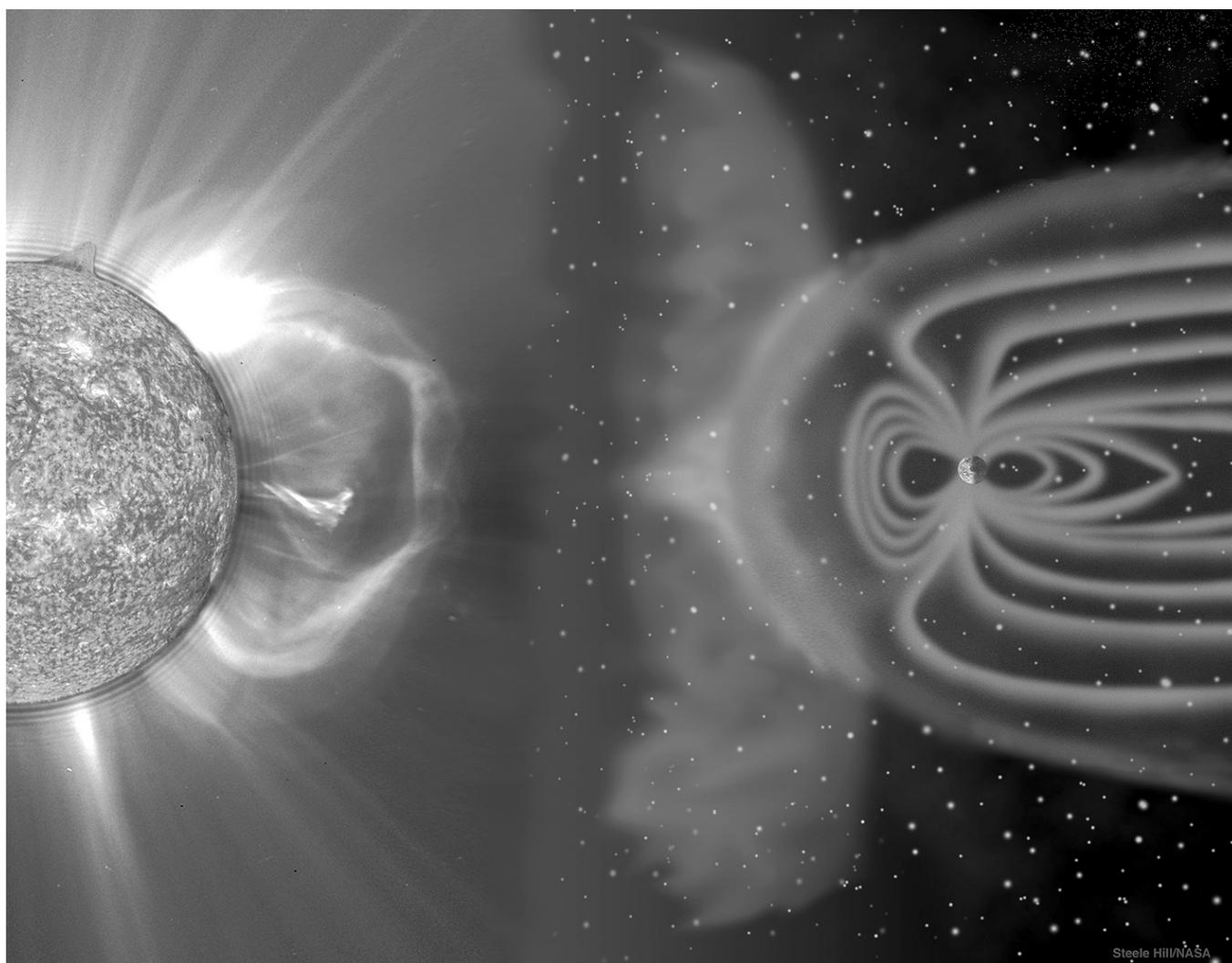


Soho et Cluster : voyage au cœur des relations Soleil-Terre

Philippe Jamet



Steele Hill/NASA

Grâce à Soho et Cluster, l'Europe est en pointe dans l'étude des relations Soleil-Terre. La combinaison de ces cinq sondes nous a véritablement permis de percer certains mystères et mis en évidence des phénomènes insoupçonnés jusqu'alors. Après un aperçu des différentes missions d'étude de notre étoile, intégrées dans l'International Solar-Terrestrial Physics, nous décrivons les résultats exceptionnels de Soho et Cluster.

Toute une chaîne d'interactions complexes et de divers processus à une échelle gigantesque prend naissance au cœur du Soleil, là où la température s'élève à 15 millions de K et la pression à plusieurs milliards d'atmosphères. Tout en voyant transformés leurs niveaux d'énergie à partir de la zone convective, de nouveaux processus sont déclenchés lors de leur voyage à travers les couches supérieures du Soleil, emportant avec eux matière et rayonnement. Ce mécanisme évolutif se propage vers les différentes couches de l'atmosphère solaire, à savoir la photosphère (d'où est émis le rayonnement visible), la chromosphère et la couronne, la partie la plus extérieure qui est paradoxalement d'une température plus élevée que les couches inférieures puisqu'elle atteint 2 millions de K avec un gaz très ionisé mais ténu.

Pour prévoir certains événements à l'avance, il nous est indispensable de voir à l'intérieur du Soleil ce qui se passe sur sa face cachée. En effet, on a découvert que des mécanismes complexes s'y déroulent fonctionnant comme des phares émettant en UV, et signalent à l'avance leur activité en se déplaçant avec la rotation de 25,38 jours terrestres du Soleil sur lui-même. Outre l'émis-

sion de chaleur, de rayonnements radio et visible, de rayonnements X et UV variables et liés à certains mécanismes se situant sous la surface solaire, l'activité la plus notable du Soleil consiste en l'émission d'un puissant vent magnétique solaire principalement issu des trous coronaires. La vitesse de ce vent est variable (400 à 700 km/s) selon que l'on se trouve près des régions tropicales et équatoriales ou au niveau des pôles, où les lignes de force du champ magnétique solaire sont moins resserrées. Ceci est l'un des principaux acquis de la sonde polaire solaire européenne Ulysse, à participation américaine, qui fut lancée le 6 octobre 1990. Celle-ci avait pour objectifs d'identifier l'origine de ce vent solaire et d'ausculter les pôles de notre étoile après avoir effectué une manœuvre de sortie du plan de l'écliptique, en utilisant la technique du « levier gravitationnel » à partir de la planète Jupiter. Ce vent solaire magnétique, dans le cadre de processus cataclysmiques, pourrait même atteindre la vitesse de 2 000 km/s, selon le physicien de l'ESAV, Domingo, et son accélération stupéfiante fait penser à un vortex rugissant se ruant sur les magnétosphères des planètes (champs magnétiques planétaires) qu'il bombarde de protons, d'ions et d'électrons, de rayonnement X et UV, de rayonnement radio. Il faut ajouter à cela une forte onde de choc qui, dans le cas de la magnétosphère terrestre, aplatit celle-ci du côté où elle est exposée au Soleil à la manière d'un gigantesque coup de poing invisible et crée des pénétrations dans cette magnétosphère, à la fois au niveau des cornets polaires et de l'onde de choc frontale. A ces endroits, la magnétosphère laisse passer de petites quantités de vent solaire, à la manière d'une cloison qui se fissure, en provoquant les fameuses aurores boréales, les orages magnétiques et aussi les sous-orages magnétosphériques appelés « perturbations élémentaires de Birkeland », ainsi que d'autres phénomènes collatéraux.

