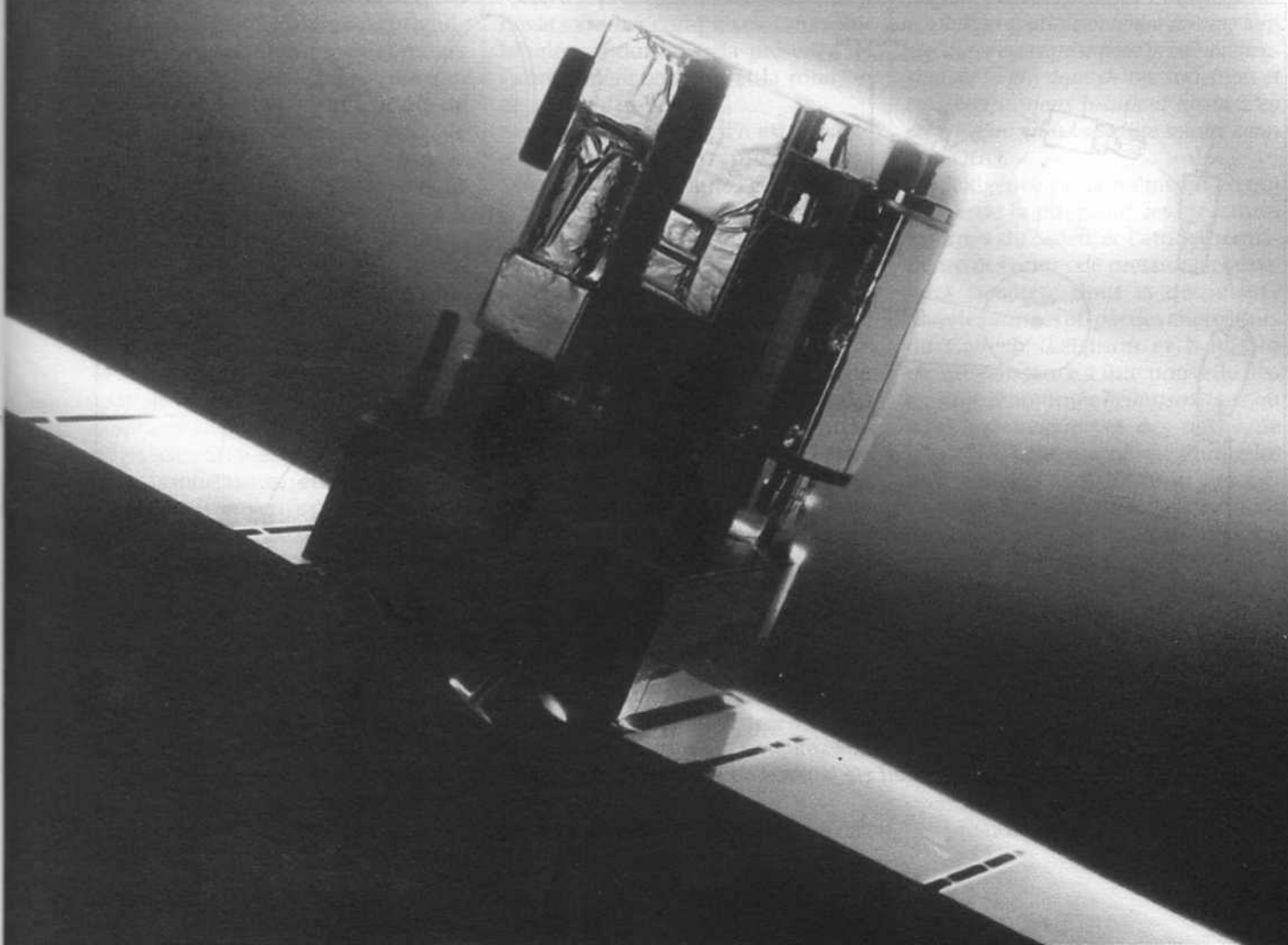


Le Soleil a rendez-vous avec SOHO

PHILIPPE JAMET

En cours de transfert vers une zone de stabilité située sur l'axe Terre-Soleil, SOHO, satellite parmi les plus sophistiqués construits à ce jour, ne vise rien moins qu'à percer, dès ce mois de mars, le secret des phénomènes étranges qui affectent le cœur de notre étoile et l'environnement périphérique de celle-ci.



