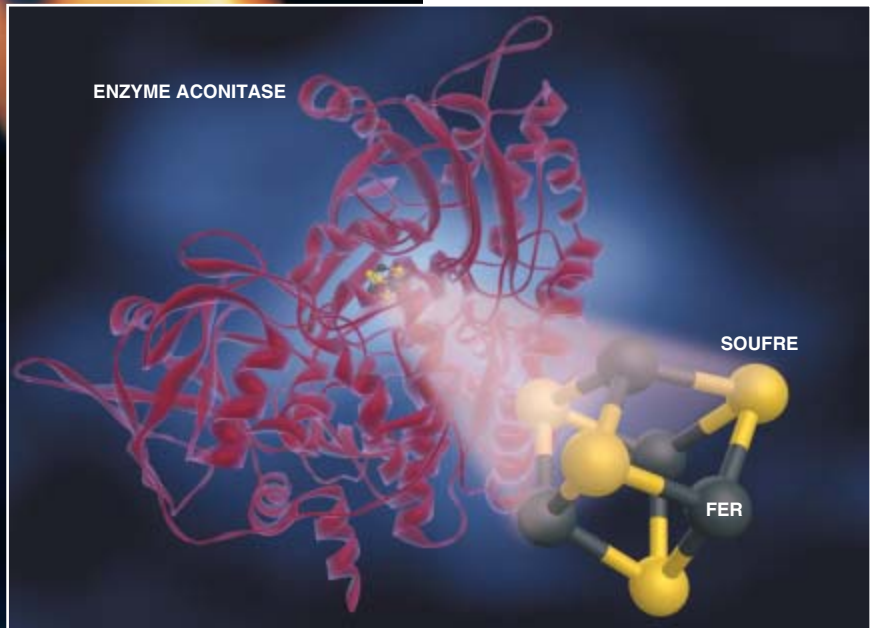




K. Ewara, BioGraX

**5. LES MINÉRAUX ONT FOURNI DES RÉACTIFS** pour diverses réactions chimiques essentielles. Ainsi, le sulfure de fer, dans les conditions extrêmes de température et de pression qui règnent aux abords des sources hydrothermales, se «dissout» en fer et en soufre, des éléments qui constituent le centre actif de certaines enzymes biologiques, telle l'aconitase.

cherchons dans quelle mesure ces complexes potentiellement réactifs pourraient avoir agi comme des enzymes, favorisant la synthèse de nouvelles molécules. Aujourd'hui il semble confirmé que les minéraux dissous ont joué un rôle important dans l'apparition de la vie.

Les mécanismes d'apparition de la vie ont certainement été trop complexes pour s'être produits en une seule fois. Plusieurs événements se sont succédé, dont chacun a ajouté un degré d'ordre et de complexité au monde des molécules prébiotiques. La première étape a dû être la synthèse des tout premiers éléments constitutifs. Un demi-siècle de recherches a révélé que les molécules de la vie ont été produites en abondance, au sein de la nébuleuse dont est issu le Système solaire, à la surface des océans et au voisinage des sources hydrothermales. La Terre primitive abritait une diversité de molécules bien supérieure à celle dont la vie pouvait faire usage.

Les minéraux ont contribué à imposer de l'ordre dans ce chaos, d'abord en confinant et en concentrant les molécules, puis en les sélectionnant et en les assemblant, ce qui

a favorisé l'apparition des premiers systèmes moléculaires autorépliquatifs. Ces minéraux ne sont d'ailleurs pas exclusivement terrestres. Des micrométéorites ont peut-être été sources de vie : elles contiennent des composés organiques, elles sont poreuses, et renferment des sulfures métalliques, des oxydes et des argiles. Au contact de l'eau, elles auraient pu jouer un rôle tout à fait similaire à celui des minéraux des sources hydrothermales. L'hypothèse des micrométéorites complète celle des sources hydrothermales.

Les premiers systèmes autorépliquatifs n'ont pas créé la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui, mais ils ont pu, pour la première fois, inventer des propriétés indispensables à la vie. Dans ce scénario, une molécule autorépliquative serait apparue, puis aurait utilisé au mieux les ressources de son environnement. Des mutations seraient apparues dans des «molécules-filles», et les mieux adaptées auraient été «sélectionnées». Par cette sélection moléculaire naturelle, les systèmes moléculaires autorépliquatifs auraient commencé à évoluer, devenant inéluctablement de plus en plus efficaces et plus complexes.

Nous recherchons des réactions chimiques simples qui conduisent à un système autorépliquatif, peut-être un système lié aux cycles métaboliques communs à toutes les cellules vivantes. Nous sommes loin de recréer la vie en laboratoire et peut-être ne parviendrons-nous jamais à identifier les transformations chimiques qui ont donné naissance à la vie sur la Terre. Aujourd'hui, nous pouvons seulement affirmer que les minéraux ont joué un rôle essentiel dans l'apparition de la vie.

Robert HAZEN, professeur des sciences de la Terre à l'Université George Mason, mène ses recherches dans le Laboratoire Washington de géophysique de l'Institut Carnegie.

H. MOROWITZ, *Beginnings of Cellular Life*, Yale University Press, 1992.

D. DEAMER et G. FLEISCHAKER, *Origins of Life : The Central concepts*, Jones and Barlett, 1994.

J. HOLLAND, *Emergence : From Chaos to Order*, Helix Books, 1998.

N. LAHAV, *Biogenesis : Theories of Life's Origin*, in Oxford University Press, 1999.

# Les fureurs du Soleil

**S**ur la Terre, on cherche à prévoir les caprices du temps, les ouragans, les tempêtes et les orages pour minimiser les dégâts qu'ils pourraient causer. On évacue les personnes lorsqu'un ouragan est annoncé, on lance des avis de tempête pour que les marins regagnent le port le plus proche, ou encore on décide d'avancer une récolte de quelques jours avant qu'un orage de grêle ne la détruise.

Pourquoi s'intéresse-t-on à la météorologie de l'espace? Parce que pendant les éruptions du Soleil, les perturbations subies par l'atmosphère ont parfois de lourdes conséquences sur les réseaux électriques, sur les satellites, sur les composants électroniques miniaturisés ou encore sur les astronautes.

Trois types de perturbations sont en cause : des ondes électromagnétiques, telles des bouffées de rayonnements ultraviolet et X sont émises ; des particules accélérées sont éjectées en masse, tels des protons, des électrons et des noyaux d'atomes ionisés ; enfin, le vent solaire (un flux de particules chargées) est perturbé et des ondes de choc interplanétaires lors d'une éjection coronale, s'y propagent. Les éruptions ayant lieu dans les régions actives qui entourent les taches solaires engendrent de grandes variations du flux des rayonnements ultraviolet et X. De plus, ces mêmes éruptions créent les variations du vent solaire et des ondes de choc interplanétaires. En revanche, on ignore encore l'origine précise des particules accélérées : sont-elles accélérées par le Soleil ou par l'onde de choc interplanétaire? Les astrophysiciens en débattent.

Aujourd'hui, l'un des enjeux des astrophysiciens est de prévoir ces éruptions solaires. James Burch (voir *Éjections coronales et tempêtes spatiales*, page 46) examine ici les mécanismes des éjections coronales, tandis que Pierre Lantos et Tahar Amari (voir *Éruptions solaires et météorologie de l'espace*, page 54) s'intéressent aux éruptions solaires et à leurs conséquences. À défaut de pouvoir éliminer les sautes d'humeur du Soleil, on les surveille étroitement et on cherche à les prévoir.

**L**ors des éruptions du Soleil, les particules et les rayonnements émis ont parfois des conséquences néfastes sur les circuits électriques et sur les dispositifs électroniques à terre ou embarqués sur les avions et, *a fortiori*, à bord des satellites et des navettes spatiales. L'enjeu des astrophysiciens est aujourd'hui de prévoir ces éruptions pour en évaluer les conséquences possibles et tenter de les minimiser. Les principaux équipements menacés par les éruptions solaires (*en bleu*) et les éjections coronales (*en vert*) ont été rassemblés dans ce tableau (les perturbations découvertes le plus récemment, en 2000, sont indiquées dans le haut du tableau, les plus anciennes, découvertes vers 1960, figurent en bas).

## Les conséquences des fureurs du Soleil

### Rayonnements X et ultraviolets

#### Particules solaires

- Constellations de satellites
- Surveillance du lancement des satellites
- Systèmes de localisation et altimétrie
- Risques liés aux rayonnements (avions)
- Rentrée des satellites dans l'atmosphère
- Électronique embarquée (satellites et avions)
- Phénomènes de charges dans les satellites géostationnaires
- Explorations en géophysique
- Réseau de distribution de l'électricité
- Câbles téléphoniques
- Panneaux solaires de satellites
- Risques d'irradiation des astronautes
- Télécommunications avec les sous-marins
- Radars transhorizon
- Prévission de l'orbite des satellites
- Télécommunications par ondes courtes

### Particules de la magnétosphère

#### Activité géomagnétique

# Éjections coronales et tempêtes spatiales

**JAMES BURCH**

*Les éruptions de la couronne du Soleil déclenchent parfois de violentes turbulences autour de la Terre. Grâce à une nouvelle sonde, on comprend mieux comment naissent les tempêtes spatiales.*

**L**a tempête a commencé le 14 juillet 2000, quand les astrophysiciens du Centre d'environnement spatial de Boulder, dans le Colorado, ont détecté un signal d'alerte émis par le satellite GOES-8, chargé de surveiller les rayons X émis par le Soleil. À 10 heures 03 (temps universel), la densité des rayons X émis par une région du Soleil particulièrement active depuis une semaine, augmente brusquement, signe de l'imminence d'une éruption solaire, une émission brève et intense de rayonnement. Cette éruption atteint son maximum d'intensité 20 minutes plus tard, et le satellite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*, Observatoire du Soleil et de l'héliosphère), éloigné de un million et demi de kilomètres de notre planète, suit son évolution. Une demi-heure plus tard, tandis que l'éruption se calme, SOHO détecte un phénomène plus inquiétant : un nuage brillant grossit et forme un halo autour du Soleil. Il s'agit d'une «éjection coronale», une éruption de la couronne solaire (l'atmosphère externe du Soleil) qui projette dans l'espace des milliards de tonnes de particules chargées électriquement. La forme du halo indique que les particules se dirigent droit sur la Terre, à une vitesse de l'ordre de 1 700 kilomètres par seconde.