Ces phénomènes peuvent occasionner des dégâts aux composants des satellites, provoquer des surtensions des lignes électriques (cas du Québec et de New York en 1989) et avoir sans doute aussi des conséquences sur le climat et la couche d'ozone, comme le laisseraient



L'activité du Soleil peut, par exemple, provoquer des orages magnétiques entraînant des surtensions des lignes électriques.

penser certaines données obtenues par le satellite américain Sampex. Cela semblerait confirmer les théories non catastrophistes d'Herbert Mataré, un fervent partisan de la conquête de l'espace, qui dirige à Los Angeles une entreprise fabriquant des tubes à ondes progressives, des magnétrons et des klystrons. Ces phénomènes, conséquences de l'action du vent solaire en période de Soleil actif, sont encore amplifiés lors des éruptions chromosphériques (prenant naissance au niveau de la chromosphère) et des éjections coronales dont le mécanisme n'est pour l'instant que partiellement compris, malgré l'apport de satellites comme Soho (Solar Heliospheric Observatory) et TRACE (Transition Region Coronal Explorer) lancé en 1998.

Notre étoile sous haute surveillance

Pour mieux connaître et modéliser l'ensemble de ces phénomènes et leurs interactions, il est indispensable d'installer des observatoires sophistiqués à longue durée de vie pour suivre les processus de-

puis leur début, au cœur du Soleil, jusqu'au milieu interplanétaire et à son champ magnétique ainsi qu'aux confins des diverses magnétosphères planétaires. La magnétosphère de la Terre, beaucoup plus importante que celle des autres planètes, nous fournit non seulement notre atmosphère mais aussi un véritable « cocon » de protection contre les radiations du milieu extérieur. Celle de Jupiter est toutefois encore plus conséquente que la nôtre et si elle était visible à partir de l'orbite terrestre, elle remplirait une surface apparente égale à celle de la pleine Lune.

Etant donné que nous sommes directement concernés, l'étude des phénomènes solaires qui perturbent notre magnétosphère revêt une priorité. Quand elle correspond à la nécessité de répondre à des questions d'extrême importance, la recherche scientifique pure offre souvent l'occasion de lancer des programmes communs ambitieux ou de fédérer des programmes nationaux, surtout dans les domaines où la recherche impose des échanges d'informations. C'est à ce type de démarche que correspondent jusqu'à présent toutes les missions spatiales relatives à l'étude approfondie du Soleil et de ses couches atmosphériques, ainsi que les missions visant à étudier la magnétosphère terrestre et ses interactions avec le vent solaire. Les sondes Soho et Cluster, par exemple, étaient parties intégrantes du programme international l'ISTP (International Solar-Terrestrial Physics), résultat d'un accord conclu en septembre 1983 entre l'ESA, la NASA et l'agence spatiale scientifique japonaise ISAS, étendu par la suite à l'agence soviétique IKI. Les principaux objectifs scientifiques de l'ISTP étaient les suivants : physique du Soleil et de l'héliosphère, physique de l'espace circumterrestre, interactions Terre-Soleil et physique des plasmas.

L'ISTP s'articulait sur les missions suivantes :

- Wind (NASA). Lancée le 1^{er} novembre 1994 par une fusée Delta-2, cette sonde a été placée sur une orbite elliptique inhabituelle avec un périhélie de 29 939 km et un apogée de 1,6 million de kilomètres. Son trajet l'a souvent conduite du côté de l'onde de choc mais dans le plan de l'écliptique, afin de mesurer les paramètres du vent solaire au

moment de sa rencontre avec la magnétosphère terrestre. Au cours de sa phase de transfert vers son apogée, Wind a aussi exploré la queue magnétosphérique qui se forme du côté de la Terre non exposé au front de l'onde de choc. Cette sonde a embarqué huit instruments (cinq américains, deux français et un russe) et sa mission a été conçue comme complémentaire à la sonde Ulysse du programme international ISPN (qui prévoyait au départ, outre Ulysse, une sonde américaine qui fut abandonnée) ainsi qu'à la sonde japonaise EXOS-D de l'ISAS, consacrée à l'étude de la magnétosphère dans les régions polaires.

- Polar (NASA). Ce satellite, lancé en 1995, a étudié en profondeur la phase d'arrivée du vent solaire au niveau de l'orbite de la Terre et réalisé la première cartographie, depuis une orbite polaire, de l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre. Polar, qui emportait avec lui une grande quantité de propergols, a effectué un certain nombre de voyages au sein de la magnétosphère jusqu'à 8,5 rayons terrestres. Il a notamment examiné en son cœur le feuillet neutre et la plasmasphère, une zone marquant la transition entre les diverses composantes de la queue magnétosphérique.

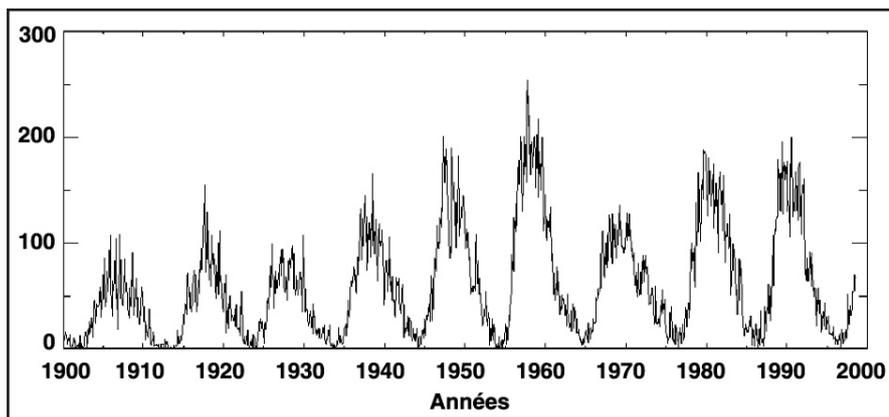
- Geotail (ISAS). Cette sonde de 1 008 kg, conçue pour l'étude de la queue magnétosphérique, a été lancée en juillet 1992 par une fusée américaine Delta-2. Lors de ses deux premières années de fonctionnement, Geotail a exploré la queue magnétosphérique jusqu'à la distance lointaine de 250 rayons terrestres. Durant cette phase de sa mission, Geotail a utilisé un mode original de cadrage pour ses manœuvres, en faisant appel à la gravité de la Lune en mode « *swingby* », pour être ramenée vers la queue magnétosphérique quand la sonde en était éjectée par le vent solaire. Geotail a permis de mieux comprendre la structure et la dynamique de la queue géomagnétique ainsi que l'interface de celle-ci avec les processus de transfert de particules causés par le vent solaire. Sur Geotail, deux tiers des instruments étaient japonais et un tiers était américain. Jusqu'à présent, cette mission reste unique en son genre.

- Regatta (IKI). Ces sondes consistaient en deux engins différents

dont la conception avait quelques similitudes avec Cluster. La chute de l'Union soviétique fit revoir le programme à la baisse et celui-ci fut remplacé par le projet Interball. Interball-1 a été lancé en 1995 et Interball-2 en 1996, dans le but de travailler en concomitance et d'observer simultanément les mêmes endroits de l'onde de choc et de la magnétosphère. Les deux sondes emportaient chacune quatre instruments français (Electron, Hyperboloid, Ion et Memo).

- Soho et Cluster (ESA). Derniers membres de l'ISTP, ces deux missions nous intéressent particulièrement car c'est ce que l'on a fait de mieux à la fois pour l'observation du Soleil et celle de l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre.