Aquelque 149 millions de kilomètres de la Terre, le Soleil nous offre l'opportunité d'observer « à portée de télescope » un type de « chaudron stellaire » à fusion thermonucléaire relativement courant dans notre Galaxie. Mieux connaître le Soleil n'est pas seulement important pour notre planète — son rôle pour la vie sur Terre n'est plus à souligner — mais également parce que cette connaissance nous apportera, par analogie, une meilleure compréhension de ce qui se passe au cœur et autour d'étoiles similaires. Les spécialistes de physique solaire et stellaire n'ont jamais manqué une occasion de profiter des techniques spatiales, en embarquant sur des sondes ou des satellites des instruments de plus en plus complexes, réalisés la plupart du temps en coopération internationale. Malgré les progrès technologiques qui ont bouleversé, depuis deux décennies, les méthodes des plus grands observatoires terrestres, il reste difficile d'étudier correctement et avec le temps nécessaire ce qui se passe au cœur et à la périphérie de notre étoile. Il en est de même de l'environnement du Soleil qui peut se révéler très

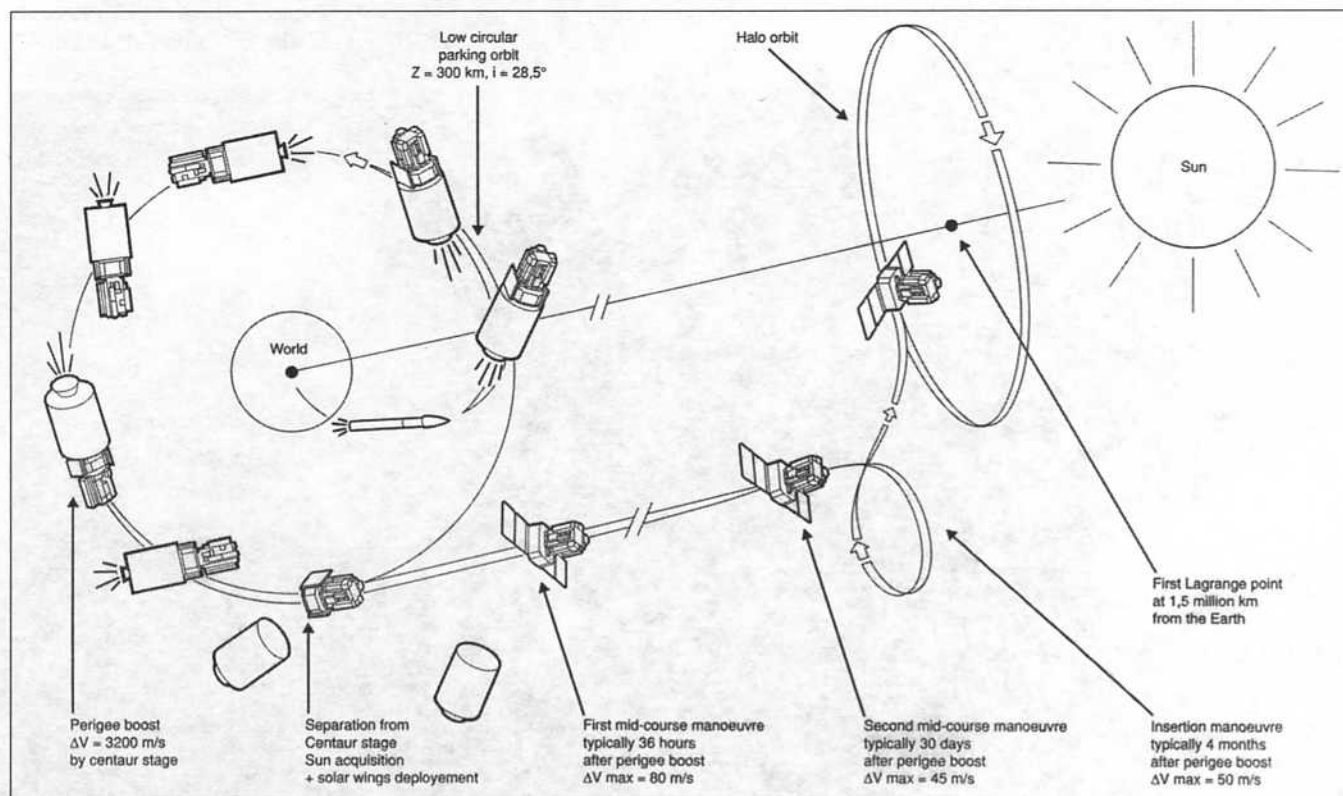
vaste puisque certains phénomènes — par exemple, les *vents solaires* — se font ressentir jusqu'au niveau des planètes gazeuses éloignées comme Uranus et Neptune... Ainsi, il est préférable, pour modéliser correctement, de disposer de capteurs opérant pratiquement « in situ ».

