand astronome du XV^e siècle, Regiomontanus (1436-1476), qui indiquent entre autres les dates des futures éclipses de Soleil et de Lune.

Une éclipse totale de Lune est justement prévue dans la nuit du jeudi 29 février au vendredi 1^{er} mars 1504. Colomb convoque les caciques et leur tient un discours dans lequel il se fait le porte-parole du mécontentement de son Dieu, qui voit d'un mauvais œil l'attitude, au mieux passive des Indiens. Ces derniers vont mesurer l'ire du Dieu chrétien lors du lever de la Lune, qui apparaîtra enflammée et sanglante, signe précurseur des maux qui vont s'abattre sur eux. La Lune se lève effectivement éclip­sée, d'une couleur rougeâtre : cette vision terrorise les Indiens, qui se précipitent pour chercher et offrir des provisions. Peu de temps avant la fin de l'éclipse totale, Colomb annonce que tout va redevenir normal, à condition que les Indiens traitent les chrétiens comme il

se doit. Ce qui fut fait ! La prévision des éclipses remonte à l'Antiquité : elle est attestée dans la plus grande œuvre astronomique de cette époque, l'*Almageste*, due à Claude Ptolémée, astronome du II^e siècle de notre ère.

Plusieurs siècles auparavant, on savait déjà que les éclipses de Soleil ou de Lune se manifestaient sous deux conditions : que la Lune soit nouvelle pour une éclipse de Soleil (entre le Soleil et la Terre) ou pleine pour une éclipse de Lune (la Terre est alors entre la Lune et le Soleil), et que le Soleil soit proche de l'intersection où l'orbite lunaire coupe celle du Soleil. La prédiction du phénomène nécessitait donc l'élaboration d'une théorie du mouvement du Soleil et de la Lune.

Un miracle prévisible ?

Si, pour l'astre du jour, les calculs sont relativement aisés, il n'en allait pas de même pour la Lune, dont le mouvement est complexe. Ptolémée avait perfectionné la théorie de ces deux astres et, en plus, connaissait les diamètres apparents du Soleil et de la Lune, ainsi que leur variation selon la distance de ces astres à la Terre.

On mesure ici la supériorité de l'astronomie grecque sur l'astronomie babylonienne : même à leur apogée, vers 300 avant notre ère, les astronomes babyloniens n'étaient capables que de prédire la possibilité ou l'impossibilité d'une éclipse, rien de plus. Or, non seulement l'*Almageste* permettait de prédire les dates d'éclipses, mais

également leur visibilité en un certain lieu, leur type (totales ou partielles) et leur durée ! Jusqu'à Johannes Kepler, au XVII^e siècle, la méthode de Ptolémée restera sans amélioration.

L'aspect prodigieux des éclipses, en particulier celles de Soleil, a souvent été mis à profit dans les cultures anciennes pour justifier un miracle ou une défaite. Aussi, lorsqu'un texte ancien mentionne un tel événement, la première vérification à laquelle se livre un astronome est de s'assurer qu'il y a bien eu une éclipse à la date indiquée.

Une éclipse célèbre est celle de la Passion, rapportée dans l'Évangile selon Marc (15, 33) : « Quand ce fut la sixième heure, il y eut des ténèbres sur toute la Terre, jusqu'à la neuvième heure. » Dès le Moyen Âge, l'astronome Sacrobosco écrit un traité, *De Sphaera mundi*, qui sera lu et commenté jusqu'au XVII^e siècle ; il termine son ouvrage en se demandant si l'éclipse de la Passion était naturelle ou miraculeuse, non pas en calculant les dates d'éclipses, comme il aurait pu le faire, mais en objectant qu'une éclipse de Soleil se produit lorsque la Lune est nouvelle. Or, le Christ ayant été crucifié à Pâques, où par définition la Lune est voisine de sa plénitude, il ne peut s'agir que d'un miracle à travers lequel s'est manifestée la puissance divine... Une légende

1. EN 1504, en difficulté lors d'un voyage en Jamaïque, Christophe Colomb prédit la disparition de la Lune. Effrayés par la vision de la Lune rouge, ces derniers aidèrent les Européens jusqu'à l'arrivée des secours.

veut que Denys l'Aréopagite, apprenant la vraie nature de l'éclipse (le miracle) de l'apôtre Paul, se soit converti au christianisme, ait ensuite gagné la France, dont il aurait converti les habitants! Dieu ne pouvait se contredire et restait contraint par les lois de la physique qu'il avait créées : il n'y eut pas d'éclipse de Soleil à cette période.

