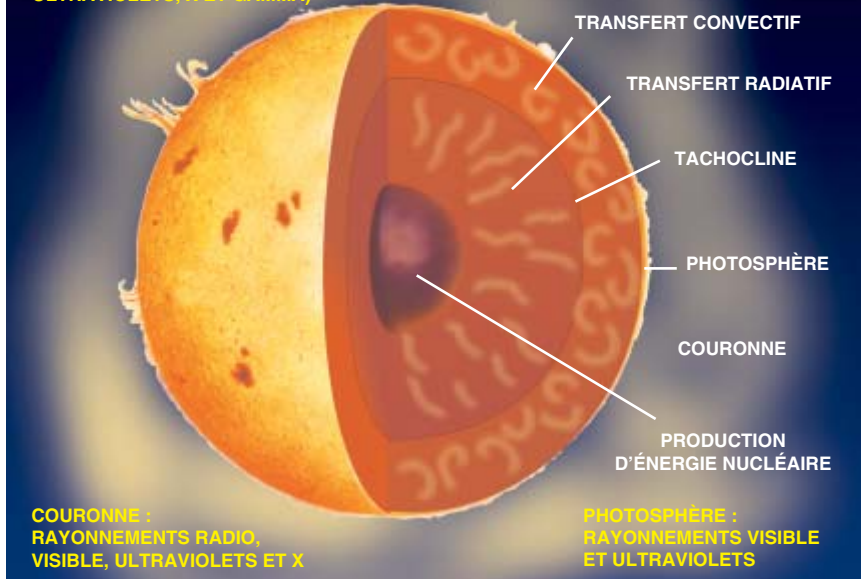


ÉRUPTION SOLAIRE :
 – PROTONS ET ÉLECTRONS ACCÉLÉRÉS
 – RAYONNEMENTS (RADIO, OPTIQUE, ULTRAVIOLETS, X ET GAMMA)



3. AU CŒUR DU SOLEIL, les réactions nucléaires libèrent de l'énergie qui se propage d'abord par transfert radiatif, puis, dans une région plus éloignée par transfert convectif. À la frontière entre ces deux zones, la tachocline, le champ magnétique solaire prend naissance. Il est véhiculé vers l'extérieur, et ce sont ces champs magnétiques intenses émergeant à la surface qui produisent les taches solaires sombres. On a indiqué (en jaune) les différents types de rayonnements et de particules qu'émet le Soleil (dans les éruptions solaires), sa couronne et sa photosphère.

L'origine des taches et des éruptions

L'apparition de taches à la surface du Soleil est liée à l'émergence de tubes de champ magnétique fort qui proviennent des régions situées aux deux tiers du rayon solaire. C'est la région qui sépare la partie centrale, où l'énergie créée par les réactions nucléaires se propage par transfert radiatif (des photons sont absorbés et émis de proche en proche), de la partie externe, où le transport d'énergie se fait par convection. La matière chaude, en mouvement ascendant, transporte alors l'énergie vers la surface. La région de transfert radiatif est en rotation rigide, c'est-à-dire que l'ensemble de la masse tourne à la même vitesse. Au contraire, la région de transfert convectif, la photosphère (région de l'atmosphère du Soleil qui produit la quasi-totalité du rayonnement visible), subit une rotation différentielle : à chaque latitude correspond une vitesse de rotation différente et les régions équatoriales tournent plus vite que les régions de latitude élevée.

L'interface de ces deux zones de l'intérieur solaire, la tachocline, est très étroite (moins d'un dixième du rayon solaire). C'est à cet endroit que l'on situe le mécanisme dynamo, qui crée le champ magnétique solaire à partir de l'énergie de rotation. Créé dans les régions proches de la transition entre la zone

radiative et la zone convective, le champ magnétique est transporté vers l'extérieur. La matière chaude monte vers la surface en tourbillons et transporte avec elle l'énergie thermique qui provient des couches sous-jacentes. Elle redescend ensuite, refroidie, par des courants plus localisés et intenses et qui ont une longue durée de vie. Les boucles de champ sont transportées vers la surface par les mouvements de convection mentionnés précédemment. Le champ magnétique bloque le chauffage et fait baisser la température dans ces régions qui paraissent plus sombres que leur environnement : ce sont les taches solaires.

Les éruptions correspondent à une libération brusque de l'énergie magnétique stockée dans la couronne. Les champs dits potentiels sont ceux dont l'énergie est minimale. Une torsion ou un cisaillement des lignes de champ augmente cette énergie. Or, les lignes de champ magnétique de la couronne, ancrées dans la photosphère, sont déformées par les mouvements de cette dernière. Lorsque la limite de stabilité du système est atteinte, les lignes de champ se restructurent en simplifiant leur topologie, revenant à l'état potentiel et libérant l'énergie magnétique stockée.