Ceci explique pourquoi d'ambitieuses missions d'observation du Soleil sur toutes les longueurs d'onde ont été organisées soit dans le cadre de missions habitées (Apollo Telescope Mount de la défunte station Skylab, stations Salyout, mission navette Spacelab 2 en 1985) soit en faisant appel à des sondes automatiques (les sondes germano-américaines Helios, le satellite japonais Solar-A, le satellite américain ISSE-3 lancé en 1978 sur cette fameuse orbite de Halo, ou le satellite SMM). La plus célèbre des missions est sans aucun doute celle du satellite Solar Maximum Mission (SMM), qui fut, en avril 1984, récupéré et réparé dans l'espace par les astronautes Nelson et Van Hoften, alors qu'il était défaillant et animé de mouvements de rotation intempestifs.

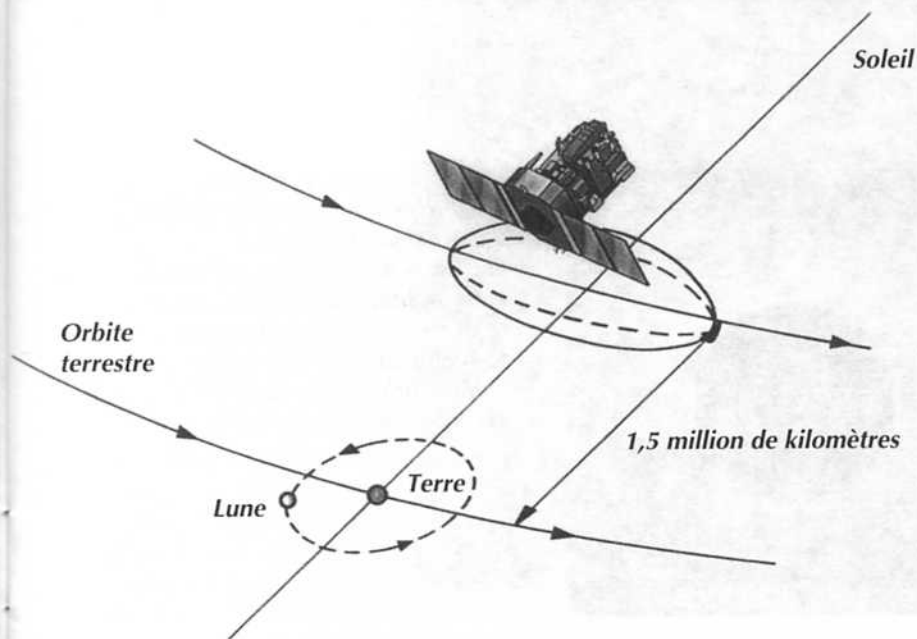
Mais les années 90 peuvent être considérées comme un « tournant »

dans la déjà riche saga historique de l'astrophysique spatiale solaire. Nous pensons particulièrement à Ulysse, la sonde polaire de l'ESA mise à poste par la navette en 1990 et en cours de mission pluridisciplinaire, après avoir, de juin 1994 à septembre 1995, survolé les deux pôles du Soleil (voir *Fusion*, mai-juin 1994, N°51). N'oublions pas non plus le satellite japonais de l'ISAS, Yokkoh. Lancé en 1990 et prévu pour fonctionner au maximum deux ans, ce satellite continue à nous envoyer des informations sur le Soleil puisque, à la stupéfaction de ses concepteurs, ses systèmes de transmission et ses instruments sont encore en état de marche ! Souhaitons évidemment la même longévité au tout dernier satellite solaire européen SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), lancé le 2 décembre dernier par une fusée américaine Atlas-2AS. D'ailleurs, les laboratoires d'astrophysique d'outre-Atlantique participent pour environ un tiers de la charge utile scientifique totale.