Nous devons également mentionner l'apport de deux satellites japonais. D'abord, Hinotori, lancé en 1981 par un lanceur M-3S-2 de l'ISAS, en pleine année d'activité solaire à son pic maximum. Ce satellite a effectué des observations en deux dimensions d'images de rayons X durs et de particules solaires émises lors d'éruptions solaires. Ensuite, Yokkoh, au bilan très supérieur à Hinotori, a été lancé en août 1991, lui aussi en plein pic maximum de l'activité solaire qui suit un cycle variant de 9,8 à 11,1 ans découvert par l'astronome amateur allemand Schwabe. D'un poids de 420 kg pour une apogée de 600 km et un périhélie de 550 km, Yokkoh a été programmé pour étudier les phénomènes de haute énergie caractéristiques de la surface solaire (photosphère et chromosphère). Ce satellite était équipé de quatre systèmes imageurs de rayons X à très haute résolution, dont un était spécifiquement conçu pour les rayons X basse énergie et un autre pour la détection des éruptions solaires. Les Américains et les Britanniques participaient à cette mission que les Japonais ont en vénération. En effet, ces derniers considèrent que Yokkoh, en étudiant l'évolution du Soleil sur la totalité d'un cycle d'activité, a pu percer les secrets de la couronne solaire, notamment sa température anormalement élevée qui semble due à des phénomènes magnétohydrodynamiques (MHD) et à un transport d'énergie de la part du champ magnétique solaire jusqu'à cette couronne.



L'activité solaire suit un cycle variant de 9,8 à 11,1 ans découvert par l'astronome amateur allemand Schwabe.

Dans cette surveillance des effets du Soleil, l'apport des satellites américains GOES (Geostationary Operational Environment Satellite) a été aussi très important. Il s'agit de satellites météorologiques géostationnaires de la NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration) qui, depuis la mise en service de leur deuxième génération, possèdent un système d'imagerie des éruptions solaires et de leur émission en rayons X. L'objectif est de détecter à l'avance de violents orages magnétiques, souvent responsables de dégâts sur les systèmes-satellites. L'efficacité de ces systèmes d'imagerie n'a pas mis longtemps à être démontrée car, en juillet 2000, le satellite GEOS- (rebaptisé GEOS-8) a repéré à la surface du Soleil une étendue particulièrement active (et bien sûr détectable en rayons X), prélude à un violent orage magnétique. Les résultats de GOES-8 allaient être rapidement confirmés par Soho qui, en plus de l'émission chromosphérique, a détecté dans sa suite une importante éjection coronale.

Enfin, pour compléter notre tour d'horizon, n'oublions pas les satellites américains TRACE (Transition Region Coronal Explorer) et IMAGE (Imager for Magnetopause to Aurora). Le premier a contribué à mieux connaître les mécanismes internes et externes du Soleil, le second a apporté de précieuses données sur la magnétosphère. TRACE, issu d'une collaboration entre l'université de Stanford et Lockheed Martin, a été mis sur une orbite polaire terrestre en 1998. Ce satellite est particulièrement bien

équipé dans le domaine ultraviolet et a permis de faire avancer les études sur les structures de la couronne solaire (arches, boucles, trous coronaux d'où s'échappe le vent solaire). Celles-ci ne durent pas très longtemps à cause de la température extrême mais se recomposent rapidement sous l'influence de phénomènes de nature magnétohydrodynamique et du champ magnétique solaire, lequel se comporte comme un véritable sculpteur stellaire. Jusqu'à l'arrivée des sondes Cluster sur leur orbite et leur mise en fonctionnement au cours de l'automne 2000, TRACE pouvait être considéré comme ayant fourni les meilleures informations sur la magnétosphère.

Quant à IMAGE, lancé le 25 mars 2000, il a été lui aussi construit par Lockheed Martin. Grâce à ses instruments ultraviolets, dont un appareil destiné à l'étude de la géocouronne lors d'orages magnétiques provoqués par des éruptions chromosphériques ou des éjections coronales, IMAGE a bien couvert la tempête magnétique solaire du 14 juillet 2000. Lors de cette tempête, la magnétosphère terrestre s'est fissurée, et pas seulement au niveau des cornets polaires, à la manière d'un mur laissant passer de petits filets d'eau. Ceci a résulté en un certain nombre de phénomènes magnétiques dans la magnétosphère et des aurores boréales d'un niveau inhabituel dans la haute atmosphère. Image nous a permis de compléter le savoir acquis grâce à Soho sur les éjections coronales et les conséquences de l'arrivée de celles-ci dans la banlieue magnétique terrestre.

Les missions Soho et Cluster

Quand on regarde rétrospectivement l'intégration des missions Soho et Cluster dans le programme ISTP, on s'aperçoit, comme ce fut le cas déjà pour la sonde Ulysse, que les Européens avaient placé la barre très haut. D'ailleurs, de nombreux scientifiques de pays non membres de l'ESA avaient exprimé leur volonté d'installer des instruments sur Soho et Cluster.

Lancé de cap Canaveral par une fusée Atlas en 1995, Soho est une plate-forme scientifique observant en continu le Soleil grâce à sa mise à poste au point de Lagrange L1, situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre sur l'axe Terre-Soleil. Les expériences scientifiques de la sonde solaire européenne sont passées de huit à onze, en recouvrant trois domaines de recherche : l'observation des couches externes du Soleil (en particulier la couronne solaire), l'étude du milieu interplanétaire (vent solaire et phénomènes ondulatoires associés) et celle de la structure interne du Soleil par des mesures de vitesses et d'oscillations lumineuses de la surface solaire, et cela avec des méthodes d'héliosismologie dont les origines sont américaines, russes (travaux de Kotov et Severny) et françaises (travaux de Serge Koutchmy, équipe Golf au CEA).

Au départ, les missions Soho et Cluster devaient être lancées à moins d'un an d'intervalle du fait de leur complémentarité et de la nécessité de leur synchronisation pour certains types d'études. On sait que l'échec du lanceur Ariane 5 en juin 1996 a condamné la première mission Cluster. Cependant, la remise sur pied du programme s'est faite à une vitesse remarquable. Les quatre nouvelles sondes Cluster – Rumba, Salsa, Samba et Tango – ont été mises à poste deux par deux en juillet et août 2000 par des lanceurs russes Soyuz équipés d'un étage supérieur Fregat.

Les ambitions de Cluster ne cédaient en rien à celles de Soho. Depuis 1983, date à laquelle les scientifiques de l'ESA ont commencé à travailler à sa mise au point, la mission du concept de référence a pris de l'ampleur au fur et à mesure des

propositions faites par les équipes scientifiques. Ainsi, alors qu'en 1989 chacune des quatre sondes devait emporter huit types d'expériences scientifiques, le programme passa à onze expériences, ce qui imposa un effort de miniaturisation et d'intégration aux quatre plates-formes satellitaires.