On observe aisément les éruptions qui ont lieu à proximité des taches, parce qu'une raie spécifique du spectre visible de l'hydrogène, la raie nommée $H\alpha$, devient particulièrement brillante lors

de ces éruptions. Les phénomènes accompagnant la restructuration du champ magnétique, lors d'une éruption, sont nombreux et complexes, et le renforcement des raies optiques n'en est qu'un aspect. Par différents mécanismes mettant souvent en jeu des particules accélérées, les grandes éruptions situées dans les régions actives entourant les taches émettent en fait dans tout le spectre électromagnétique, du domaine des rayons gamma jusqu'au domaine radio. Les éruptions localisées dans des régions plus éloignées des taches (où le champ magnétique est plus faible), ne présentent pas toutes ces émissions, mais elles peuvent éjecter de la matière coronale.

La prévision des caprices

L'observation de la morphologie des taches a longtemps été la seule méthode permettant de prévoir les éruptions. Plus le groupe de taches est complexe, plus les éruptions sont probables. Depuis quelques années, cette méthode a été notablement améliorée par l'observation continue du champ magnétique photosphérique que les satellites rendent aujourd'hui possible. Une éruption se produit lorsque des taches proches ont des polarités magnétiques opposées : cette situation est favorable à la restructuration du champ magnétique. C'est le cas, par exemple, lors de l'émergence d'une nouvelle tache.

Cependant, la prévision actuelle est limitée : elle ne donne que la probabilité d'une éruption, sans permettre de préciser ni son importance, ni le moment auquel elle aura lieu. Or, des informations précises sur l'intensité, sur la date et sur l'heure seraient essentielles si une décision critique, parce qu'elle aura un coût notable, doit être prise : par exemple, le report du lancement d'un satellite, l'annulation d'une sortie d'astronautes dans l'espace ou même l'annulation d'un vol long-courrier.

Pourquoi ces prévisions sont-elles difficiles ? Notamment parce que l'on ne connaît pas de façon détaillée la structure du champ magnétique de la couronne solaire, où l'éruption se déclenche. À l'exception de quelques régions particulières, on ne sait pas mesurer le champ magnétique coronal. Pour aller plus loin, on doit procéder à des calculs d'extrapolation à partir des données photosphériques. De nombreuses méthodes d'extrapolation du champ magnétique photosphérique vers la couronne ont été

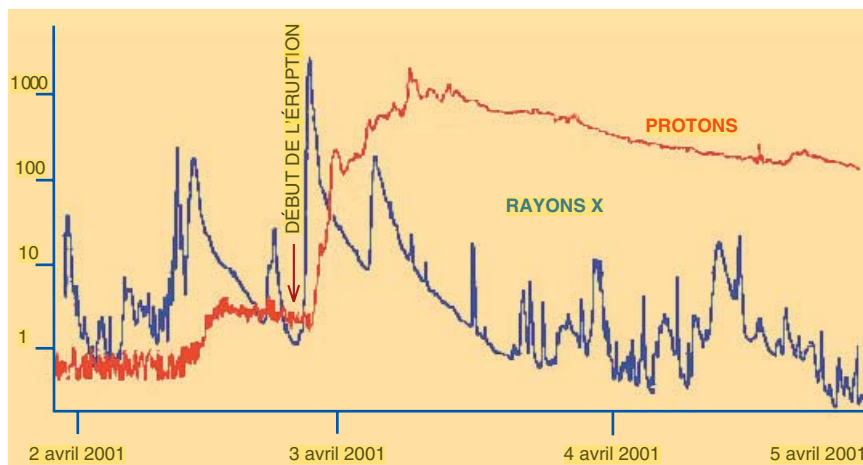
proposées. Elles diffèrent surtout par les hypothèses faites pour le calcul.

La plus simple consiste à calculer un champ potentiel ; dans ces modèles, on admet qu'aucun courant électrique ne circule (on néglige la présence du plasma coronal). Cela conduit à des configurations du champ magnétique simples, sans torsion ni cisaillement : malheureusement, cette approche n'apporte pas d'informations sur les possibles déclenchements d'éruptions, puisque l'énergie magnétique reste toujours minimale.

Il nous faut envisager des méthodes plus élaborées, où le champ magnétique et les courants électriques donnent une configuration stable, où toutes les forces sont en équilibre. Les méthodes disponibles aujourd'hui permettent aux astrophysiciens de calculer le champ magnétique à toutes les altitudes au-dessus des régions actives pour lesquelles on dispose de bonnes mesures du champ magnétique photosphérique et de son orientation. On peut alors, sur la base de critères quantitatifs, et non plus d'estimations empiriques, déterminer les régions où les éruptions risquent de se déclencher. Les calculs d'extrapolation ne donnent cependant que des solutions statiques et ne permettent pas de prévoir le moment de déclenchement de l'éruption. Pour y parvenir, il nous faudrait connaître l'évolution dynamique de la région concernée.