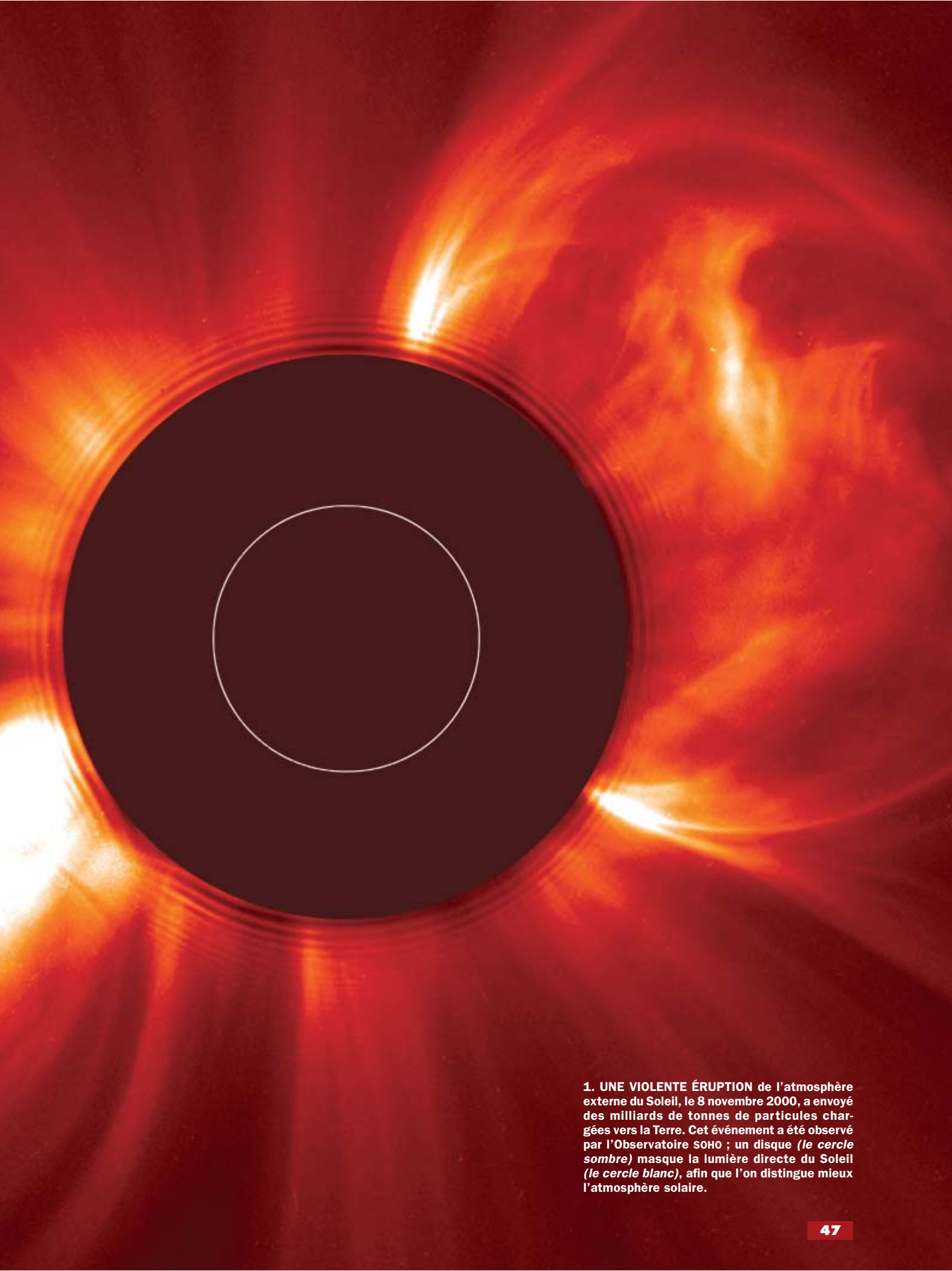
L'éjection coronale rattrape le vent solaire, le flux de gaz ionisé qui s'échappe en permanence du Soleil, ce qui engendre une onde de choc, laquelle accélère encore davantage certaines des particules. Moins d'une heure plus tard, un déluge de protons de haute

énergie s'abat sur SOHO, et perturbe tant les instruments embarqués, qu'aucun signal n'est émis pendant quelques minutes. Ce bombardement endommage les panneaux solaires de la sonde, faisant autant de dégâts en 24 heures que le rayonnement solaire n'en fait en une année. Pourtant, ce torrent de particules n'est que la ligne avancée de la tempête. L'onde de choc de l'éjection coronale arrive le lendemain, et frappe de plein fouet le champ magnétique terrestre. Cet impact provoque un violent orage géomagnétique, qui se déchaîne quelques heures plus tard avec l'arrivée de l'éjection coronale elle-même. Sur l'échelle utilisée par le Centre de l'environnement spatial pour mesurer l'intensité de l'activité géomagnétique, la tempête du 14 juillet 2000 a été le plus intense de tous les événements de ce type enregistrés durant les années 1990.

Sur la Terre, rares sont ceux qui ont suivi ces feux d'artifice célestes hormis les astrophysiciens, qui ont observé cet orage grâce aux images recueillies par le satellite IMAGE, lancé quatre mois plus tôt par la NASA. Ce satellite est le premier qui fournit des images globales de la magnétosphère, la région de l'espace protégée en partie des activités solaires par le champ magnétique terrestre : ce champ magnétique crée une sorte de cocon autour de la Terre, qui nous isole du milieu interplanétaire.

Au cours de l'orage du 14 juillet 2000, l'arrivée des particules chargées sur la haute atmosphère terrestre a provoqué une extraordinaire aurore boréale. Grâce aux données recueillies par le satellite

NASA/ESA, SOHO/Lasco consortium



1. UNE VIOLENTE ÉRUPTION de l'atmosphère externe du Soleil, le 8 novembre 2000, a envoyé des milliards de tonnes de particules chargées vers la Terre. Cet événement a été observé par l'Observatoire SOHO ; un disque (*le cercle sombre*) masque la lumière directe du Soleil (*le cercle blanc*), afin que l'on distingue mieux l'atmosphère solaire.

IMAGE lors de cet orage exceptionnel, les astrophysiciens comprennent mieux l'interaction des éjections coronales avec la magnétosphère terrestre.

## Calme plat ou tempête ?

Comme il l'est sur la Terre, le temps dans l'espace est extrêmement variable. Les conditions passent du calme plat à la tempête en quelques minutes, et les orages durent quelques heures, voire plusieurs jours. Sur la Terre, le temps change avec les saisons : la météorologie de l'espace a aussi ses propres cycles.

Toutefois, le temps qu'il fait dans l'espace découle de phénomènes physiques différents de ceux qui gouvernent la météorologie sur la Terre. La météorologie terrestre prend place dans le gaz dense et électriquement neutre de la basse atmosphère (les 15 kilomètres de la troposphère et les premiers kilomètres de la stratosphère située juste au-dessus), dont le comportement obéit aux lois de la dynamique des fluides et de la thermodynamique. À l'inverse, la météorologie de l'espace est commandée par le comportement d'un plasma, un mélange de gaz constitué d'ions positifs et d'électrons. Contrairement aux atomes et aux molécules de l'atmosphère terrestre, les particules des plasmas sont sensibles aux champs magnétiques et électriques, qui les guident et les accélèrent dans l'espace qui entoure la Terre.

La météorologie terrestre résulte de l'échauffement de l'atmosphère, des océans et des continents, par le rayonnement solaire. En revanche, dans la magnétosphère, la météorologie est le fruit de l'interaction du champ magnétique terrestre et du vent solaire. Le vent solaire a son propre champ magnétique, qui se déplace avec le plasma éjecté dans l'espace interplanétaire. Ce vent «emporte» le champ magnétique interplanétaire loin du Soleil, et les lignes de force de ce champ «flottant» s'étirent radialement (elles pointent vers le Soleil ou dans la direction opposée). Toutefois, dans certaines conditions, ces lignes de champ s'écartent du plan équatorial du Soleil et acquièrent une composante Nord ou Sud. Quand le champ magnétique interplanétaire s'oriente vers le Sud pendant plusieurs heures, on sait qu'un orage géomagnétique se prépare, comme les astrophysiciens l'ont vérifié lors de l'orage du 14 juillet 2000.

Le vent solaire est surtout constitué de protons, qui représentent environ 80 pour cent de sa masse totale. Le reste est composé de noyaux d'hélium (à peu près 18 pour cent), et d'ions lourds présents à l'état de traces. La densité moyenne du vent solaire sur l'orbite terrestre est de neuf protons par centimètre cube, et sa vitesse atteint 470 kilomètres par seconde. L'intensité moyenne du champ magnétique interplanétaire est égale à six nanoteslas (environ un cinquième de l'intensité du champ magnétique à la surface de la Terre). Les caractéristiques du vent solaire et l'orientation du champ magnétique interplanétaire sont variables, et sont les facteurs déterminants de la météorologie de l'espace.

Tous les astres du Système solaire sont exposés au vent solaire, qui souffle vers l'extérieur du système jusqu'à ce qu'il rencontre les gaz ionisés ou neutres de l'espace interstellaire. Toutefois, le vent solaire ne touche pas directement la Terre ni son atmosphère, car la Terre est protégée par son bouclier magnétique, la magnétosphère, qui l'isole du courant de particules chargées du vent solaire. La forme de la magnétosphère est déterminée par la pression du vent solaire et par le champ magnétique interplanétaire (voir la figure 2). Le vent comprime le champ magnétique sur la face de la Terre éclairée par le Soleil, et l'étire de l'autre côté, où il forme une longue queue, telle une comète. La queue magnétique s'étire sur plus de un million de kilomètres, c'est-à-dire bien au-delà de l'orbite de la Lune.

Entre le vent solaire et la magnétosphère s'étend une mince région frontalière, nommée la magnétopause, où la pression du champ géomagnétique et celle du vent solaire s'équilibrent. Du côté éclairé par le Soleil, cette limite est située à environ 64 000 kilomètres du centre de la Terre (cette distance varie avec la pression du vent solaire). Quand la pression augmente, comme ce fut le cas lors de l'orage du 14 juillet 2000, la magnétopause se rapproche de la Terre, jusqu'à quelque 26 000 kilomètres.

Quand le vent solaire rencontre la magnétosphère, il se produit une onde de choc, nommée «onde d'étrave» à quelque 13 000 kilomètres de la magnétopause (en direction du Soleil). La région comprise entre l'onde de choc et la magnétosphère est connue sous le nom de magnétogaine. Le plasma du vent solaire qui y est confiné est plus lent, plus chaud et plus turbulent que