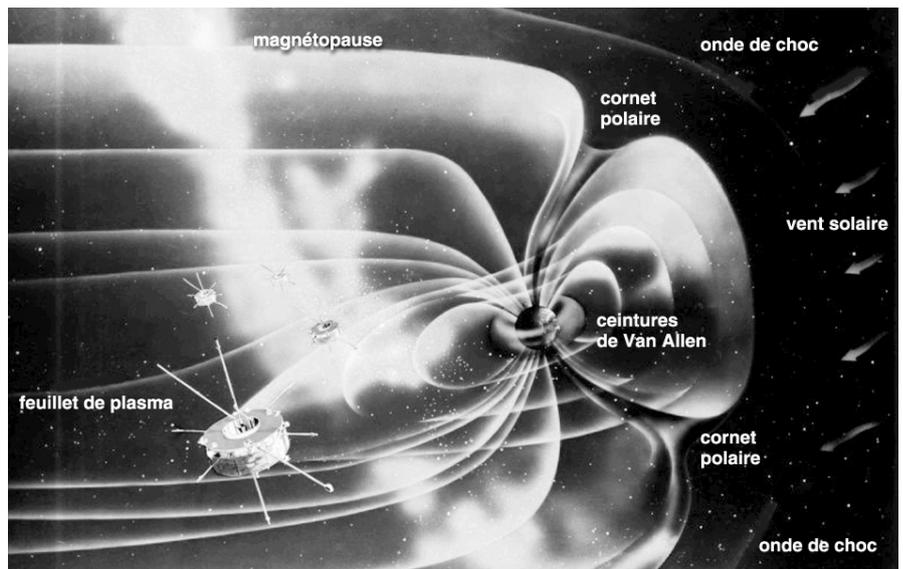
Les objectifs définis pour la mission Cluster étaient les suivants :

- explorer les zones frontières entre les régions de la magnétosphère ;
- étudier le processus de reconnexion magnétique et la structure MHD qui lui est associée ;
- étudier les turbulences MHD et la formation de vortex, principalement dans les cornets polaires et les zones frontières ;
- évaluer la structure et les propriétés des ondes de choc ;
- déterminer la structure à petite échelle du vent solaire ;
- utiliser la configuration à quatre satellites en option tétraèdre pour déterminer la forme et la dynamique tridimensionnelle des structures magnétiques.

L'apport de Soho

Soho reste pour le moment un instrument unique et sans grande concurrence. On sait que la mission Soho sera poursuivie jusqu'en 2003 mais son bilan est déjà très impressionnant. Commençons par la découverte la plus curieuse : à ce jour, Soho a découvert presque 300 comètes captées par la gravité du Soleil et dont 90 % se sont écrasées sur notre étoile. Certains scientifiques estiment qu'environ 10 000 de ces petits astres errants vagabonderaient ainsi dans les parties internes du système solaire. Il faut toutefois relativiser ce chiffre car la plupart de ces mini-comètes sont issues de la dissociation de comètes plus grosses, brisées par les forces gravitationnelles du Soleil ou délogées par la chaleur solaire. Toujours dans le domaine des curiosités cométaires notons que Soho, en 1997, a réussi à photographier l'ombre en déplacement de la grosse comète Hale-Bopp.

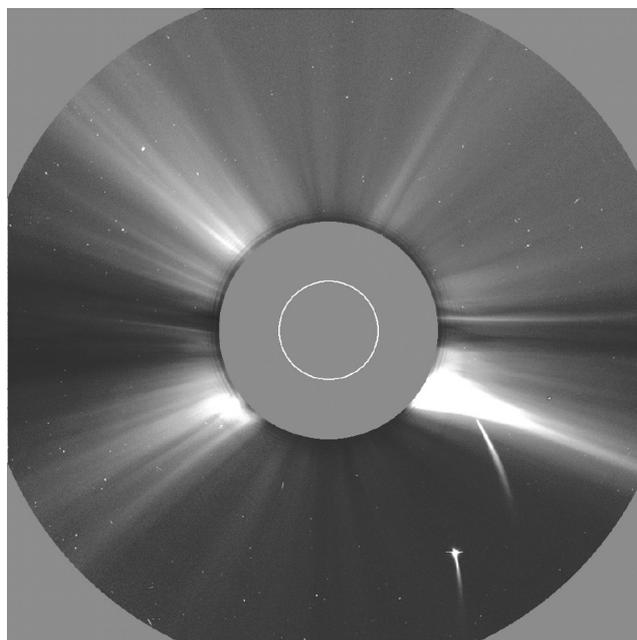
Une des réussites attendues par les concepteurs de Soho, grâce à son coronographe triversions LASCO, fut l'étude de la couronne en masquant



Les quatre sondes Cluster ont, entre autres, comme objectif d'explorer les zones frontières entre les régions de la magnétosphère et étudier la formation de vortex dans les cornets polaires.

le disque solaire. Soho a pu suivre l'évolution des structures coronales à petite et grande échelle tout au long de la rotation du Soleil sur lui-même. Grâce à sa position fixe idéale pour observer du point de Lagrange L1, Soho a véritablement dépassé les études sur la couronne poursuivies pendant près de dix ans par le satellite japonais Yokkoh. Dans ce domaine de connaissances, il s'agit d'une véritable révolution qui va nous permettre de détecter les prémices des éjections coronales et de prendre des précautions pour les satellites en orbite.

Un autre progrès est venu de l'identification précise des zones d'où souffle le vent solaire. Ce vent magnétique, qui semble être éjecté des trous coronaux, est un plasma composé de protons, d'ions et d'électrons. La sonde Ulysse avait détecté un vent rapide aux pôles ainsi qu'un vent plus lent dans les régions tropicales et équatoriales avec des vitesses respectives de 700 à 400 km/s. Toutefois, Soho nous a montré que la situation réelle était encore plus complexe : les régions émettrices se trouvent presque toujours à la périphérie de champs magnétiques

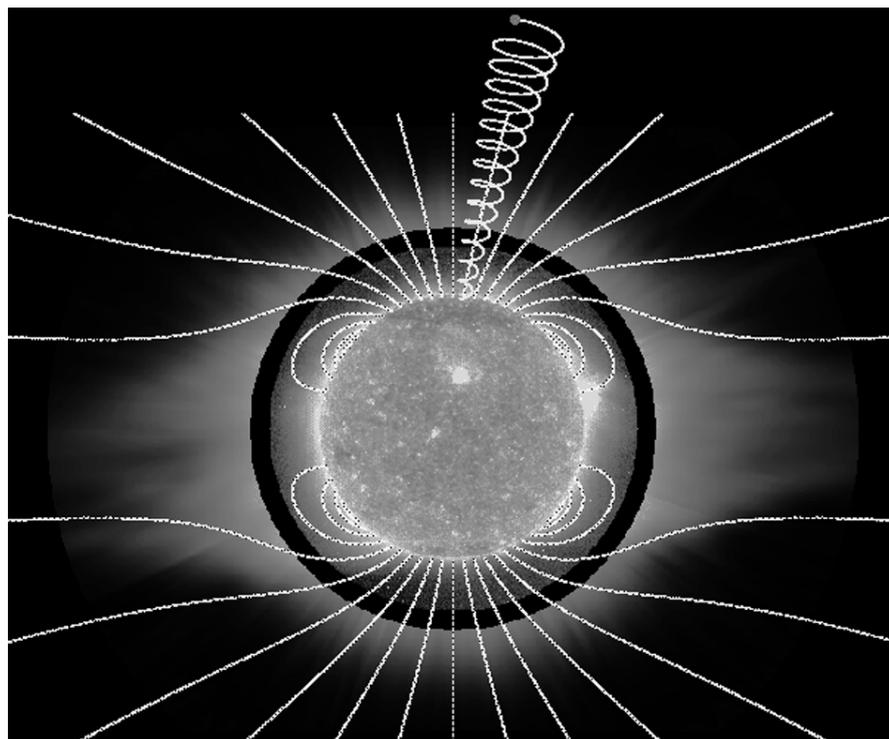


Soho a détecté de nombreuses comètes captées par la gravité du Soleil (ici représenté par le cercle blanc).

en forme de nids d'abeille, situés à l'interface entre la chromosphère et la couronne interne. Le gaz chaud observé dans les régions d'où provient le vent solaire, émet la lumière dans certaines longueurs d'onde de l'ultraviolet. Soho est notamment équipé d'un spectromètre Sumer (mesure des ultraviolets solaires) et cette technique a parfaitement fonctionné pour l'étude du vent solaire au moment de son émission. Selon Klaus Wilhelm, du Max Planck Institut für Aeronomie, « *l'identification de la structure détaillée de la région source du vent solaire rapide (aux pôles) est une étape importante dans l'étude de l'accélération du vent solaire. Nous pouvons désormais concentrer notre attention sur l'état du plasma et sur les processus dynamiques observés aux angles des structures du champ magnétique* ».