L'historien Zosime, qui vécut au V^e siècle de notre ère, auteur d'une *Histoire nouvelle*, relate une bataille entre Eugène, Arbogast et Théodose, dite bataille du Frigidus, qui se déroula le 5 septembre 394 dans les Alpes Juliennes : «Lorsque Eugène marcha à leur rencontre avec l'ensemble de ses troupes et que les armées en vinrent aux mains l'une avec l'autre, il se produisit au moment même du combat une éclipse de Soleil si complète qu'il sembla plutôt faire nuit que jour pendant un laps de temps considérable.» L'indication que l'éclipse dura «un laps de temps considérable» est suspecte : le calcul astronomique montre qu'aucune éclipse de Soleil n'eut lieu le 5 septembre 394! Zosime a sans doute inventé cette éclipse de Soleil pour expliquer la défaite d'Eugène face à Théodose : les hommes d'Eugène auraient été massacrés, exténués par un combat nocturne...

En vérifiant des éclipses anciennes, les astronomes du XVII^e siècle seront

confrontés à une énigme dont les tenants et les aboutissants ne seront totalement compris qu'au début du XX^e siècle. La naissance de la mécanique céleste, après Newton, a permis d'importants progrès dans la théorie du mouvement de la Lune, où les astronomes savaient intégrer les perturbations dues au Soleil. Il apparut cependant que la théorie du mouvement de la Lune s'écartait de l'observation lorsque l'on calculait des éclipses de Soleil anciennes : il subsistait des décalages inexplicables entre l'heure observée, rapportée par tel ou tel astronome de l'Antiquité, et l'heure calculée à l'aide de la théorie.

Le décalage des éclipses

Au XVIII^e siècle, les astronomes conclurent que, vu, de la Terre, la Lune avait accéléré lentement sur son orbite au cours des siècles d'une quantité égale à environ 20'' par siècle carré. Pierre Simon de Laplace crut expliquer cette accélération séculaire par la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre (l'excentricité mesure l'allongement d'une orbite elliptique), causée par les perturbations planétaires. L'effet gravitationnel des planètes modifiant lentement l'excentricité de l'orbite terrestre, l'orbite lunaire en aurait été modifiée. Effectivement, ces calculs

expliquaient une accélération séculaire proche de celle observée.

Toutefois, au milieu du XIX^e siècle, le problème rebondit grâce à John Couch Adams, le codécouvreur de la planète Neptune : en refaisant les calculs avec le Français Charles Delaunay, les astronomes conclurent que la théorie de la gravitation expliquait une accélération séculaire de 12'' par siècle carré, alors que les analyses des observations anciennes indiquaient une accélération deux fois plus grande. Quelle était l'origine de cette accélération supplémentaire?

La réponse fut trouvée au début du XX^e siècle : sous l'effet des frottements dus aux marées dans les océans et dans les différentes couches du manteau terrestre, la Terre ralentit sa rotation. Comme le système Terre-Lune est, en première approximation, isolé dans l'espace, le moment cinétique du système se conserve (le moment cinétique d'un corps en rotation est le produit de la vitesse de chaque masse ponctuelle du corps par la distance de cette masse à l'axe de rotation). La diminution du moment cinétique de la Terre est alors compensée par une augmentation du moment cinétique orbital de la Lune. Ainsi, la distance de la Terre à la Lune augmente et la vitesse orbitale de la Lune diminue (selon la deuxième loi