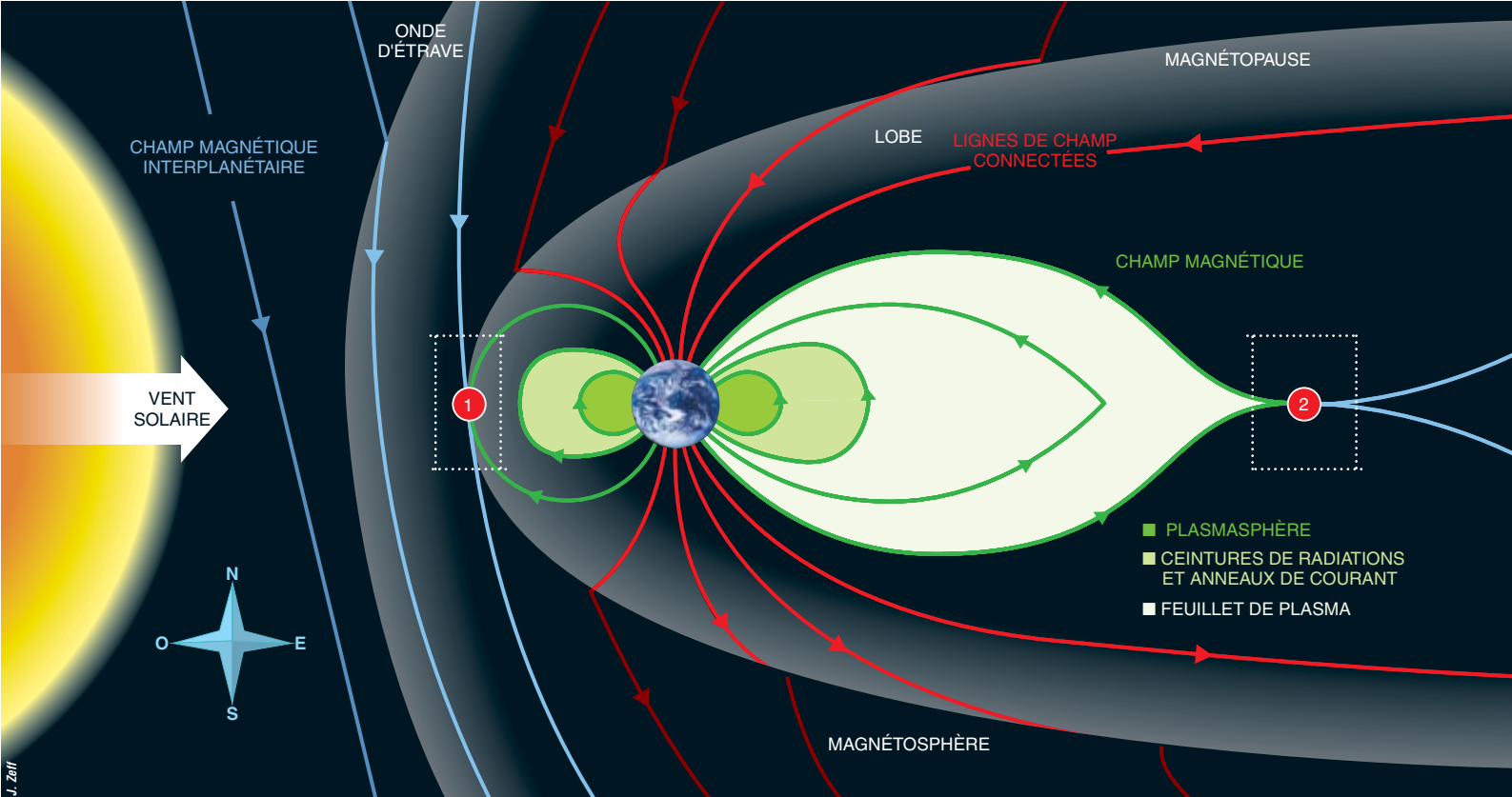
le plasma situé plus en amont, à cause du passage de l'onde de choc.

Les détecteurs des satellites ont montré que les particules chargées autour de la Terre proviennent à la fois du plasma de la magnétogaine (ce sont surtout des protons) et du plasma qui s'écoule de la haute atmosphère aux pôles Nord et Sud (surtout des protons et des ions oxygène). Les proportions de ce mélange varient selon l'état – calme ou perturbé – de la magnétosphère. Pendant les orages magnétiques, des particules chargées bombardent la Terre à des latitudes élevées. Les courants électriques qui en résultent échauffent la haute atmosphère, attirant encore davantage de protons et d'ions oxygène dans la magnétosphère. Ce plasma est stocké, avec celui du vent solaire qui s'est introduit dans la magnétosphère, dans un grand réservoir, le «feuillet de plasma», qui s'étend sur des dizaines de milliers de kilomètres du côté de la Terre qui n'est pas exposé au Soleil. Comment le vent solaire franchit-il la barrière du champ magnétique terrestre et comment modifie-t-il les mouvements du plasma à l'intérieur de la magnétosphère ?

## Les aurores boréales

Selon une hypothèse émise en 1960, la magnétosphère serait fermée et imperméable. Dans ce cas, le vent solaire ne pourrait transférer de l'énergie au plasma qui entoure la Terre que par des mouvements ondulatoires, à la surface de la magnétopause. Ces mouvements seraient produits par interaction visqueuse entre le plasma du vent solaire et le plasma de la magnétosphère, tout comme le vent sur l'eau provoque des vagues. En effet, on observe des ondes dans la magnétopause, mais elles ne semblent pas y être responsables de la circulation à grande échelle, ni des perturbations qui s'y produisent. De telles ondes ne permettraient pas non plus une pénétration suffisante du plasma du vent solaire dans la magnétosphère.

Par conséquent, les ondes de la magnétopause ne semblent pas la principale façon dont le vent solaire perturbe la magnétosphère. Il agirait plutôt par un autre mécanisme, la reconnexion magnétique, proposé par le physicien britannique James Dungey en 1961. Selon lui, les lignes du champ magnétique interplanétaire se connectent par moment aux lignes du champ géomagnétique du côté de la magnétopause



**2. DES PERTURBATIONS DE LA MAGNÉTOSPHÈRE** se produisent quand le champ magnétique interplanétaire porté par le vent solaire s'oriente vers le Sud. Lors d'un phénomène dit de reconnexion, les lignes de ce champ se connectent avec les lignes de force du champ géomagnétique orientées vers le Nord, du côté de la magné-

topause exposé au Soleil (1). De l'énergie et des particules issues du vent solaire se précipitent dans la magnétosphère, en élargissant les lobes Nord et Sud, et réduisent l'épaisseur du feuillet de plasma. Puis les lignes du champ géomagnétique se reconnectent (2), ce qui accélère les ions et les électrons vers la Terre.

topause exposé au Soleil. Cet enchevêtrement des lignes de champ permet le transfert de grandes quantités de plasma du vent solaire vers la magnétosphère.

La reconnexion est plus efficace quand le champ magnétique interplanétaire est dirigé vers le Sud, c'est-à-dire dans la direction opposée à celle du champ magnétique terrestre. Dans de telles circonstances, la reconnexion se produit le long d'une large ceinture équatoriale, ouvrant presque toute la frontière externe de la magnétosphère au vent solaire. Pour d'autres orientations du champ magnétique interplanétaire, la reconnexion a encore lieu, mais elle est localisée à des latitudes plus élevées : l'énergie libérée s'écoule autour de la magnétosphère plutôt que d'y pénétrer.

Le transfert d'énergie magnétique issue du vent solaire change la forme de la magnétosphère. Quand une reconnexion s'amorce du côté de la magnétopause exposé au Soleil, les lignes interconnectées du champ magnétique interplanétaire et celles du champ géomagnétique sont balayées par le vent solaire au-dessus des pôles terrestres, et déversent de l'énergie dans les zones Nord et Sud, nommées lobes, de la longue queue magnétique. Les lobes s'enflent alors sous l'effet de cet apport d'énergie magnétique, tandis

que le feuillet de plasma qui les sépare s'amincit, jusqu'à ce que les lignes de champ des lobes Nord et Sud, dont les directions sont opposées, se touchent et se reconnectent.

Cette seconde reconnexion libère le champ magnétique du vent solaire, qui continue à s'écouler dans le Système solaire. Simultanément, les lignes du champ magnétique de la Terre, qui avaient été étirées en direction de la queue magnétique au moment où les lobes grossissaient, reprennent leur configuration initiale. Ce mouvement brusque des lignes de champ chauffe et accélère les particules du feuillet de plasma, qui sont injectées dans la partie profonde de la magnétosphère (où les lignes de champ sont restées fermées). Certaines des particules qui circulent le long des lignes du champ géomagnétique plongent dans la haute atmosphère au-dessus des pôles de la Terre, entrent en collision avec des atomes d'oxygène et des molécules d'azote, et stimulent l'émission de rayonnements X, ultraviolets, visibles et radio : elles donnent naissance aux aurores boréales. Cette suite d'événements (la reconnexion du côté exposé au Soleil, la reconnexion du côté opposé, puis les aurores boréales) porte le nom de sous-orage magnétosphérique.

Outre le fait qu'elle transfère de l'énergie aux lobes de la queue magnétique, la reconnexion du côté exposé au Soleil intensifie également le champ électrique le long de la queue magnétique. Ce champ augmente à son tour la fuite d'ions et d'électrons du feuillet de plasma vers la magnétosphère profonde. Cet écoulement alimente les ceintures de radiations de la Terre, qui contiennent les particules chargées qui font le tour de la Terre au-dessus de l'équateur entre 6 400 et 38 000 kilomètres d'altitude. Pendant les périodes de reconnexion les plus longues du côté exposé au Soleil (qui se produisent quand l'orientation Sud du champ magnétique interplanétaire perdure), l'écoulement continu de plasma vers la Terre augmente le nombre des particules chargées des ceintures de radiations, ainsi que leur énergie.

## Un mythe s'effondre

Une longue période de champ magnétique interplanétaire orienté vers le Sud entraîne parfois une succession rapide de sous-orages, qui émettent toujours davantage de particules en direction de la Terre. L'orientation du champ magnétique interplanétaire vers le Sud est fréquente, et les sous-orages

magnétosphériques sont fréquents : il s'en produit plusieurs par jour, qui durent deux ou trois heures. En revanche, les orages géomagnétiques aussi importants que celui du 14 juillet 2000 sont très rares. Bien qu'ils surviennent à n'importe quel moment du cycle solaire de 11 ans, ils sont plus fréquents lorsque l'activité solaire est maximale.

Jusqu'au début des années 1990, les astrophysiciens pensaient que les orages géomagnétiques étaient déclenchés par les éruptions solaires, mais, en 1993, John Goslin, du Laboratoire de Los Alamos, mit en doute ce «mythe

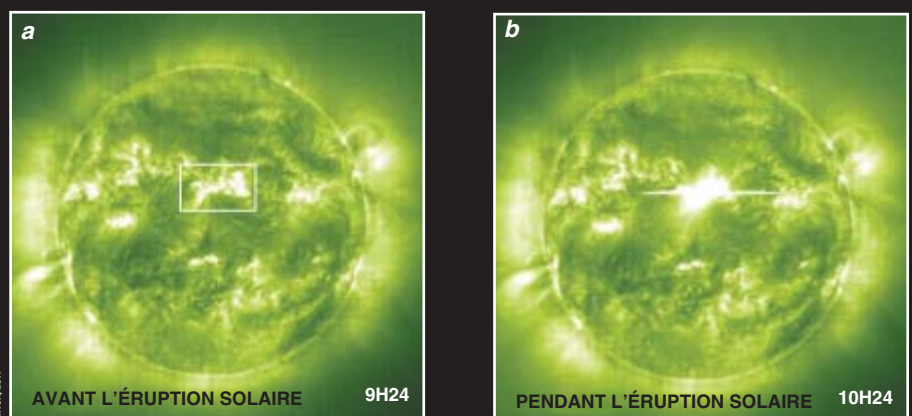
des éruptions solaires». Il montra que les éjections coronales jouent un rôle essentiel dans le déclenchement des orages géomagnétiques les plus violents. On ignore encore la cause de ces violentes éruptions de la couronne solaire, mais elles sont vraisemblablement liées à une reconfiguration des lignes du champ magnétique solaire. Les éjections coronales sont souvent (mais pas toujours) associées à des éruptions solaires.