Nous savons qu'il existe dans tout le système solaire une héliosphère étendue, venue du Soleil dans des temps lointains, composée d'un plasma très ténu et d'un champ magnétique résiduel relativement faible mais capable, à la manière d'un aiguillage de chemin de fer, de se reconnecter au champ magnétique du vent solaire. Soho a permis de déterminer, à la grande surprise des scientifiques, que ce vent solaire se propage dans l'espace en « surfant » sur les ondes de l'héliosphère. On sait depuis des années que ce vent voit sa vitesse portée à plus de 3 millions de kilomètres par heure lorsqu'il s'échappe du Soleil. En revanche, la manière dont ce phénomène se produit constitue une découverte surprenante. Selon John Kohl, responsable du spectromètre coronographe du rayonnement ultraviolet UVCS de Soho : « *Les ondes de l'héliosphère sont produites par les vibrations des lignes du champ magnétique solaire qui donnent aux particules du vent solaire une accélération comparable à celle que reçoit un surfeur sur les vagues de l'océan.* »

Pour étudier ce vent, il est indispensable de visualiser la couronne. Ayant l'aspect d'un voile blanc verdâtre, la couronne est constituée d'un gaz raréfié chargé électriquement qui génère le vent solaire. Sur Terre, on peut parfois bénéficier d'une éclipse totale, pain béni des astronomes, ou encore utiliser des coronographes pour observer le Soleil.



Représentation des lignes de force magnétique au minimum de l'activité solaire. Dans la couronne étendue observée par l'UVCS, la densité des particules est si faible que les ions individuels n'entrent que très rarement en collision avec d'autres particules. En conséquence, ils exécutent un mouvement en spirale autour des lignes du champ magnétique (représentée ici que sur une seule ligne).

Dans ce dernier cas, les conditions ne sont pas idéales pour faire des observations à cause de la nébulosité de l'air qui diffuse le rayonnement solaire dans l'atmosphère. Soho est donc vraiment l'idéal.

Les ondes sont formées par la vibration à fréquence élevée des champs magnétiques dans le plasma coronal. Dénommées ondes magnétohydrodynamiques, elles sont supposées provoquer l'échauffement de la couronne et l'accélération du vent solaire. Parmi les suspects, notons une variante d'ondes α , dites « ondes d'Alf-ven », qui sont engendrées par l'agitation de l'hydrogène à basse fréquence. Les observations ont permis de prouver que, sous l'effet des charges électriques, les particules du vent solaire s'échappent vers le milieu interplanétaire selon la trajectoire en spirale des lignes invisibles du champ magnétique. Ester Antonacci, chercheur associé pour l'instrument UVCS de Soho, a déclaré : « *Le champ magnétique agit comme la corde d'un violon qui produit une vibration quand on la touche. Lorsque le champ magnétique vibre à une*

fréquence égale à celle de la particule qui se déplace en spirale autour de lui, il s'ensuit un échauffement de la particule qui est soumise de ce fait à une forte accélération centrifuge. »

Les découvertes dont nous venons de parler ne permettent pas, pour l'instant, de comprendre un intriguant mystère. On sait aujourd'hui que le vent solaire est constitué à 80 % de protons d'hydrogène, de 18 % de noyaux d'hélium et de traces d'ions lourds. Or nous n'avons jamais détecté d'hélium dans la région de cette couronne solaire alors que celle-ci est la cause principale de la formation du vent solaire magnétique. Steven Cranmer, de l'Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, estime qu'« *il faudra également conduire de nouvelles observations afin de mieux comprendre quelles sont précisément les interactions entre les ondes et le vent solaire considéré globalement* ».

Dans d'autres domaines d'étude Soho, là encore, n'en finit pas de nous émerveiller par ses capacités. Tous les spécialistes de l'espace savent ce que sont les taches solaires

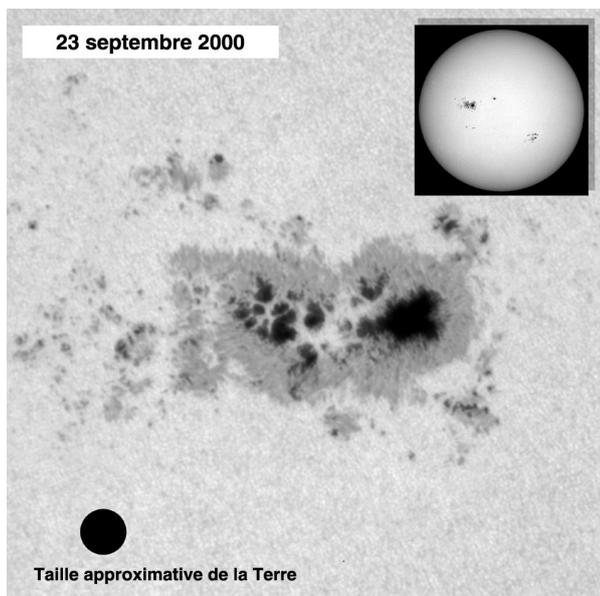
qui apparaissent sur la photosphère, accompagnés de puissants champs magnétiques qui, à cet endroit, compriment la matière. En conséquence de cela, la température de ces taches, parfois visibles à l'œil nu au Soleil couchant en été, se situe aux alentours de 3 500 à 4 000 K contre 6 000 K pour les autres parties de la photosphère. La présence de ces taches est l'indication d'une forte activité magnétique. Tout ceci est bien connu mais, grâce à l'instrument MDI (instrument à imagerie Doppler Michelson), Soho a pu « voir à travers le Soleil » et détecter des taches solaires sur sa face opposée (par rapport à la Terre). Au début des années 90, l'hypothèse selon laquelle il était possible de « voir à travers le Soleil » avait déjà été développée par les Américains Charles Lindsey et Doug Braun. Leur technique, dénommée technique analytique d'holographie héliosismique, est en train d'être appliquée sur Soho et leur méthode s'est avérée efficace quand les deux chercheurs l'ont utilisée pour décoder des ondes enregistrées à la surface visible par MDI. En 1999, une équipe de chercheurs français et finlandais dirigée par Jean-Loup Bertaux (directeur de recherche au service d'aéronomie

du CNRS) a présenté des résultats comparables à ceux de MDI, mais par une méthode différente de celle de Lindsey et Braun, en utilisant l'instrument Swan. Avec celui-ci, il fallait détecter des lueurs intenses dans l'ultraviolet résultant de l'émission de gaz projetés depuis le Soleil et balayant le ciel à la manière d'un phare. Les deux méthodes sont complémentaires même si MDI est plus précis que Swan. Leur intérêt commun est de voir ce qui se passe sur la face opposée du Soleil et de prévoir, à partir des taches et des orages qui s'y développent, les risques d'apparition rapide de tempêtes magnétiques pouvant balayer la Terre, après rotation du Soleil sur lui-même.