Selon le Docteur Art Poland de la NASA, « *SOHO devrait largement pouvoir assurer ses spécifications en matière de durée de fonctionnement sur son orbite particulière. En effet, il a été conçu*



Transfert de SOHO en orbite. Une orbite exotique a été choisie afin de ne pas pénaliser la capacité d'emport en charge utile scientifique, ce qui aurait été le cas si un système de motorisation plus puissant et presque direct avait été préféré.



L'orbite de halo.

Centrée autour d'un point d'équilibre dit L1 et situé à 1,5 million de kilomètres, l'orbite de halo sur laquelle opérera SOHO permettra au satellite européen de traquer les mystères solaires.

avec des systèmes optiques très peu dégradants, faisant appel à des matériaux exotiques ayant bénéficié de la technique du superpolissage informatique. De plus, de nombreux systèmes d'intelligence artificielle redondants y ont été intégrés ». En fait, si tout se passe bien, SOHO pourrait assurer sa fonction pendant vingt ans sur son orbite de halo, alors qu'à l'origine, il était conçu par son maître d'œuvre Matra Marconi Space pour durer six ans. Il faut inclure évidemment la durée du transfert du satellite vers son orbite, empruntant une trajectoire atypique en forme de « poignées de ciseaux ». Les limites des techniques de propulsion classique ont imposé pas moins de cinq corrections de trajectoire successives car le choix d'une orbite de transfert directe aurait nécessité de grandes quantités de carburant et de fluide propulsif, réduisant par là même la charge utile scientifique à quelques dizaines de kilos seulement. Ainsi, SOHO peut emporter douze instruments principaux, moyennant un poids de 650 kilos. A l'avenir, de petits remorqueurs nucléo-électriques — amarrés, par exemple, à la station spatiale internationale — pourraient emporter au point requis des charges utiles scientifiques considérablement plus importantes, embarquées au préalable jusqu'en orbite basse par un vaisseau de type navette automatique. Cette approche sera nécessaire si l'on veut éviter ces manœuvres complexes et non sans risques.

Normalement, dès la fin mars 1996, après avoir parcouru 1,5 million de kilomètres, que SOHO parviendra sur une orbite elliptique définitive de 600.000 km-200.000 km, centrée autour d'un Point de Lagrange L₁ situé sur l'axe Terre-Soleil. Ce point constitue le centre d'une zone d'équi-

libre, précisément à l'endroit où les attractions respectives de notre étoile et de notre planète s'annulent, et bien sûr à une distance plus proche de la Terre que du Soleil en raison de l'énorme disproportion des masses (la masse du Soleil est de 1989.10^{30} tonnes, soit 330.000 fois celle de la Terre). Cette singulière orbite elliptique représente aussi la réalisation d'un rêve partagé, depuis des décennies, par la majorité des astrophysiciens : disposer — 24 heures sur 24 et pendant des années ! — d'un observatoire solaire pouvant scruter et détecter des phénomènes solaires internes et externes complexes, sans subir les aléas induits par la présence de l'atmosphère terrestre et la rotation de notre planète.