Toutes les éjections coronales ne déclenchent pas d'orage géomagnétique. La plupart d'entre elles ne se produisent pas en direction de la Terre

et, parmi celles qui le sont, une sur six seulement est assez puissante pour déclencher un orage. Le principal facteur limitant est la vitesse de l'éjection coronale par rapport à celle du vent solaire. Seules les éjections coronales rapides sont susceptibles de déclencher un orage géomagnétique. Quand des éjections coronales rapides se fraient un chemin à travers le vent solaire plus lent, elles créent des ondes de choc interplanétaires. Ces ondes de choc sont responsables de pluies de particules de haute énergie, et des déformations du champ magnétique terrestre. En outre, une éjection

## Le film d'un orage spatial

Une éruption solaire fut l'un des signes avant-coureur de l'orage du 14 juillet 2000. Des images du Soleil, prises par SOHO (*a et b*) montrent la région active (*le cartouche blanc*) avant et pendant l'éruption. À peu près au même moment, le coronographe de SOHO enregistrerait une éjection coronale qui allait bombarder le satellite d'un déluge de protons très rapides, rendant ses instruments momentanément «aveugles» (*c, d et e*). L'onde de choc et l'éjection coronale heurtèrent de plein fouet le champ magnétique terrestre le lendemain, déclenchant les aurores observées par la caméra à large bande spectrale du satellite IMAGE (*en bas*), ainsi qu'une chute brutale de l'intensité du champ géomagnétique à la surface de notre planète. Sur la courbe de l'intensité du champ géomagnétique à la surface de la Terre, la valeur normale est égale à zéro. Pendant tout l'orage, IMAGE enregistra la croissance et la décroissance des courants enregistrés autour de l'équateur (*f*).



14 JUILLET 2000      9:00:00      10:00:00      11:00:00      12:00:00



coronale rapide comprime le vent solaire situé devant elle, et accroît ainsi l'intensité du champ magnétique dans la région comprimée et dans le front de l'éjection coronale. Le champ magnétique enveloppe l'éjection coronale, de sorte que la direction du champ magnétique interplanétaire se rapproche de l'axe Nord-Sud et que la reconnexion est plus importante puisque le champ magnétique interplanétaire se combine au champ magnétique terrestre.

Des orages magnétiques moins violents se produisent durant la phase décroissante de l'activité solaire et à

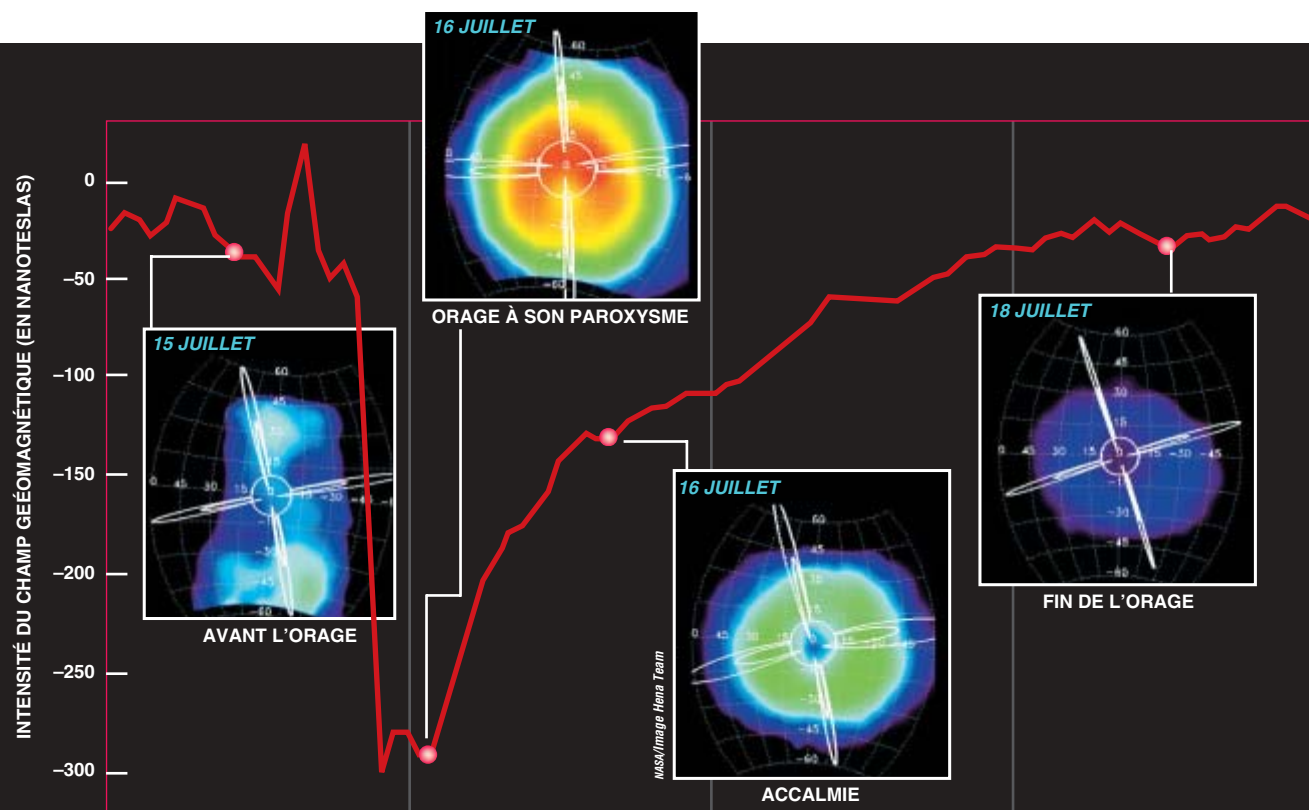
l'approche de son minimum. Bien que les éjections coronales ne soient pas la cause de ces orages récurrents, elles contribuent sans doute à en renforcer l'intensité.

Avec le satellite IMAGE, les astrophysiciens ont obtenu des images globales du déroulement d'un important orage géomagnétique, minute par minute. Le satellite décrit une orbite elliptique polaire, dont l'altitude varie de 1 000 à 46 000 kilomètres, de sorte qu'il observe une bonne partie de la magnétosphère, notamment la magnétopause du côté exposé au Soleil, la partie interne de la queue magnétique et

les régions polaires, les principales «portes d'entrée» dans la magnétosphère des particules du vent solaire.

## En pleine tempête (spatiale)

Le satellite IMAGE observe les plasmas de la magnétosphère de plusieurs façons. Il est équipé de trois caméras qui enregistrent les atomes neutres énergétiques et mesurent, indirectement, les flux d'ions. Quand un ion rapide (un ion oxygène chargé positivement, par exemple) entre en collision avec un atome neutre d'hydrogène de la magnétosphère, il arrache parfois l'électron



World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan

15 JUILLET 2000



unique de l'atome d'hydrogène et se transforme en un atome neutre. Comme cet atome ne porte plus aucune charge, il n'est plus contraint de se déplacer le long des lignes du champ géomagnétique. Au contraire, il se propage en ligne droite à partir de l'endroit où il a été créé. Les caméras d'IMAGE enregistrent le nombre et l'énergie des atomes neutres provenant d'une région donnée, et les astrophysiciens en déduisent la masse, la vitesse, la direction et la densité des ions de cette même région.

Le satellite surveille également les émissions dans l'ultraviolet. Une caméra mesure la densité des ions d'hélium (portant une seule charge) de la plasmasphère – une région de la magnétosphère interne, qui contient un plasma de basse énergie – en détectant le rayonnement ultraviolet que ces atomes absorbent, puis réémettent. Un autre dispositif d'imagerie dans l'ultraviolet lointain est composé de deux instruments (une caméra à large bande spectrale et un spectrographe) pour observer les aurores boréales, ainsi que des photomètres destinés à détecter les émissions

des atomes neutres d'hydrogène. Enfin, un dispositif d'imagerie du plasma par ondes radio envoie des impulsions qui rebondissent sur les nuages de particules chargées. Il fonctionne comme un radar : les signaux radio réémis renseignent sur la direction, la vitesse et la densité des nuages de plasma.

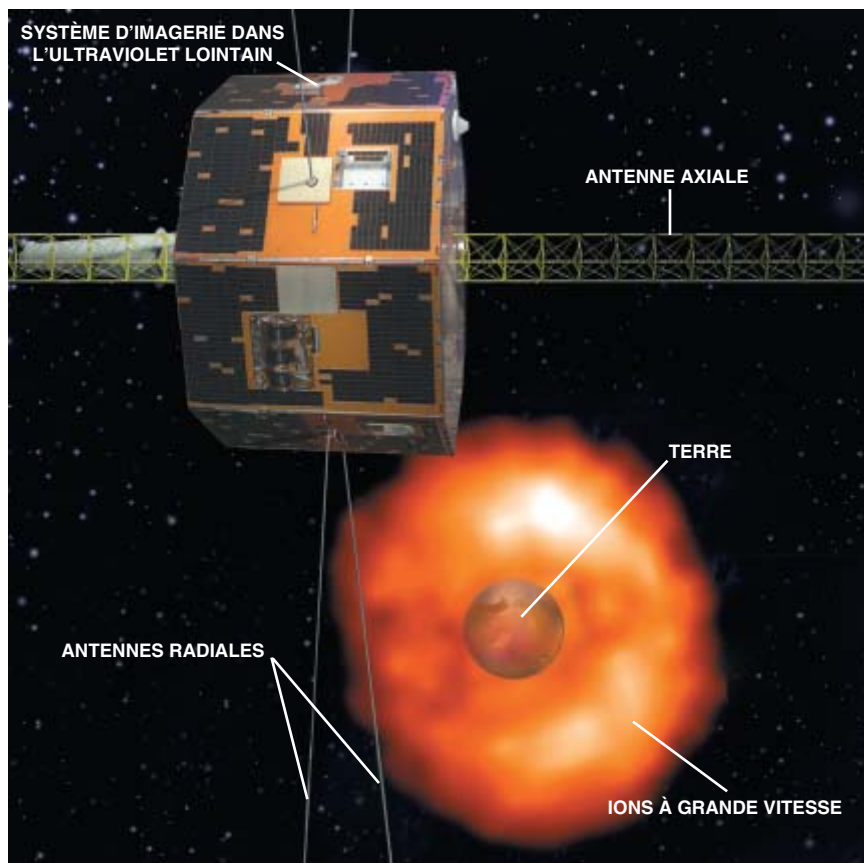
Pendant la tempête du 14 juillet 2000, IMAGE a commencé à enregistrer les effets de la tempête moins de deux minutes après l'arrivée de l'onde de choc de l'éjection coronale sur le champ magnétique de la Terre, qui eut lieu le 15 juillet. La caméra à large bande spectrale a transmis de remarquables clichés de l'aurore boréale déclenchée par la compression du champ (*voir l'encadré des pages 50 et 51*). Un film réalisé à partir de ces images montre l'illumination soudaine et spectaculaire d'un anneau au-dessus de la région arctique (l'ovale auroral), avec des émissions brillantes qui se dirigeaient à toute allure vers le pôle Nord. L'aurore boréale se dissipa moins d'une heure après le début de la tempête, pour reprendre de plus belle avec l'arrivée d'une seconde

onde de choc vers 17 heures (temps universel). De puissants sous-orages suivirent, lors de la libération explosive dans la haute atmosphère de l'énergie emmagasinée dans la queue magnétique. Les sous-orages et les aurores associées ont duré pendant toute la journée du 15 juillet, et la matinée du 16.