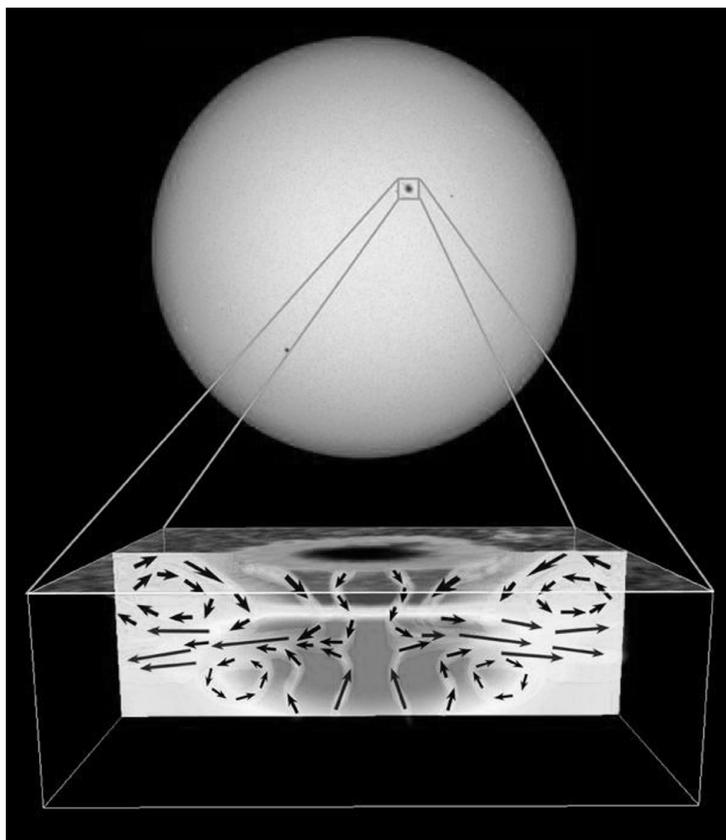
Soho a également permis de faire de l'héliosismologie solaire intense avec MDI-SOI et GOLF (Global Oscillations at Low Frequencies) de l'université d'Orsay, en collaboration avec le CEA et les observatoires de Bordeaux, Ténériffe et Nice. De même que les sismologues ont appris à sonder les entrailles de la Terre grâce aux ondes sismiques, la détection des ondes sonores qui se propagent à l'intérieur du Soleil a ouvert la voie à l'étude de sa structure gazeuse interne. En utilisant des

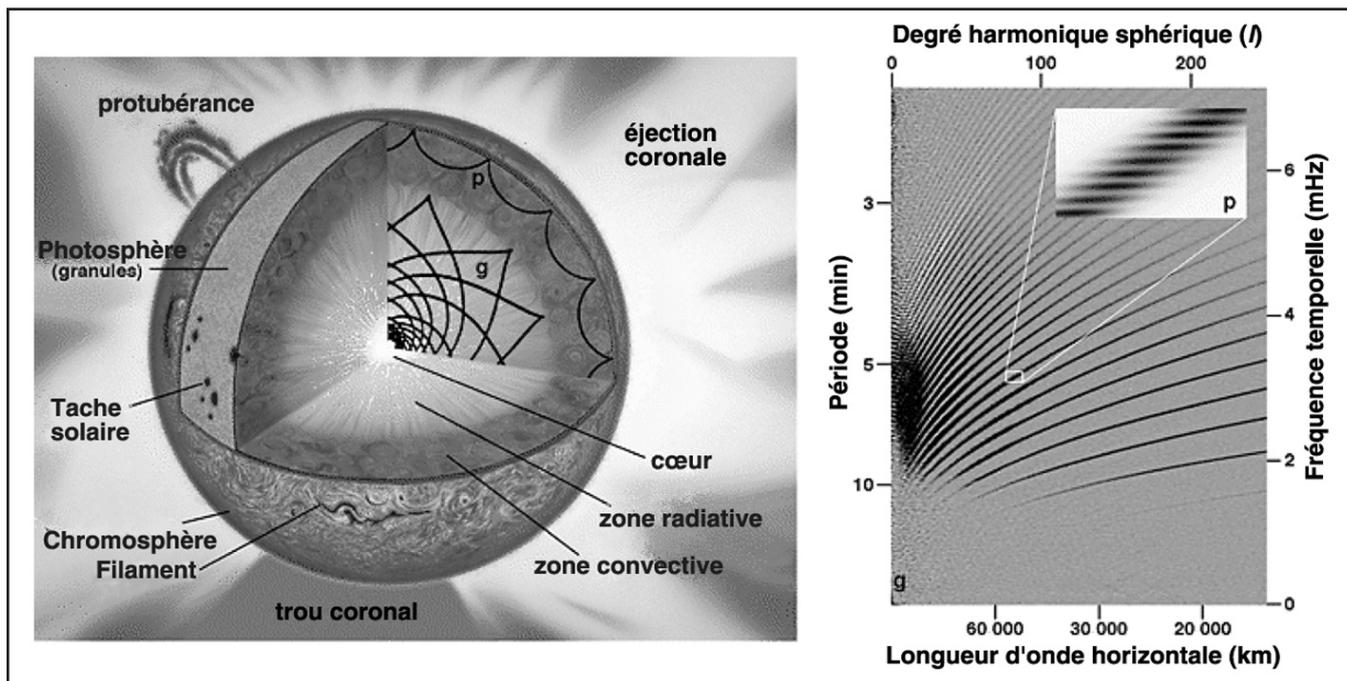
télescopes spéciaux au sol (comme l'observatoire de Crimée) ou dans l'espace, les héliosismologues ont pu mettre en évidence de nombreux modes vibratoires différents qui se manifestent à la surface du Soleil. Ces modes vibratoires donnent des informations sur la structure interne du Soleil et la manière dont les gaz y circulent, permettant ainsi une modélisation très proche de la réalité. La position de Soho au point de Lagrange L1 fait du satellite un instrument extraordinaire pour l'héliosismologie, et cela pour deux raisons : d'une part, il peut observer le Soleil sans interruption à partir d'un point fixe et sans perturbation, et d'autre part, ses mouvements propres se produisent sans le moindre à coup, permettant ainsi l'étude des oscillations de faible amplitude.

MDI est l'instrument d'héliosismologie le plus sophistiqué des trois que compte Soho. Il peut mesurer les mouvements rythmiques enregistrés sur un millier de points répartis sur l'ensemble de la face visible du Soleil. Les ordinateurs des instruments MDI et GOLF ont démontré que ces mouvements rythmiques et ces oscillations s'expliquaient par la formation, au sein du Soleil, d'ondes sonores qui se propagent



Ci-dessus, grand groupe de taches solaires détecté par Soho le 23 septembre 2000. Ci-contre, grâce à la technique de tomographie acoustique, on a pu pour la première fois voir ce qui se passe sous la surface du Soleil, en particulier les mouvements de matière sous les taches solaires.





A gauche, schéma illustrant comment les ondes sonores se propagent à l'intérieur du Soleil. Seules des ondes avec des combinaisons particulières de période et de longueur d'onde horizontale résonnent à l'intérieur du Soleil. Ces combinaisons précises, en relation avec la structure interne du Soleil, produisent des « arêtes » de plus grande puissance, tel qu'on peut le voir sur le diagramme à droite.

dans ses couches. La propagation de ces ondes nous renseigne sur les conditions régnant au cœur du Soleil et dont certaines nous étaiant auparavant inconnues. Certaines couches jouent un rôle d'arrêt brutal sur les flux de gaz à grande vitesse et il existe des structures curieuses, en forme de jets, possédant un courant électrique sensible au champ magnétique solaire interne. La technique de l'holographie héliosismique permet de suivre les zones qui sont à l'origine des ondes sonores. En fait, elles sont issues de petites régions de la partie cachée et atteignent la partie visible en rebondissant depuis la surface du Soleil vers l'intérieur de celui-ci. Ainsi, les 28 et 29 mars 1998, l'instrument MDI a détecté sur la face cachée du Soleil un groupe de taches solaires qui n'ont été repérées sur la face visible que dix jours plus tard. Comme l'a déclaré Bernhard Fleck, responsable scientifique de Soho pour l'ESA : « Grâce à Soho, il est possible de faire une découverte tout à fait nouvelle en physique solaire fondamentale et d'envisager l'application pour surveiller l'activité quotidienne du Soleil et prévoir les conséquences qui en résultent pour la Terre. »

L'équipe MDI a aussi permis

d'affiner la méthode du temps de propagation des ondes sonores mise au point en 1993 par Thomas Duvall et baptisée « tomographie solaire ». Celle-ci consiste à analyser la propagation des ondes sonores au sein du Soleil, malgré les obstacles que constituent les variations locales de température, les champs magnétiques et les flux de gaz sous la surface du Soleil. Les premiers essais de cette méthode ont été effectués en janvier 1998.