Une approche issue de la physique des plasmas, la magnétohydrodynamique (voir l'encadré des pages 58 et 59), fournit les équations nécessaires, sous certaines hypothèses, pour traiter le problème de l'évolution des structures magnétiques solaires. On peut alors suivre l'évolution des structures magnétiques coronales qui peuvent être à l'origine d'une éruption ou d'une éjection de matière coronale. Nécessitant une puissance de calcul considérable, ces méthodes ne sont pas encore opérationnelles, mais elles pourraient le devenir dans un futur relativement proche.

La prévision des éruptions solaires n'est qu'un exemple de l'utilisation des modèles récents élaborés pour la prévision de l'état de l'environnement terrestre. Pour que ces modèles soient utilisables, ils doivent tenir compte des interactions de tous les éléments qui interviennent dans les relations Soleil-Terre : l'activité solaire, le milieu interplanétaire, la magnétosphère terrestre, les ceintures



4. LES ÉMISSIONS DE RAYONS X (en bleu) et de protons (en rouge) ont été enregistrées par les satellites GOES, lors de l'éruption solaire du 2 avril 2001. On note que les premiers protons arrivent un peu après les premiers rayons X. Pour ces derniers, l'émission est de courte durée, puisqu'elle ne dure que quelques heures : c'est la durée de l'éruption solaire. Le flux des protons accélérés décroît plus lentement, car ils envahissent le Système solaire interne et il leur faut plusieurs jours pour s'en échapper.

de radiation (des zones, proches de la Terre, où les lignes de champ magnétique confinent des particules chargées, telles que des électrons ou des protons), sans oublier l'atmosphère terrestre.

Une approche globale des relations Soleil-Terre

La météorologie de l'espace ressemblera-t-elle un jour à la météorologie classique ? Grâce à une coopération internationale efficace, les météorologistes disposent d'une grande quantité de données d'observation, disponibles très rapidement par un échange permanent. Les observations sont faites d'une manière continue par des stations au sol et, aujourd'hui, par des satellites. La défaillance d'un de ces dispositifs de surveillance et d'un des satellites météorologiques entraîne son remplacement immédiat. Pour la prévision de l'activité solaire, de l'état du milieu interplanétaire et de l'état de l'environnement terrestre, ce n'est pas le cas aujourd'hui, car l'organisation globale est encore embryonnaire : seuls quelques satellites

opérationnels américains surveillent systématiquement le Soleil et l'environnement spatial. Les données disponibles par ailleurs le sont grâce aux stations d'observation au sol et aux satellites scientifiques, dont la durée de vie est limitée.

Au cours des dernières années, les agences spatiales et les industriels ont réalisé l'intérêt de prévoir la météorologie de l'espace. Ils préparent des programmes ambitieux de surveillance de l'environnement. Une meilleure utilisation des prévisions actuelles aurait sans doute évité la perte du satellite japonais ASCA, destiné à l'observation de l'Univers en rayons X. En effet, l'importante éruption solaire du 14 juillet 2000 et l'éjection coronale associée ont déclenché, le 15, un orage géomagnétique intense, qui a modifié l'orientation du satellite, dont les batteries solaires se sont déchargées. Or cet orage géomagnétique était aisément prévisible, l'heure même de son déclenchement aurait pu l'être ! En surveillant l'orientation du satellite et en anticipant les corrections nécessaires, on aurait sans doute évité de le perdre.

Pierre LANTOS est directeur de recherche, au CNRS, à l'Observatoire de Paris-Meudon. Tahar AMARI est directeur de recherche, au CNRS, au Centre de physique théorique de l'École polytechnique.

R. KIPPENHAHN, *Discovering the Secrets of the Sun*, éditions Wiley, Chichester, 1994.

P. LANTOS, *Le Soleil en face. Le Soleil et les relations Soleil-Terre*, Collection Culture scientifique, Masson, 1997.

T. AMARI, J.-F. LUCIANI, Z. MIKIC, J. LINKER, *A Twisted Flux Rope Model For Coronal Mass Ejections and Two Ribbon Flares*, in *Astrophysical Journal*, 2000, vol. 529, n° 1, pp. L49-L52, 2000.

K. KLEIN, G. TROTTET, P. LANTOS, J.-P. DELABOUDINIÈRE, *Coronal electron acceleration and relativistic proton production during the 14 juillet 2000 flare and CME*, in *Astronomy and Astrophysics*, à paraître.