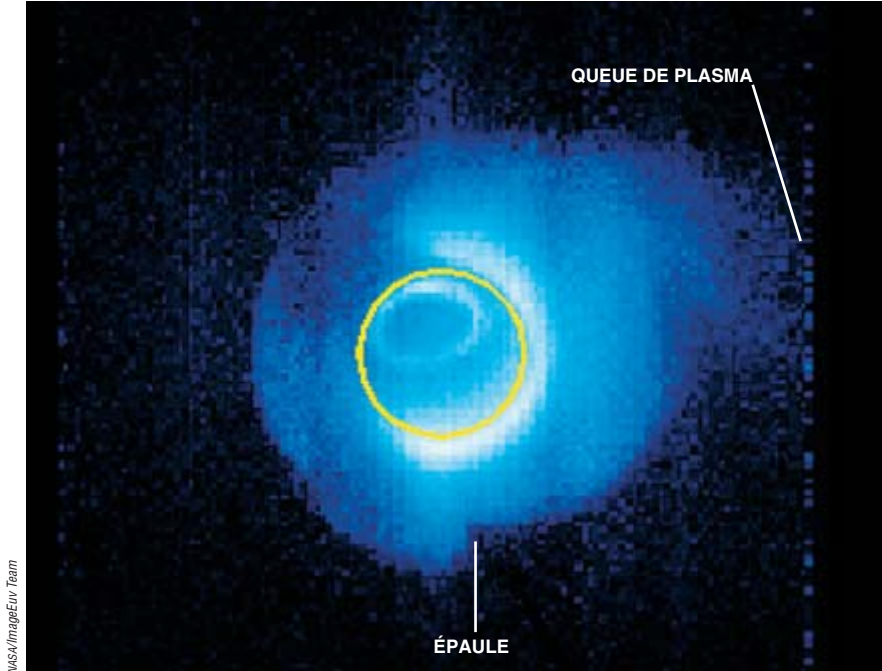
Pendant la phase principale de la tempête, quatre heures après sa naissance, l'intensité du champ magnétique à la surface de la Terre baissa brusquement de 300 nanoteslas par rapport à sa valeur habituelle. Ce phénomène, qui caractérise les orages géomagnétiques, résulte de l'augmentation rapide du courant de l'ovale auroral. Les caméras du satellite IMAGE ont fourni des clichés de ce flux d'ions et d'électrons autour de la Terre à son point culminant, le 16 juillet, puis quand il commençait à décliner. À partir du moment où le transfert d'énergie du vent solaire a commencé à décroître, le flux de plasma vers la magnétosphère interne a ralenti, et l'ovale auroral a perdu des ions plus vite qu'il n'en a reçu de nouveaux. À mesure que le courant s'affaiblissait, le champ magnétique à la surface de la Terre augmentait, mais ne retrouvait sa valeur normale qu'au bout d'un mois.

Les orages géomagnétiques modifient également la forme de la plasmasphère. Les particules de la queue de la magnétosphère se dirigent de plus en plus nombreuses vers la Terre, et érodent la plasmasphère, dont elles entraînent les particules vers le côté de la magnétopause exposé au Soleil. Quand la tempête se calme, la plasmasphère est réalimentée par le flux d'ions issus de la haute atmosphère. Grâce à des modélisations, les astrophysiciens supposent que le matériel issu de l'érosion de la plasmasphère forme une longue queue qui s'étend jusqu'à la face de la magnétopause exposée au Soleil, et qui se perd ensuite dans le vent solaire. Cette hypothèse, émise il y a 30 ans, est désormais confirmée par des images du satellite IMAGE (*voir la figure 3*). Ces images ont aussi révélé des structures inconnues qui soulèvent de nouvelles questions sur les réactions de la plasmasphère aux perturbations magnétosphériques.

Contrairement aux nuages de l'atmosphère terrestre, les nuages de plasma observés par IMAGE sont transparents, et nous manquons de repères pour évaluer leur épaisseur. De nouveaux satellites seront nécessaires pour effectuer des mesures locales dans les



**3. LE SATELLITE IMAGE** est représenté sur cette illustration au-dessus d'un nuage d'ions ultra-rapides en rotation autour de la Terre. Cette image a été obtenue à partir de données recueillies par une des caméras d'IMAGE qui envoie des impulsions radio à partir des antennes du satellite et recueille les signaux retour. L'antenne axiale a une longueur égale à dix mètres et les quatre antennes radiales mesurent 250 mètres. Bien que le satellite ne mesure que 2,25 mètres, l'envergure de ses antennes en fait l'un des plus grands détecteurs jamais envoyés dans l'espace.



**4. LA PLASMASPHÈRE** apparaît comme un nuage bleu clair qui est constitué d'ions (au centre du cercle jaune) et entoure la Terre, sur cette image obtenue grâce au satellite IMAGE pendant un orage géomagnétique d'intensité modérée, le 24 mai 2000. Les résultats ont confirmé l'existence d'une queue de plasma, et ont révélé une structure inattendue que l'on a surnommée l'«épaule».

plasmas, par exemple sur les champs et sur les courants qui commandent leurs mouvements. La prochaine étape de l'observation de la météorologie de l'espace fera intervenir plusieurs satellites en même temps, qui imiteront les avions chasseurs d'ouragans : ils se rendront dans les zones où ont lieu les orages magnétiques.

## Des patrouilles de satellites

L'Agence spatiale européenne conduit déjà une nouvelle mission, nommée *Cluster II*, qui a été lancée pendant l'été 2000 (la mission antérieure, *Cluster I*, avait été détruite par l'explosion de la fusée *Ariane* juste après son lancement, en 1996). *Cluster II* est constituée de quatre sondes identiques et rapprochées, destinées à explorer les plasmas turbulents dans la magnétosphère et dans le vent solaire avoisinant. La NASA projette également le lancement d'une mission de ce type en 2006. Elle étudiera la reconnexion, l'accélération des particules chargées, et la turbulence de la magnétopause du côté exposé au Soleil et en des points précis de la queue magnétique, où prennent naissance les sous-orages.

Les agences spatiales envisagent des missions encore plus ambitieuses, qui utiliseront des constellations de satellites : des dizaines de minuscules engins observeront de larges régions de l'espace, de même que des réseaux de satellites météorologiques surveillent

aujourd'hui les conditions atmosphériques sur la Terre. Les premières constellations auront pour mission de contrôler la magnétosphère interne et la magnétopause du côté exposé au Soleil. Chaque appareil, de la taille d'un ballon, enregistrera les caractéristiques des plasmas et des champs magnétiques.

La magnétosphère terrestre constitue un bouclier protecteur, mais imparfait. Ses champs magnétiques intenses protègent les hommes des rayonnements dangereux émis par le Soleil. Toutefois, ils ne suffisent pas à écarter les ondes de choc les plus puissantes issues du Soleil. Comme la zone des cyclones tropicaux, la magnétosphère est sujette à des orages soudains. Pour cette raison, les guetteurs d'orages, tels le satellite IMAGE et les sondes de *Cluster*, sont indispensables pour surveiller les mouvements des particules chargées, traquer les signes avant-coureurs des orages et les prévoir le plus tôt possible.

---

James BURCH, vice-président de la Division science et ingénierie spatiales de l'Institut de recherche du Sud-Ouest, à San Antonio, au Texas, participe à la mission IMAGE.

S. SUESS et B. TSURUTANI, *From the Sun : auroras, magnetic storms, solar flares, cosmic rays*, in *American Geophysical Union*, 1998.

Sten ODENWALD, *The 23<sup>rd</sup> cycle : learning to live with a stormy star*, Columbia University Press, 2001.

---

# Éruptions solaires et météorologie de l'espace

PIERRE LANTOS • TAHAR AMARI

*Plus les taches solaires sont abondantes dans une région de la surface du Soleil, plus les risques d'une éruption augmentent. La modélisation du champ magnétique solaire à proximité des taches devrait améliorer la fiabilité de la prévision de ces éruptions, qui ont parfois des conséquences néfastes.*

**L**e Soleil, source de vie, libère une énergie considérable dont les effets seraient néfastes pour les organismes vivants s'ils n'étaient atténués au sol par l'atmosphère et par le champ magnétique terrestre. Toutefois, certaines «colères» sont parfois si intenses qu'elles ne sont pas masquées par l'atmosphère.

La surveillance de l'activité solaire n'est pas récente, puisque, dès les années 1920, on émettait, de la Tour Eiffel, des messages d'alerte annonçant les éruptions solaires. Parce que ces éruptions s'accompagnent de perturbations notables du champ magnétique solaire et de l'émission de particules de haute énergie, elles ont des conséquences diverses : elles perturbent la propagation des ondes utilisées dans les télécommunications, elles risquent d'être une source d'erreurs dans le calcul des orbites des satellites, elles représentent un risque, généralement faible, d'irradiation pour les personnes embarquées à bord des avions, ou pour les astronautes, elles perturbent les dispositifs électroniques et, enfin, elles créent des courants induits dans les réseaux de distribution de l'électricité ou les câbles téléphoniques. Rappelons qu'en mars 1989, un orage géomagnétique a été à l'origine de la panne qui a privé le Québec d'électricité pendant plusieurs heures. Souvent mentionné, cet incident reste toutefois un cas unique.

En dehors de l'atmosphère protectrice, aux altitudes où volent les avions et, *a fortiori*, à l'altitude de la station spatiale et des satellites, ces effets ne sont plus négligeables, notamment lorsque le Soleil produit une grande éruption. Si *Concorde* avait volé au-dessus de l'Atlantique durant l'éruption solaire du 23 février 1956, passagers et équipage auraient reçu en une heure la dose d'irradiation autorisée annuellement pour le personnel navigant. Les doses calculées pour le maximum de cette éruption atteignent 3 000 fois celles du rayonnement cosmique habituel. Les vols subsoniques sont-ils mieux protégés, l'atmosphère jouant son rôle d'écran ? Non, parce que le bouclier n'est pas totalement étanche, et que les durées des vols subsoniques sont notablement supérieures à celles d'un *Concorde*. Des procédures spécifiques de sauvegarde

sont prévues sur le *Concorde* en cas d'éruption solaire : des dispositifs enregistrent en permanence la dose de rayonnements qui atteint l'avion. En cas d'éruption solaire, si le débit de dose admis était dépassé, le pilote, immédiatement averti, ferait redescendre l'avion plus profondément dans l'atmosphère, pour augmenter l'épaisseur de l'écran protecteur.

Plus grave encore, si des astronautes avaient été dans l'espace lors de l'éruption du 4 août 1972, qui a eu lieu entre les vols *Apollo 16* et *Apollo 17* vers la Lune, les doses reçues auraient été semblables à celles de l'accident de l'usine de retraitement de l'uranium de Tokaimura, qui eut lieu le 30 septembre 1999 et a fait deux morts et un blessé grave.

Ces éruptions exceptionnelles ont été les plus intenses des 50 dernières années, dans des domaines d'énergie particuliers. Elles illustrent cependant l'intérêt d'une surveillance et d'une prévision des effets de l'activité solaire sur l'environnement de la Terre, car l'activité solaire a des effets de plus en plus notables sur des instruments où l'électronique prédomine. En raison des effets économiques néfastes que peuvent avoir ces éruptions, les astrophysiciens surveillent étroitement l'activité solaire et cherchent à en prévoir les effets sur l'environnement de la Terre. Ils développent la météorologie de l'espace, fondée sur de multiples moyens d'observation et sur une utilisation accrue des capacités de calcul.