A partir de la Terre, il n'est possible d'observer certains phénomènes (comme, par exemple, ceux qui se produisent au niveau de la couche supérieure de l'atmosphère solaire, c'est-à-dire la couronne), que lors de très rares éclipses totales. Celle qui eut lieu en juillet 1991 a permis aux équipes du Télescope Canada-France-Hawaii de mettre à la disposition de la communauté scientifique des données d'une qualité exceptionnelle. Encore faut-il, dans ce cas, compléter ces observations au moyen d'instruments de spectroscopie X ou EUV (ultraviolet extrême) placés sur des avions en haute altitude ou des fusées, et même sur des satellites en orbite autour de la Terre, équipés par exemple de coronographes. Toutefois, ces méthodes ne permettent que des réponses partielles aux modèles explicatifs de certaines structures typiques de cette couronne : on pense notamment aux jets coronaux, dont l'étendue en latitude par rapport à l'équateur solaire est liée au cycle

d'activité du Soleil et à d'autres structures (par exemple, arches, boucles coronales ou flux d'écoulement de plasma poussés et structurés par des champs magnétiques). La formation, la modification et la pérennité de ces structures semblent dépendre, selon Serge Koutchmy de l'Institut d'Astrophysique, de phénomènes dynamiques permanents se produisant à petite échelle et d'instabilités soudaines s'effectuant sur une large échelle... Comme le déclarait ce même chercheur lors d'une réunion préparatoire à SOHO organisée en 1992, à Annapolis (Etats-Unis) : « Une meilleure résolution spatiale obtenue sur une longue durée est requise pour la compréhension de la physique de ces structures et ces spécifications justifient la mise en œuvre d'un grand satellite solaire comme SOHO. »

L'exigence est la même en ce qui concerne la physique des structures internes du Soleil et l'étude permanente des ondes de pression acoustiques (sonores), dont la découverte dans les années 60 par des chercheurs du Caltech (Leighton et Noyes) a donné naissance à une nouvelle discipline dénommée héliosismologie ou sismologie solaire et des ondes de gravité. L'héliosismologie étudie les mouvements ascendants et descendants de ces ondes, qui proviennent probablement de la zone dite de « convection » (située à 200.000 km en dessous de la surface). Ces mouvements se répercutent alternativement, dans un sens puis dans l'autre, sur le mouvement des gaz, comme on a pu le constater avec la modification de leurs raies spectrales traduisant ces mouvements.

Si l'on sait qu'il faut également prendre en compte, pour expliquer ces phénomènes, de la structure in-

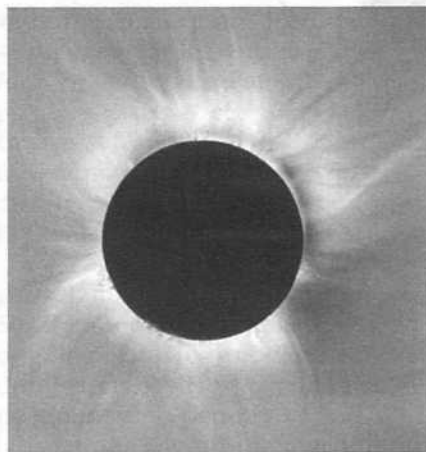
terne du Soleil et de sa rotation (apparemment variable en fonction de la profondeur, puisque le cœur tournerait plus vite que les parties extérieures), ainsi que des champs magnétiques et divers phénomènes de transfert, on saisit immédiatement l'intérêt, là aussi, d'une observation en sismologie solaire continue.

A tous ces phénomènes, SOHO tentera d'apporter une réponse originale grâce à un système de pointage précis d'origine américaine et à un « star tracking system », qui permettront des corrections permanentes de façon à ce que les instruments restent constamment braqués sur les structures solaires et les objectifs choisis. Innovation technologique majeure, SOHO dispose également d'un système robotique de secours permettant de recalibrer les instruments de communication et de transmission des données dans un délai de quarante-huit heures en cas de rupture des communications ! Ce système de secours constitue peut-être la première étape, certes bien timide, d'une voie qui pourrait déboucher dans un futur lointain sur des concepts « d'autoréparation », fort proches de ceux qu'avait imaginé, dans les années 50, l'américain John W. Campbell dans la revue *Analog*. Certains à l'Institut d'Astrophysique de Paris, à l'IAS d'Orsay et à l'INRIA ne sont pas loin de le penser...

SOHO, tel un aigle embusqué...

