

rations magnétiques prééruptives des mouvements de torsion ou de cisaillement qui visaient à déstabiliser le système et à libérer l'énergie emmagasinée sous la forme d'une grande éruption ou d'une éjection coronale. Ils pensaient y être parvenus, d'après les résultats satisfaisants obtenus à deux dimensions. Toutefois, la prise en compte du troisième degré de liberté a remis en cause le modèle, dont la pertinence n'est démontrée que dans le cas où la région active contient au moins deux dipôles (c'est une région quadripolaire). C'est ce qu'ont montré Spiro Antiochos et ses collègues du Laboratoire de recherche navale, à Washington.

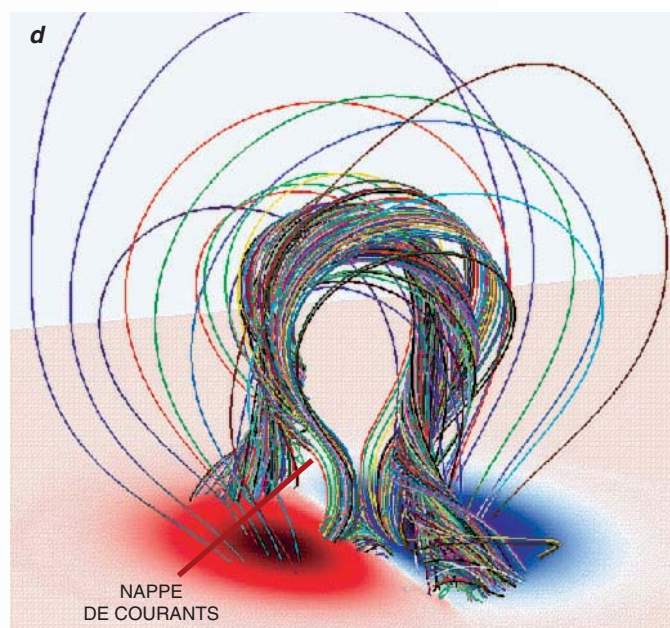
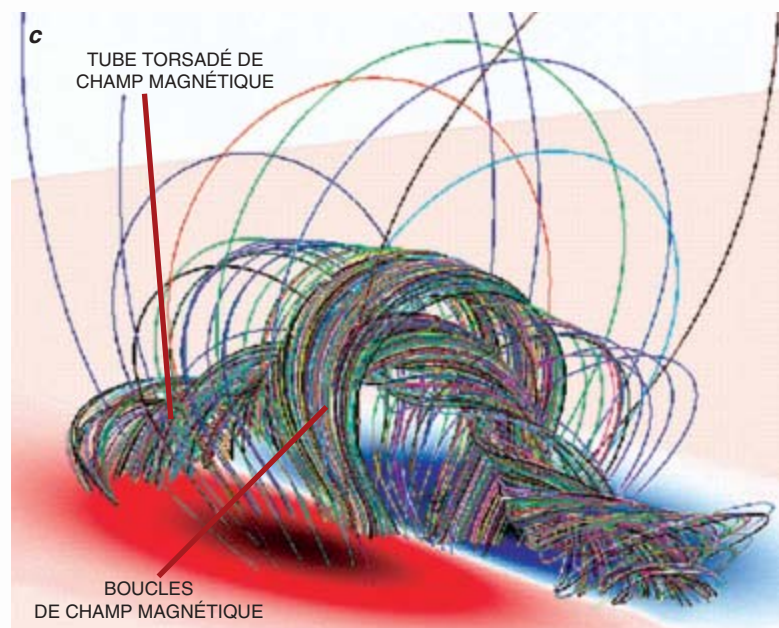
Alors, l'un des auteurs (Tahar Amari) et Jean-François Luciani du Centre de physique théorique de l'École Polytechnique, avec Zoran Mikic et Jon Linker, à San Diego, ont eu l'idée de prendre en compte les modifications du flux magnétique solaire observées au cours de l'évolution d'une région active. Leurs simulations numériques montrent qu'outre la présence de boucles qui relient deux taches, on constate l'émergence d'un tube de flux magnétique qui s'enroule au centre des boucles (voir la figure c). Au fil de son évolution, le tube est de plus en plus torsadé, et il y circule d'intenses courants électriques induits par le fort champ magnétique qui évolue.