## Rayonnements et particules

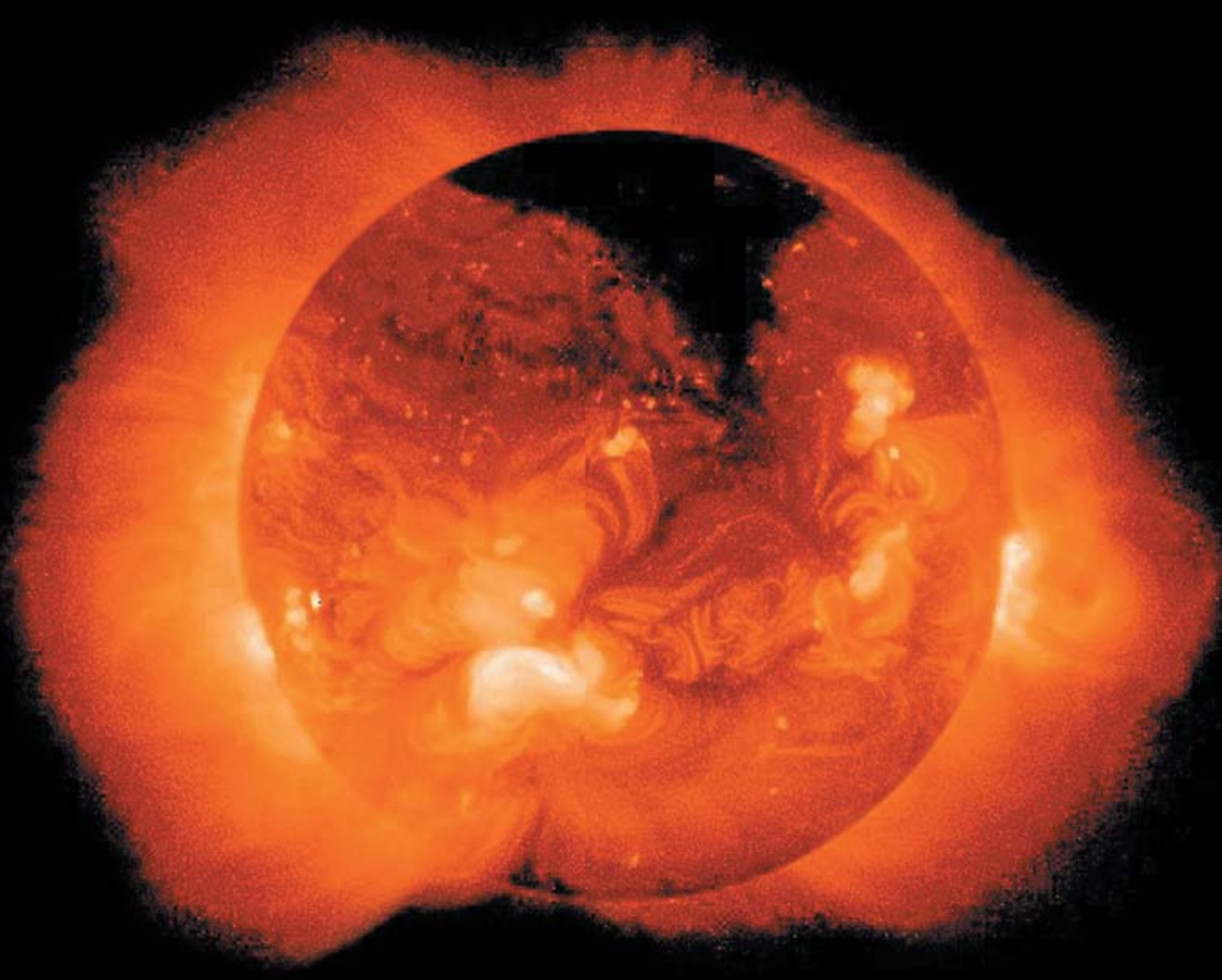
Les éruptions sont très nombreuses puisque l'on en compte une centaine par mois durant la phase de l'activité la plus intense du cycle solaire. Même dans la phase d'activité minimale, on en dénombre quelques dizaines. Cependant, la plupart sont trop faibles pour avoir des effets notables sur la Terre. En moyenne, il n'y a qu'une éruption par mois, durant la phase d'activité maximale, pour déclencher de tels effets. L'activité magnétique solaire, cause des éruptions et des éjections coronales, croît et décroît sur une période de 11 ans, le dernier maximum ayant eu lieu en avril 2000. La couronne est la région la plus externe du Soleil, constituée

d'un plasma d'atomes ionisés peu dense, porté à quelques millions de degrés Kelvin.

Ainsi, une violente éruption s'est produite le 14 juillet 2000, pendant la phase de plus grande activité du Soleil (maximum solaire). L'environnement spatial varie aussi, mais dans une moindre mesure, en fonction de la période de rotation du Soleil, soit 27 jours en moyenne, et en fonction des vents solaires, plus ou moins denses et rapides.

Lors d'une éruption, divers types de rayonnements et de particules sont émis. Ainsi, le flux de rayons X émis peut atteindre des milliers de fois celui que le Soleil émet en l'absence d'éruption. Les ondes électromagnétiques parcourent les 150 millions de kilomètres qui

séparent le Soleil et la Terre en huit minutes. Leur effet ne se fait sentir que sur la face éclairée de la planète. L'absorption du flux des rayonnements X et ultraviolets par l'atmosphère (qui, de ce fait, rappelons-le, nous en protège) se traduit par un échauffement et par une dilatation (les couches basses de l'atmosphère s'échauffent et se dilatent, de sorte que les couches supérieures subissent une compression). Aux altitudes où ils sont en orbite, les satellites subissent un freinage accru, de sorte qu'ils peuvent parfois perdre plusieurs dizaines de mètres d'altitude par jour ; les opérateurs doivent corriger la trajectoire en utilisant, pour les propulser, un gaz embarqué qui est éjecté pour accélérer le satellite et lui faire regagner son orbite



**1. LA COURONNE SOLAIRE** a été photographiée en rayons X par le satellite japonais YOHKOH. Le Soleil est une source permanente de rayons X. Les boucles de champ magnétique les plus brillantes sont situées au-dessus des groupes de taches. Les vents solaires, c'est-à-dire les flux de particules chargées, notamment des protons et des noyaux, émis de ces régions de boucles, sont lents (350 kilomètres par seconde). En revanche, les vents solaires

issus de la région sombre sont rapides (700 kilomètres par seconde). Cette région émet très peu de rayons X : c'est un trou coronal qui déclenche des orages géomagnétiques récurrents plus facilement prévisibles que ceux que déclenchent les éjections coronales. Ces orages créent, comme les précédents, des pannes à bord des satellites. Les astrophysiciens les étudient pour en améliorer la prévision.

d'origine. Ainsi, l'activité solaire est un paramètre important de la durée de vie des satellites en orbite basse. Elle est aussi à prendre en compte lors de la rentrée dans l'atmosphère des satellites importants, même lorsque le retour du satellite est contrôlé, comme cela a été le cas récemment pour la station *Mir*. En effet, les débris non brûlés dans l'atmosphère peuvent être dangereux s'ils tombent sur des régions habitées, et une éruption importante peut modifier le point d'impact de débris qui redescendent sur la Terre.

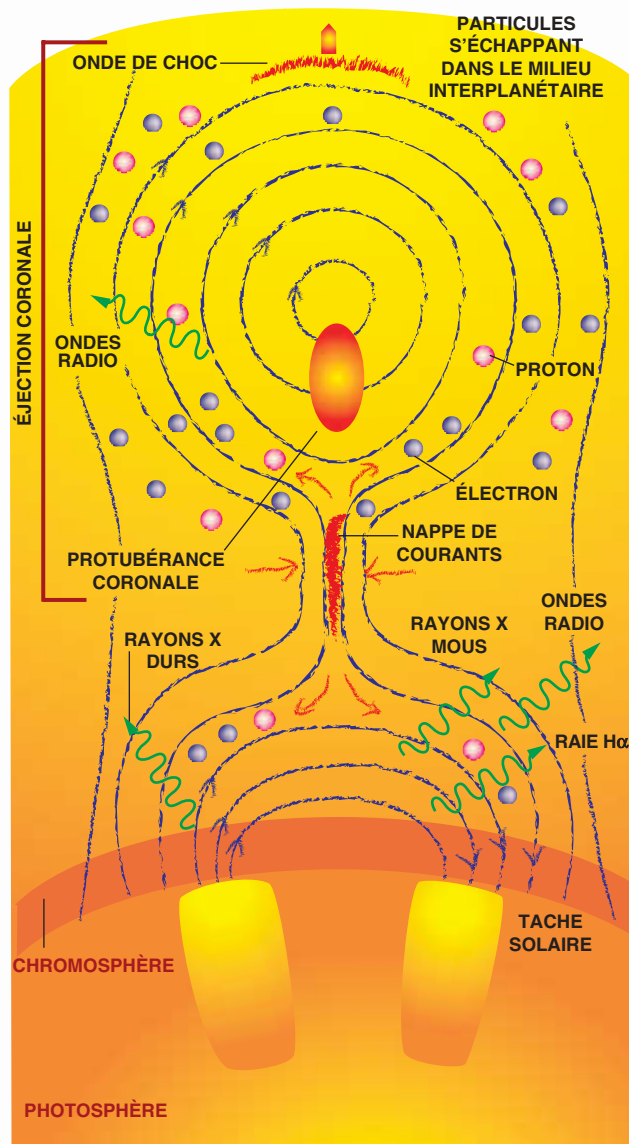
Les rayons ultraviolets ont aussi la propriété d'ioniser l'atmosphère terrestre dans la région située entre 80 et 1 000 kilomètres d'altitude, l'ionosphère. Des électrons sont libérés, changeant les conditions de propagation et de réflexion

des ondes radio émises du sol ou par les satellites. Les ondes décamétriques utilisées pour les liaisons ondes courtes ont besoin de se réfléchir sur l'ionosphère terrestre pour se propager à longue distance. Une forte éruption peut totalement empêcher leur propagation autour du Globe et couper durant plusieurs heures les liaisons radio à grande distance, utilisées notamment dans les communications entre les avions et les centres de contrôle ; les avions se trouvent isolés et ne peuvent avoir de contact avec les autres avions que s'ils sont en vue directe. À plus courtes longueurs d'onde, les liaisons provenant des satellites ne sont pas interrompues, mais elles peuvent être perturbées, faussant par exemple les positions mesurées par les systèmes de localisation, tel le GPS (*Glo-*

*bal Positionning System*, système global de localisation).

Lors d'une éruption importante, outre les rayons X et les rayons ultraviolets, le Soleil éjecte des particules accélérées qui sont principalement des protons et des noyaux d'atomes ionisés. Se déplaçant à une vitesse de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière (100 000 kilomètres par seconde), la majorité d'entre elles arrivent sur la Terre quelques dizaines de minutes après les rayonnements ultraviolets et X. Comme ces particules sont électriquement chargées, elles suivent les lignes du champ magnétique interplanétaire et se heurtent au champ magnétique terrestre qui, comme l'atmosphère, nous protège en jouant le rôle d'un bouclier magnétique. Le bouclier étant moins

## Les éruptions solaires



Ce sont les champs magnétiques coronaux dont on a schématisé ci-contre la structure qui sont responsables des éruptions. Le cœur de l'éruption, où l'énergie est libérée, est une nappe de courants électriques située dans la couronne. C'est là que les champs magnétiques se restructurent, que l'énergie est dissipée et que les particules sont accélérées. C'est dans cette nappe de courants que se fait la reconnexion des lignes de champ magnétique. Certaines particules partent vers le bas, entrent en collision avec les couches plus denses de l'atmosphère solaire, et émettent des rayonnements X et radio ; quand l'éruption est violente, l'émission a également lieu en lumière blanche et dans le domaine des rayonnements gamma ; c'est également dans cette région que la raie alpha de l'hydrogène, que l'on détecte dans le spectre de cet élément, est émise.