A la lumière de ce que nous venons d'expliquer, il apparaît que les objectifs principaux de SOHO relèvent principalement de la physique coronale et de l'héliosismologie. D'ailleurs, ces deux domaines accaparent la plus grosse partie de la charge utile scientifique : cinq systèmes pour la physique coronale (Sumer, CDS, EIT, UVCS et Lasco, auxquels il faut ajouter l'instrument français Swan qui étudie également le vent solaire) et trois systèmes pour l'héliosismologie (Golf, Virgo et SOI-MDI). Au départ, les études sur le vent solaire (instruments Cielis, Costep, Erne et Swan) semblaient, en comparaison, plus marginales sur SOHO, et relever davantage des programmes de la sonde polaire Ulysse.

En ce qui concerne ce vent solaire,



La couronne solaire observée lors d'une éclipse intégrale. Elle est la partie la plus externe de l'atmosphère solaire, et se compose de plusieurs sous-structures. Sa température, un des objectifs d'étude prioritaires de SOHO, atteint 2 millions de degrés.

jusqu'à l'automne 1994, on se donnait pour tâches principales l'étude des particules libérées lors des éruptions, la mesure des spectres énergétiques des électrons, protons, noyaux d'hélium et ions lourds de ce vent et de la distribution de ses flux massiques (de l'équateur aux pôles), qui semble marquée par des hétérogénéités liées à des champs magnétiques et à des variations locales. On sait que ce vent solaire est un plasma composé de protons, d'ions et d'électrons, qui prend naissance dans la couronne avant d'être éjecté vers le système planétaire selon deux modes : l'un à « basse vitesse » (de 400 à 500 km/sec), l'autre à « grande vitesse » (selon V. Domingo de l'ESA, ce vent pourrait atteindre dans certains cas les 2000 km/sec !). Une conséquence majeure de cela serait d'envelopper d'un filet ténu le système planétaire autour duquel il provoque d'importantes ondes de choc. En ce qui concerne la Terre, le vent solaire interagit de façon permanente mais variable avec le champ magnétique terrestre. Ce phénomène, qui sera bientôt étudié par les quatre sondes européennes Cluster, induit parfois de flamboyantes aurores boréales mais aussi des nuisances lors d'orages magnétiques, créant des interférences ou provoquant des interruptions momentanées de liaisons radio, notamment sur les ondes courtes.

Le champ magnétique solaire est, quant à lui, d'intensité variable en raison des cycles solaires de onze ans, ce qui se traduit localement par des taches visibles au niveau de la photosphère. Il est la résultante d'un véritable « effet dynamo » caractérisant une matière solaire très conductrice et animée de mouvements de convection et de rotation. Cette matière solaire varie selon la latitude et la

profondeur : elle apparaît plus homogène et plus lente au fur et à mesure que l'on s'enfonce vers les couches plus profondes. Le vent solaire et le champ magnétique sont en permanence en interaction à cause d'échelles considérables des phénomènes observés et de processus de transfert, d'une couche à l'autre, de différents domaines de champs, d'énergie, de rayonnements, d'ondes de gravité, de phénomènes magnétohydrodynamiques qui caractérisent les mondes stellaires. Les lignes de force du champ magnétique apparaissent en quelque sorte « gelées » dans l'éjection du vent solaire, phénomène qui a été parfaitement identifié en 1979 par un étonnant travail de triangulation réalisé en commun par la sonde allemande Helios 2 et le satellite américain ISEE-3, qui ont contribué à la réalisation de la première carte en trois dimensions de ce processus.

S'il n'y avait pas eu la sonde européenne Ulysse, on n'aurait pas fait mieux en ce domaine... Mais les « invités inattendus du progrès scientifique » étant passés par là, quelle ne fut pas la surprise des scientifiques de constater, lors du survol des pôles solaires en 1994 et 1995 par la sonde européenne, que la structure du champ magnétique dans les régions polaires n'était pas celle que l'on croyait et que, paradoxalement, la gravité (liée à la fois à la masse et à la rotation du Soleil) ne se traduisait pas au niveau de l'activité du champ magnétique. Selon Serge Koutchmy, « *Le champ magnétique apparaît très désordonné au niveau des pôles.* »

De plus, l'instrumentation d'Ulysse a mis en évidence l'existence d'étranges oscillations (de périodes de 10 à 20 heures) dues probablement à un type nouveau d'onde élec-