Autre progrès, Soho nous a permis d'apprendre avec davantage d'exactitude ce qu'étaient les taches solaires. Les spécialistes de la physique solaire postulaient depuis longtemps que les champs magnétiques intenses localisés dans les taches solaires constituaient un véritable tir de barrage pour les flux de matière ascendants venant de l'intérieur, expliquant pourquoi les taches solaires sont plus froides et plus sombres que les structures qui les entourent. Cependant, ce qui a été découvert par Soho, c'est le mécanisme expliquant l'origine et la durée des taches (plusieurs jours à plusieurs semaines) : il s'agit de la convergence de flux de gaz autour d'une concentration de champs magnétiques. Là encore, la découverte

doit beaucoup à l'instrument MDI, avec la mise en évidence de liens entre les taches et des colonnes magnétiques de gaz situées en dessous et qui leur sont associées.

Il est un autre mystère pour lequel Soho a donné un début d'explication. En effet, de nombreux satellites avant Soho nous avaient permis de constater que le Soleil est plus brillant lorsqu'il est parsemé de taches sombres. L'instrument Virgo (ainsi que MDI) a été mis à contribution avec l'équipe du principal investigateur suisse C. Frölich pour tenter de résoudre ce mystère. Selon l'astrophysicien et héliophysicien Douglas Gough, ce phénomène pourrait être expliqué par le mécanisme suivant. Dans un premier temps, le flux descendant de gaz qui a perdu un peu de chaleur sous la tache évacue une partie de la chaleur montante en train de s'accumuler sous la tache. Dans un deuxième temps, ce flux descendant éloigne cette chaleur de la zone d'influence de la tache et la transporte jusqu'à la surface du Soleil avec deux conséquences : d'une part, cette surface solaire devient plus brillante car le mécanisme se produit à partir de dizaines de taches et, d'autre part, on assiste à une augmentation du rayonnement solaire dans l'espace.

L'apport de la mission Cluster

Cluster est complémentaire de Soho et les responsables scientifiques du projet à l'ESA ont eu aussi beaucoup de motifs de satisfaction, en dépit de l'échec du lancement des quatre premières sondes. L'ESA a en effet perdu quatre ans de « fertilisation croisée » entre Soho et les sondes Cluster car, en combinant les résultats des cinq sondes, il est possible d'élaborer des modèles globaux intégrant ce qui se passe à l'intérieur du Soleil ainsi que dans ses différentes couches atmosphériques, en particulier avant des éruptions chromosphériques et des éjections coronales.

Dans un article paru dans *Fusion* (n°80, mars-avril 2000), nous avons expliqué en quoi consistait le programme Cluster en décrivant notamment l'onde d'étrave, une onde de choc qui écrase la magnétosphère terrestre du côté exposé au Soleil, la queue magnétosphérique qui se développe du côté opposé au Soleil et les cornets polaires qui offrent une moindre résistance à la pénétration du plasma solaire. Nous avons aussi décrit en détail les onze instruments équipant chacune des quatre sondes. Ces sondes totalement identiques (ce qui était inédit en Europe) une fois déployées dans l'espace, ressemblaient à de gigantesques araignées à cause de leurs mâts déployés qui atteignent 44 m. Ce sont sur ces structures que sont placés certains instruments, comme les magnétomètres, pour les mettre à l'abri du bruit électromagnétique des autres instruments car ce phénomène peut fausser les mesures. Dans le cadre de leurs objets d'investigation, les instruments des quatre sondes sont constamment soumis à des électrocontacts, avec parfois une correction par le contrôleur Aspoc pour le potentiel électrostatique. Depuis la mise sous tension des instruments, les électrocontacts reçus par les instruments des sondes Cluster ont été estimés à 30 000. Le grand regret des responsables de la division des programmes scientifiques de l'ESA vient du fait que les quatre sondes n'étaient ni en orbite et ni opérationnelles pour la fameuse tempête magnétique de

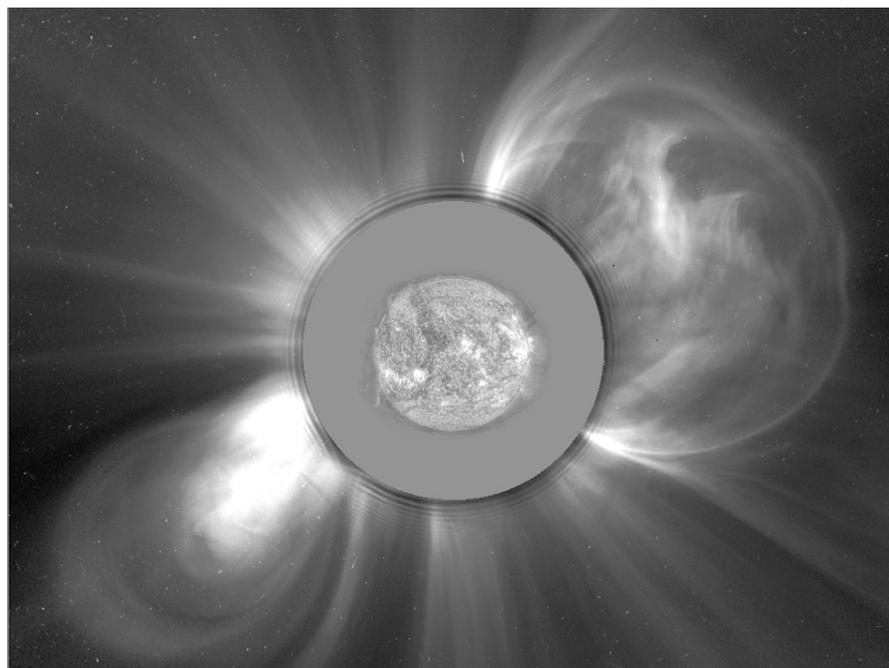


Image de deux éjections coronales prise par L... le 8 novembre 2000.

juillet 2000 qui fut détectée à la fois par le satellite américain Goes-8 et par Soho.

Toutefois, beaucoup de choses intéressantes ont déjà été apportées par les sondes Cluster 2, et cela dès les premiers mois qui suivirent la séparation des quatre sondes avec leur moteur d'apogée au-dessus de la Méditerranée. Jusqu'à présent, les distances entre chacune d'entre elles n'ont pas dépassé 600 km dans une configuration tétraédrique. Cette configuration permet de distinguer les variations spatiales des variations temporelles et d'effectuer des mesures simultanées à partir de quatre points de l'espace. Etant donné que l'objectif est de décrire précisément le maelström de gaz, de courants électriques et de champs magnétiques à grande mobilité qui entourent la planète, ce système permet de délivrer des informations totalement indépendantes sur l'évolution temporelle et la structure tridimensionnelle observée.