Dans les pieds des boucles, les électrons accélérés donnent lieu aux émissions des rayonnements X durs par interaction avec le plasma et le champ magnétique, tandis que les protons émettent des rayons gamma par collision avec les noyaux des atomes du milieu. La chromosphère est chauffée par les particules qui l'atteignent et par le flux de conduction venant de la couronne.

D'autres particules se dirigent vers le haut en suivant les lignes du champ magnétique. Quand celui-ci est ouvert sur le milieu interplanétaire, les particules emplissent rapidement le Système solaire interne, atteignent la Terre en quelques heures, et mettent plusieurs jours à se disperser.

Au-dessus de la nappe de courants électriques, se situe la partie haute de l'éruption accompagnée de la déstabilisation d'une protubérance solaire. Boucles magnétiques, protubérance et onde de choc montent de concert. La partie haute, lorsqu'elle est éjectée dans l'espace, est nommée éjection coronale. Quand les vitesses sont suffisantes, une onde de choc se forme en amont de l'éjection. Les électrons accélérés déclenchent des sursauts radio-électriques qui sont à des longueurs d'onde métriques.

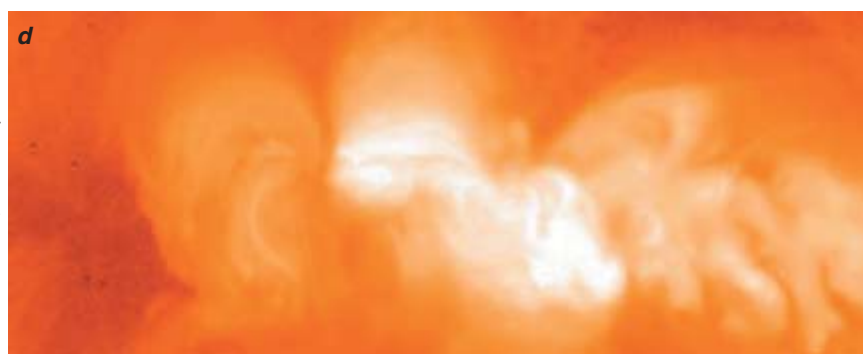
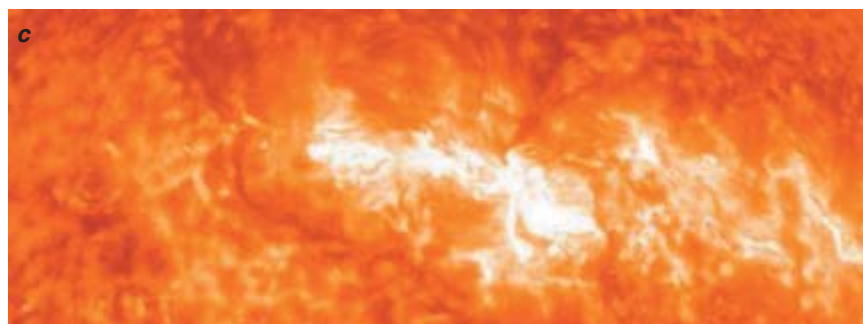
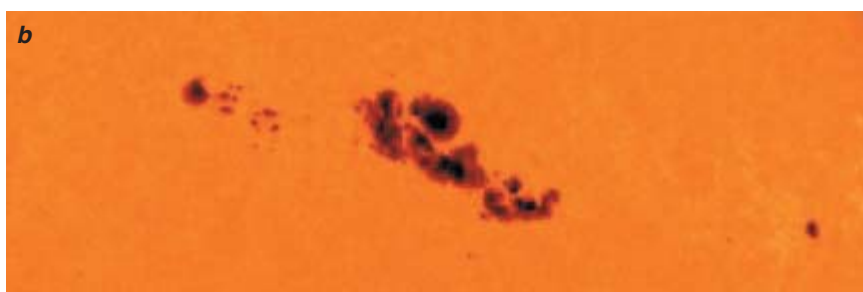
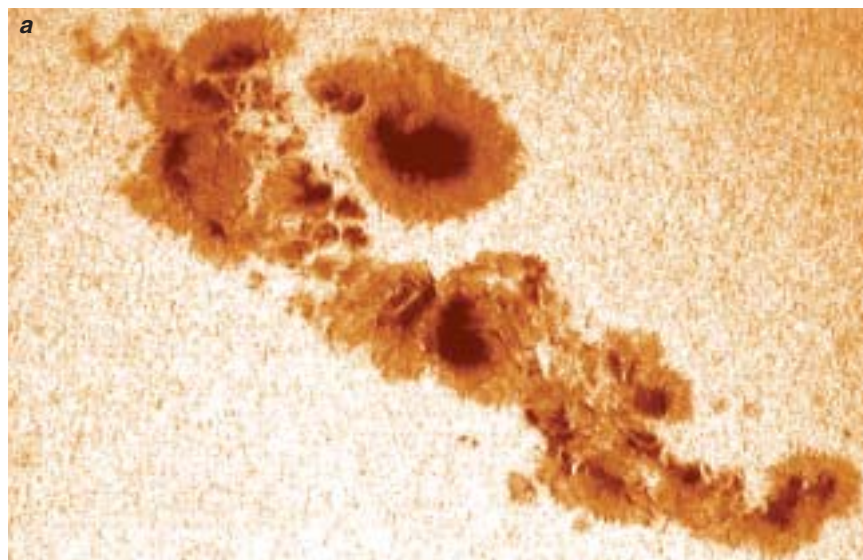
Quand une protubérance coronale est éjectée loin des taches, la partie basse de l'éruption n'est pas nécessairement observée et l'éjection coronale qui s'accompagne d'une émission de rayons X et éventuellement de particules accélérées, est le seul signal que nous recevons de l'éruption.

efficace aux pôles, les particules solaires pénètrent plus aisément dans les régions polaires. Les doses reçues à bord des avions ou des stations spatiales (la station internationale est en orbite basse, à 400 kilomètres de la Terre), ne sont notablement accrues en cas d'éruption solaire que pour les hautes latitudes.

Les méfaits ne sont pas seulement biologiques : une partie de l'électronique embarquée à bord des satellites, tels les microprocesseurs, subit des interactions qui peuvent non seulement être la source d'erreurs de calcul, mais aussi endommager les circuits. La dimension des composants diminue à mesure que leur nombre augmente (d'un facteur dix tous les sept ans), les rendant toujours plus sensibles aux rayonnements. De plus, le coût des composants spéciaux (qui résistent aux rayonnements) étant important, les industriels cherchent à en diminuer le nombre. Lors des lancements de satellites, des éléments essentiels à la réussite du tir et de la mise en place du satellite, tels que la centrale d'inertie du lanceur et les capteurs solaires et stellaires, peuvent être perturbés par les particules énergétiques issues des éruptions.

En ce qui concerne les avions, qui dépendent aujourd'hui de l'électronique embarquée, les constructeurs se préoccupent aussi des effets néfastes des particules solaires sur les microprocesseurs et sur leurs mémoires numériques. Au sol, en cas de très grande éruption, des effets néfastes sur les ordinateurs ne sont plus à exclure en raison de la miniaturisation des composants électroniques.

Une troisième source de perturbation de l'environnement par le Soleil est due aux éjections coronales qui accompagnent fréquemment les éruptions. Le nuage de plasma éjecté perturbe le vent solaire, un flux permanent de particules beaucoup moins rapides que celles évoquées précédemment. L'éjection coronale parcourt la distance Soleil-Terre en quelques jours et déclenche les orages géomagnétiques et les aurores polaires. Cette matière éjectée de la couronne n'est pas nécessairement liée à des phénomènes éruptifs visibles dans le domaine optique. Quand leur vitesse est suffisante, ces nuages sont précédés d'une onde de choc capable, elle aussi, d'accélérer des particules (voir l'article Éjections coronales et tempêtes spatiales, par James Burch, page 46).



SOHO-MIDJET Consortiums. YOHKOH/SXT Project

**2. CERTAINS GROUPES DE TACHES SOLAIRES** (a) sont le signe avant-coureur d'une éruption solaire. Ce groupe (repris sur la photographie b) a été photographié le 29 mars 2001, quelques jours avant l'éruption importante du 2 avril. Sur la photographie en rayonnement visible émis par la photosphère (b), les taches apparaissent en noir. La photographie du rayonnement ultraviolet (c) émis par des couches supérieures de l'atmosphère solaire (la chromosphère et la région de transition avec la couronne, à quelques centaines de milliers de degrés) a été prise par le satellite européen SOHO ; on y observe les boucles de champ magnétique à moyenne échelle qui surplombent les taches. Enfin la photographie en rayons X (d) a été prise par le satellite japonais YOHKOH ; elle montre les structures des boucles de plasma (à quelques millions de degrés) qui circulent au-dessus du groupe de taches, à plus grande échelle (les photographies b, c et d ont été prises exactement sur la même région).

## Structure et dynamique du champ magnétique solaire : la magnétohydrodynamique

**C**omme on ne connaît pas précisément la structure du champ magnétique de la couronne solaire, où les éruptions se déclenchent, on la modélise à partir des données enregistrées dans la photosphère. Selon les hypothèses de calcul, on obtient des modélisations plus ou moins précises.

Les tubes de champ magnétique issus de la zone interne de convection, sont comprimés et malmenés par le fluide turbulent qui circule dans le Soleil. Les mouvements internes les font remonter vers la surface d'où ils émergent dès qu'une instabilité leur en donne l'occasion. Ces tubes de champ magnétique apportent avec eux du flux magnétique dans une région où des taches solaires sont déjà présentes, ou bien ils créent des taches solaires dans une région qui en était auparavant dépourvue : ces dernières sont les traces observables des tubes de champ magnétique.

Ces tubes de champ magnétique véhiculent des courants électriques importants ; ils percent la photosphère, et débouchent dans le milieu externe très dilué, où ils occupent tout l'espace offert. Les mouvements de la photosphère exercent des contraintes sur le champ magnétique, notamment aux pieds des lignes de champs qui subissent des forces de cisaillement et de torsion. À chaque instant, le champ magnétique tente de trouver un état d'équilibre compatible avec ces diverses contraintes, et accumule également de l'énergie d'origine mécanique. Comment cette évolution aboutit-elle au déclenchement d'un phénomène éruptif violent ?