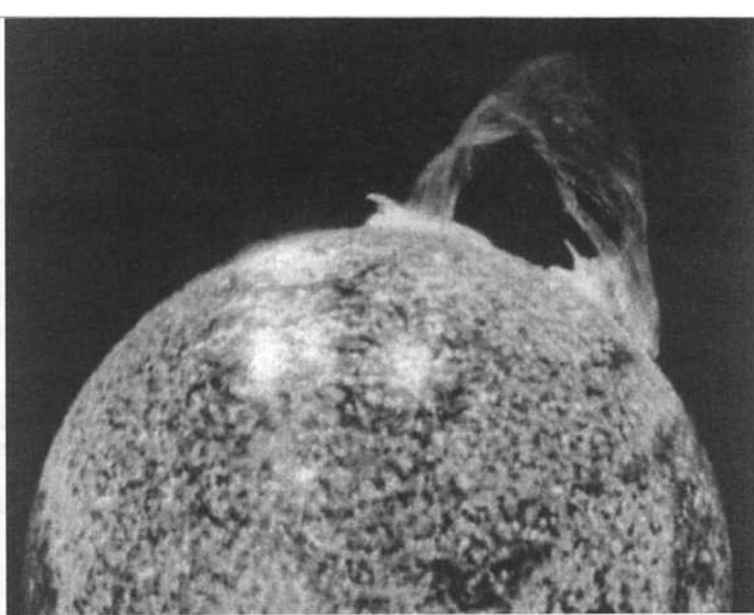
tromagnétique et dont la variabilité semble d'un mode extrêmement lent. Les spécialistes de l'ESA pensent que cette structure inattendue des champs magnétiques polaires solaires révèle l'existence d'un mécanisme de transfert encore inconnu du champ magnétique vers l'espace par le vent solaire, mais selon Koutchmy, « cette situation pourrait être la résultante de mouvements de convection dans les couches profondes du Soleil ». Toujours selon le même astrophysicien, « ceci justifie la relance des programmes mineurs sur SOHO, et pourrait nous amener à réviser nos modèles ». Au niveau de la Division des programmes scientifiques de l'ESA, cette situation pourrait conduire à resserrer les résultats des équipes travaillant sur Ulysse et SOHO. Ce dernier est comme « un aigle spatial embusqué », devant s'adapter aux « aspects imprévus » d'une proie stellaire pas si facile à piéger !

Toutes ces questions sont d'autant plus intrigantes que le bilan des connaissances acquises est étrange et déconcertant...

Remises en cause radicales ou graduelles ?

A proprement parler, la physique solaire ne saurait être considérée comme une discipline nouvelle, et il est indiscutable qu'aujourd'hui, les spécialistes savent à peu près modéliser la structure de notre étoile. Aussi, grâce à des travaux entrepris au milieu des années 50 par des pionniers comme Fowler, Hoyle et Burbidge, nous savons parfaitement modéliser le processus de base caractérisant le cœur du Soleil, à savoir la nucléosynthèse. Ce processus, au stade actuel de la vie de notre étoile, se traduit essentiellement par un mode continu de conversion de son hydrogène en hélium.

Le Soleil est essentiellement constitué de plasma (gaz ionisé), son centre est une véritable « fournaise » dont la température est estimée à 14 millions de degrés Kelvin et la pression se situe à quelque 300 milliards de fois celle de la Terre ! C'est cette nu-



La couronne solaire, composée d'un plasma de faible densité, est le siège de phénomènes étranges comme, par exemple, les éjections de matière qui seraient en relation avec le cycle d'ensemble de l'activité solaire.

cléosynthèse qui est à l'origine de la principale production d'énergie solaire et de chaleur. Le transfert de cette énergie et des produits résiduels des processus qui l'accompagnent vers les couches externes détermine l'émission des diverses composantes du spectre électromagnétique du Soleil. Le type de longueur d'onde est fonction des différents niveaux de profondeur et de couches. Alors que les rayons gamma « durs » se forment au cœur du Soleil lors des réactions de nucléosynthèse, le rayonnement visible se forme au niveau de la photosphère (couche la plus dense et la plus profonde de l'atmosphère solaire), tandis que les rayons gamma moins énergétiques, puis les X et les UV, se forment plus en profondeur, dans une zone située au-delà du tiers du rayon solaire et appelée *zone radiative*. Ici, la température tombe autour de 5 millions de degrés Kelvin, pour descendre aux alentours de 1 million de degrés Kelvin sur les parties externes de cette zone. Même en restant impressionnantes (la pression y est proche de 10 milliards d'atmosphères), ces conditions rendent impossibles les réactions de nucléosynthèse.