Les sondes suivent une orbite de 125 000 sur 25 000 km, sur laquelle elles évoluent en tétraèdre. Les distances entre les quatre sondes peuvent varier de 200 km (minimum de configuration) à 19 000 km (maximum de configuration) dans le cadre d'orbites décrites sur un an. Selon les saisons, les sondes Cluster se

rapprochent ou s'éloignent tout en mesurant constamment les champs électromagnétiques, les ondes et les bruits radio ainsi que les électrons et les atomes ionisés du milieu constitué par la magnétosphère. Les distances des quatre sondes sont donc variables selon que l'on étudie la magnétosphère et les cornets polaires, pendant l'été, et la queue magnétosphérique, pendant l'hiver. Dès le début février 2001, les premiers résultats étaient publiés par l'ESA et le programme d'ensemble d'études complémentaires (Soho avec Cluster) était ainsi complet : il devenait ainsi possible de compléter les deux missions dans l'optique de l'étude des chaînes complexes et interactives qui caractérisent des phénomènes se déroulant depuis l'intérieur du Soleil jusqu'à la magnétosphère terrestre.

Certes, Cluster avait manqué l'orage magnétique solaire de juillet 2000 mais il fut au rendez-vous de celui du 8 novembre 2000, le quatrième en importance depuis 1976 et détecté par Soho dès ses premières phases. Lorsque le Soleil est à son maximum d'activité lors de son cycle de 11 ans, de nombreux orages solaires très énergétiques se produisent comme ceux de juillet et novembre 2000. En l'occurrence, il s'agissait d'éjections coronales et, pour ce qui concerne l'événement

du 8 novembre, l'instrument Whisper de Cluster détecta la première conséquence de l'orage huit minutes plus tard, à savoir une émission radio sur la plage de 20 kHz à 80 kHz. Ensuite, vingt minutes plus tard, on voyait l'arrivée des premiers protons accélérés durant l'orage et ceci à proximité de la Terre. Le flux était environ mille fois plus élevé que dans les conditions du Soleil calme. Les particules ont pénétré les sondes Soho et Cluster et ont aussi atteint les satellites américains TRACE, IMAGE et GOES-8. Les particules ont provoqué des dommages aux composants et aux mémoires actives reliées aux instruments, en infligeant notamment pour les sondes Cluster (qui se trouvaient à ce moment là à la limite de la magnétopause) des doses cent fois supérieures à ce qui était constaté dans des conditions normales. Deux instruments des sondes Cluster ont été mis hors service sans toutefois de conséquences sur la poursuite de la mission. Les sondes ont également constaté une entrée d'un niveau anormal de particules par la face avant de la magnétosphère.

Il va sans dire que, sur chacune des quatre sondes, les huit instruments de mesures des ondes électromagnétiques et des particules ont été très sollicités.

Cluster a permis, pour la première fois, l'étude en trois dimensions de la magnétopause – interface entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre – que les sondes ont traversé en effectuant des mesures des ondes et des champs magnétiques. Cluster nous a aidé à comprendre ce qui se passe à cette frontière et découvert une particularité encore méconnue des cornets polaires : un déplacement d'environ 30 km/s, avec un fort mouvement de va-et-vient au moment de la tempête solaire. Lors de la traversée de la zone de l'onde de choc, les sondes ont détecté des variations spatiales et l'instrument Whisper a identifié deux types de champs magnétiques (champ fort et champ faible). Quand le vent solaire supersonique se rue à une vitesse d'environ 400 km/s, l'onde d'étrave dont la surface avancée heurte de plein fouet celle de la magnétosphère terrestre, est assez similaire à l'onde de choc (bang sonique) qui

se produit lorsqu'un avion atteint rapidement la vitesse du son dans l'atmosphère. L'onde d'étrave contribue à ralentir le vent solaire et à le faire s'étaler en partie tout autour de la magnétosphère qu'il réussit à pénétrer dans ses failles, c'est-à-dire là où le plasma magnétosphérique est moins dense. La traversée de la frontière de l'onde de choc a permis d'établir des graphiques montrant de grandes différences locales en ce qui concerne la résistance de la magnétosphère au vent solaire et à l'onde d'étrave, ainsi que des variations de la fréquence des ondes émises selon le temps. Sur la base de ces données, les sondes Cluster ont permis d'élaborer un premier modèle solide de la magnétopause que l'on peut décrire comme une vague qui déferle sur la frontière de la magnétosphère.

L'apport des quatre sondes européennes est considérable et le physicien britannique A. Balogh estime que, sans Cluster, il aurait été impossible de comprendre ce que signifiaient les mesures relevées auparavant sur l'onde d'étrave. Quant à Roger-Maurice Bonnet, aujourd'hui directeur adjoint pour les programmes scientifiques du CNES, il estime que seules les sondes Cluster étaient capables de relever le niveau de complexité de la relation entre l'étoile solaire et le bouclier géomagnétique qui s'oppose au vent solaire. Roger-Maurice Bonnet souligne aussi un autre point important : Cluster nous a appris comment mettre en œuvre quatre satellites identiques et nous ouvre la possibilité de développer des constellations à buts scientifiques. Cluster a vu sa mission prolongée jusqu'en 2004 et les Américains ne s'y sont pas trompés puisqu'ils enverront dans la magnétosphère terrestre, en 2006, une armada de quatre sondes très inspirées du programme Cluster. Parmi les applications potentielles de ces recherches, on peut d'abord mentionner la protection des satellites contre les orages magnétiques et les éruptions solaires. A plus long terme, on peut penser à des applications pour la propulsion MHD ou la propulsion interstellaire, si l'on peut recréer artificiellement la puissance de l'onde de choc créée par les éruptions solaires. ■

Entreprendre de nouvelles missions

Au regard de leurs résultats, il n'est pas étonnant que les sondes Soho et Cluster aient vu leurs missions prolongées respectivement jusqu'en 2003 et 2004. Toutefois, il nous faut certainement obtenir davantage de données, en particulier avec des sondes équipées d'appareils différents et capables de mener des investigations plus proches des objets d'étude ou dans des régions inexplorées. Pour répondre à ces attentes, les Européens de l'ESA abattent leurs cartes en proposant les projets Solar Orbiter et Storms. Le premier projet devrait observer en continu le Soleil à une distance de 30 millions de kilomètres, soit au-delà de la planète Mercure qui orbite autour du Soleil à une distance variant entre 45,9 millions et 69,7 millions de kilomètres. Il faudra à Solar Orbiter une électronique durcie et des systèmes de protection de ses instruments contre les intenses radiations solaires. Le second projet consiste en une sonde destinée à explorer la magnétosphère interne et les ceintures de Van Allen.

Néanmoins, si Solar Orbiter a de fortes chances de voir le jour, les contraintes financières imposées au programme scientifique de l'ESA rendent plus aléatoire l'avenir de Storms. Certes, la conférence de l'ESA tenue au niveau ministériel à Edimbourg en novembre 2001 a décidé d'augmenter le budget des programmes scientifiques de 2,5 % par an, mais n'oublions pas que l'agence européenne a subi pendant cinq ans une véritable période de disette, avec une réduction annuelle de son budget de 5 %. Ainsi, les 2,5 % de hausse accordés par les ministres à Edimbourg ne sont rien d'autre qu'une forme de rattrapage partiel justifié. Selon nous, et sans tenir compte des programmes déjà engagés, il faudrait consentir un effort supplémentaire pour maintenir le programme scientifique de l'ESA au niveau de ce qui a été déjà acquis ou en voie de l'être (satellite gamma Integral, sonde Mars Express, sonde Rosetta, satellite Herschel-Planck).