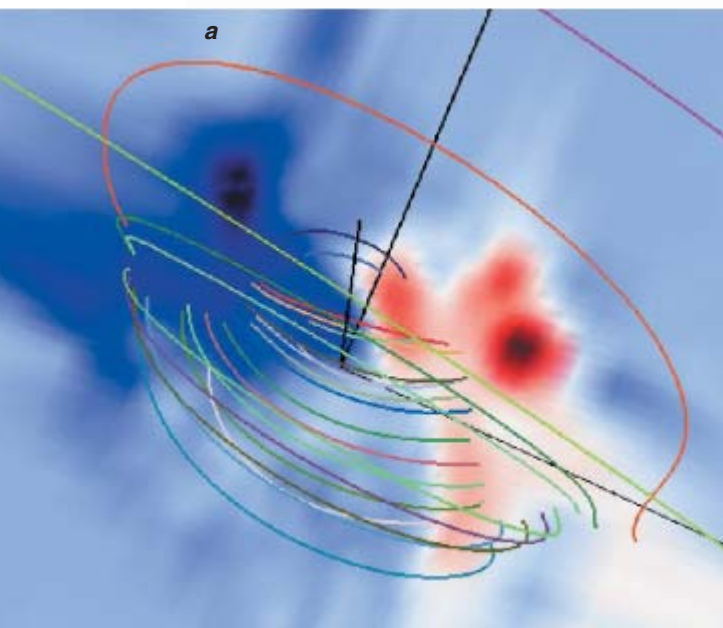
Pour caractériser la phase prééruptive dans les modélisations les plus simples, les astrophysiciens négligent le courant électrique et les composantes du champ magnétique contenues dans le plan de la surface du Soleil. On simule le champ magnétique uniquement par sa composante dirigée vers l'observateur. On obtient alors une

configuration magnétique simple (voir la figure a), dont l'énergie minimale ne peut expliquer l'énergie pourtant libérée dans une éruption.

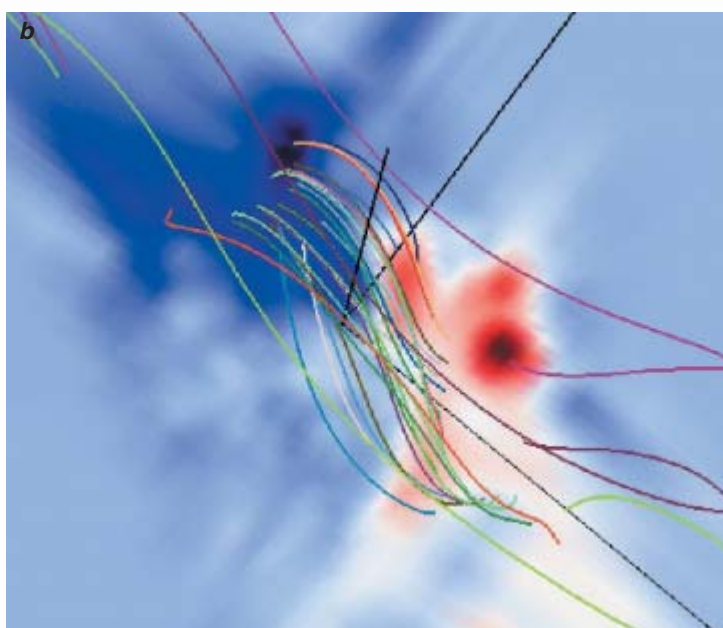
Le perfectionnement suivant consiste à considérer les trois composantes du champ magnétique à la surface du Soleil, qui apportent avec elles le courant électrique débité par la photosphère (la région qui produit la quasi-totalité du rayonnement visible). On obtient ainsi une meilleure approximation des lignes de champ (voir la figure b) qui s'étirent d'une tache (la rouge) à une autre (la bleue). Ces lignes de champ, plus élaborées, porteuses du courant, ont une forme de S, dont la réalité est confirmée par l'observation de l'émission des rayonnements X des régions qui ont donné de grosses éruptions : les images de ces émissions X ont la même forme en S que les lignes de champ, et elles coïncident. Contrairement au modèle précédent, ce dernier permet l'évaluation du réservoir énergétique de la configuration.

**C**es modélisations offrent des modèles statiques plus ou moins élaborés du champ magnétique solaire avant une éruption. Or l'enjeu reste de trouver des modèles prévisionnels, de découvrir une configuration particulière du champ qui annoncerait de façon fiable qu'une éruption de telle intensité aura lieu à tel endroit, à tel moment. Pour améliorer la fiabilité des prévisions et élaborer un modèle dynamique, un des paramètres introduits est le champ électrique, négligé dans les modèles précédents. Dans ce nouveau modèle, la magnétohydrodynamique, on applique la mécanique des fluides électriquement conducteurs à l'évolution du champ magnétique solaire.

Dans ce cadre, les astrophysiciens ont tenté de simuler l'évolution du champ magnétique solaire en imposant à diverses configura-



Le champ magnétique solaire est modélisé de diverses façons. La plus simple (a) correspond à une absence de courant électrique et à une énergie minimale. Les lignes de champ partent de la tache rouge pour se diriger vers la bleue (le champ est modélisé seulement par sa composante dirigée vers la Terre). Quand on affine le modèle en tenant compte des trois composantes du champ magnétique à la surface du Soleil, les lignes de champ prennent la forme d'un S (b). L'approxi-



mation des lignes de champ qui courent d'une tache à l'autre, à un instant donné, est meilleure. On améliore encore le modèle en considérant non plus la modélisation statique des lignes de champ, mais leur évolution dynamique. Avant une éruption, on constate la présence de boucles de lignes de champ qui relient deux taches et également d'un tube de flux magnétique spiralé (c). Quand se produisent des perturbations de cet état en équilibre instable, l'énergie magnétique

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.

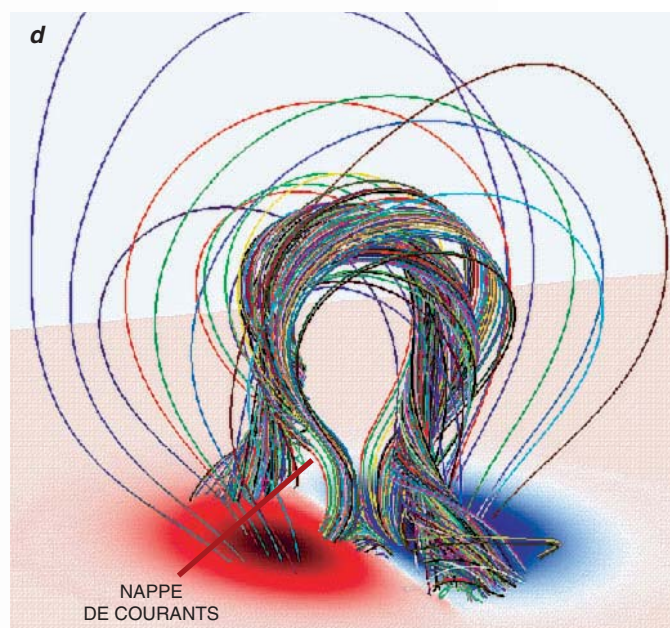
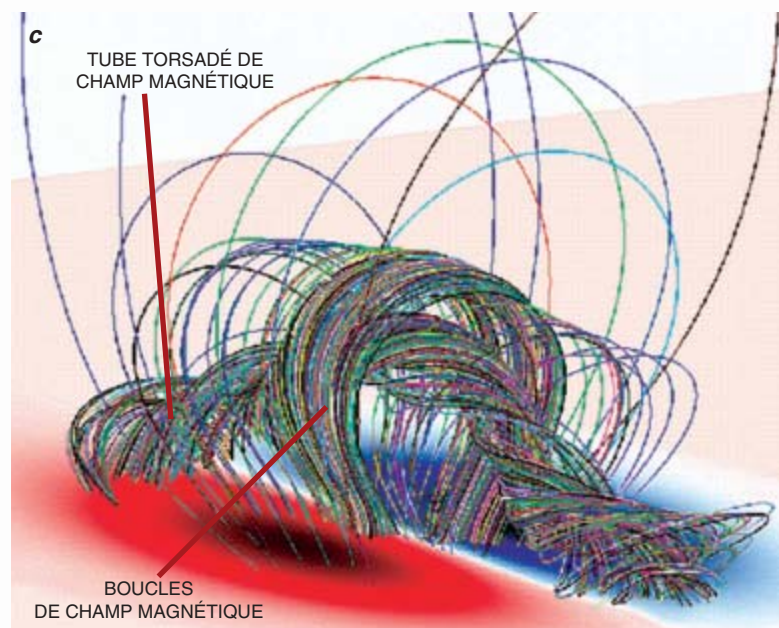
Alors, l'un des auteurs (Tahar Amari) et Jean-François Luciani du Centre de physique théorique de l'École Polytechnique, avec Zoran Mikic et Jon Linker, à San Diego, ont eu l'idée de prendre en compte les modifications du flux magnétique solaire observées au cours de l'évolution d'une région active. 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.

**D**ans 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.

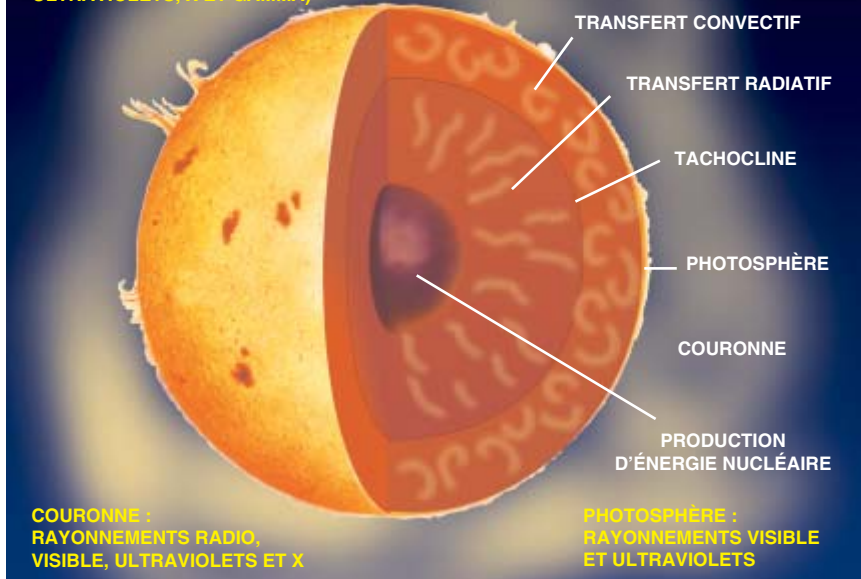
Cette fusion des deux systèmes de champ permet la libération d'énergie magnétique au profit d'une conversion en énergie cinétique et en chaleur. La protubérance est brusquement libérée, et se sépare à l'endroit du rétrécissement des boucles, où les lignes de champ de sens opposés se touchent, en créant 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

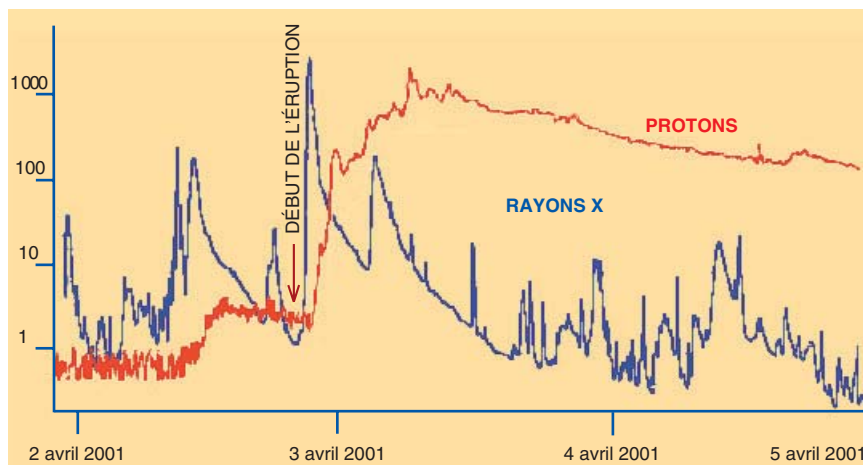
proposées. Elles diffèrent surtout par les hypothèses faites pour le calcul.

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.