Dans la première phase de ces simulations, le tube torsadé est stable. Dans les creux magnétiques (les «corbeilles» dont la concavité est dirigée vers le «bas») la matière «froide» d'une protubérance peut s'accumuler. Une protubérance est une accumulation de matière (électrons, protons et noyaux) qui est brusquement éjectée du Soleil, lorsque l'énergie accumulée est si élevée que la moindre instabilité rompt l'équilibre précaire. Dans une protubérance, la température (environ 10 000 degrés) est notablement inférieure à la température de la couronne (un million de degrés). C'est cette matière «froide» qui peut s'accumuler dans les creux du tube torsadé. Cette matière constitue la protubérance que l'on observe souvent dans une éjection coronale. La force exercée par le champ magnétique solaire «supporte» la matière

froide des protubérances qui tend à se condenser sur les boucles de champ. De surcroît, le champ magnétique joue le rôle d'un isolant thermique : la chaleur se propage beaucoup plus vite dans la direction parallèle aux lignes de champ que dans la direction perpendiculaire. Cette anisotropie fait du champ magnétique un isolant thermique qui empêche la couronne de réchauffer les protubérances.

Au-delà d'un seuil critique d'émergence, les simulations montrent que l'énergie magnétique de la configuration est si élevée qu'elle devient incompatible avec l'existence d'un état d'équilibre : le système subit une transition dynamique. Le champ magnétique est alors «presque gelé» dans la matière, mais, sur de très petites échelles spatiales, la conductivité électrique (très élevée, mais finie), permet la dissipation des courants électriques intenses. Le lien magnétique entre les lignes de champ est rompu, et l'organisation de ces lignes est modifiée : le tube spiralé évolue rapidement, se tord encore davantage, et la voûte finit par rejoindre celle dessinée par les boucles qui relient les deux taches (voir la figure d). On constate alors que la combinaison des boucles de champ et des lignes de champ du tube torsadé dessine (en vue de dessus) un S... celui du modèle b.

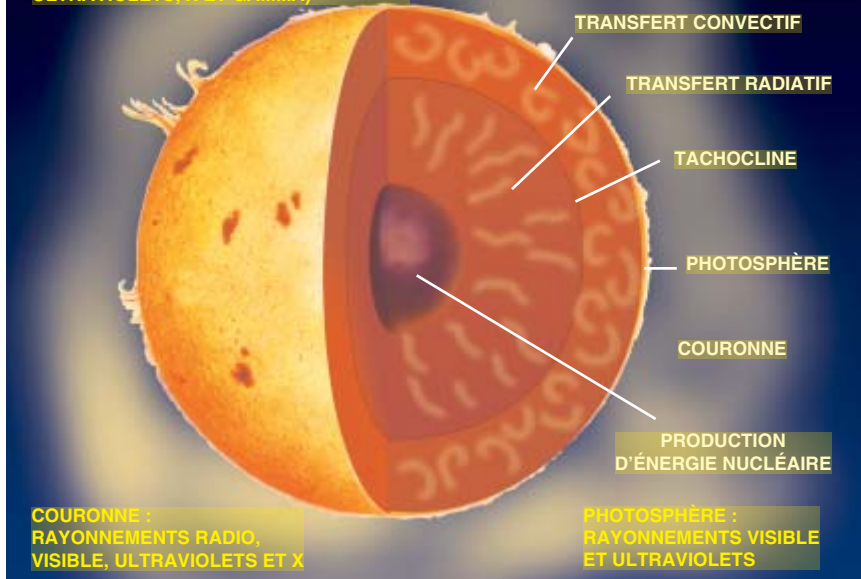
Cette fusion des deux systèmes de champ permet la libération d'énergie magnétique au profit d'une conversion en énergie cinétique et en chaleur. La protubérance est brusquement libérée, et se sépare à l'endroit du rétrécissement des boucles, où les lignes de champ de sens opposés se touchent, en créant une nappe de courants. Ce modèle s'applique indifféremment aux régions actives de polarité simple (dipôle) que de polarité complexe (quadripôle). Dès à présent, nous avons mis en évidence certains facteurs directement associés au déclenchement des éruptions solaires, tels le profil des courants électriques, l'énergie magnétique ou encore la direction du champ magnétique photosphérique. C'est seulement par l'étude des mécanismes fondamentaux que les astrophysiciens pourront, un jour, prévoir les éruptions solaires.



devient si élevée, que le système évolue rapidement. Le tube spiralé devient instable, les lignes du champ spiralé s'enflent jusqu'à rejoindre celles des boucles qui relient les deux taches. Les lignes du champ spiralé et du champ en boucles fusionnent vers le haut (d), de même que les lignes proches des pieds des boucles. On constate que la fusion des lignes en boucles et des lignes du champ spiralé dans le haut de la protubérance forment un S, qui n'est pas sans rappeler celui du

modèle simplifié (évoqué en b). Une quantité notable d'énergie est emmagasinée dans cette protubérance et est brusquement libérée sous la forme d'une éruption solaire ou d'une éjection coronale. Une fois ce modèle validé, il restera aux astronomes à trouver quelques configurations statiques qui leur permettront de prévoir les configurations du champ magnétique qui annoncent une éruption solaire (simulations réalisées avec le soutien du CNES).

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