Ces faits démontrent quelles difficultés nous rencontrons pour élaborer des modèles cohérents en matière de physique solaire. A partir du moment où les réactions de conversion d'hydrogène en hélium, en vertu du principe de nucléosynthèse, ont été

effectuées, toute la suite du processus qui va nous mener progressivement vers les couches externes de l'atmosphère solaire (photosphère, chromosphère puis couronne interne et externe) n'est qu'une succession de transformations de niveaux d'énergie et de rayonnements, de changements de conditions d'une cou-

che à une autre, de transferts rencontrant eux-mêmes des obstacles dus aux hétérogénéités des différentes couches soumises elles-mêmes à des vitesses de rotation hétérogènes ; phénomènes auxquels il faut également associer de puissants champs magnétiques et des phénomènes d'oscillations qui semblent rebondir de la surface vers les profondeurs, comme si elles étaient bloquées par des sortes de « cavités creuses » invisibles...

De plus, l'idée que l'on se fait de la structure interne du Soleil, pour globalement cohérente qu'elle soit, reste encore imparfaite. Nous savons toutefois que la transformation, au cœur du Soleil, de l'hydrogène en hélium s'effectue selon deux processus bien identifiés : la chaîne proton-proton et le cycle de formation de l'hélium avec rôle catalyseur du carbone. Les deux modes jouent un rôle important au cœur du Soleil mais, au fur et à mesure que l'on s'en éloigne, et à partir d'une distance de 0,2 rayon, c'est la première variante qui devient dominante. En effet, la seconde, faisant appel à un processus plus complexe et à un nombre supérieur de phases, ne peut se produire efficacement que dans les conditions les plus extrêmes de température et de pression. C'est à la chaîne proton-proton que nous nous intéresserons donc. Celle-ci aboutit à la formation d'un atome d'hélium-4 (He_4) à partir de quatre noyaux (protons) d'hydrogène, avec apparition, aux stades intermédiaires, d'abord de noyaux d'un isotope lourd de l'hydrogène (le deutérium), ensuite émission de neutrons (particules de masse et de charge nulles) et de positons (antiparticules de l'électron, découvertes en 1932 par Anderson), puis de noyaux d'hélium (He_3), accompagnés d'une émission gamma très énergétique.

Premier problème de physique

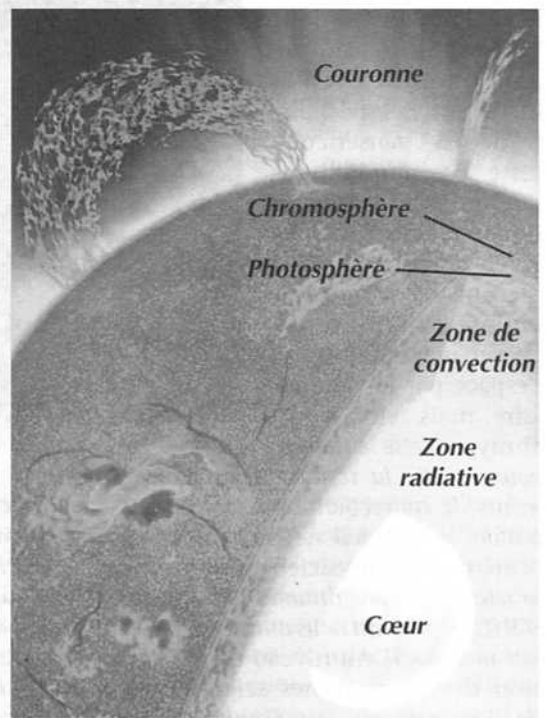
apparent : comment cette émission gamma va-t-elle parvenir à l'extérieur du Soleil, et quelles transformations va-t-elle subir au cours de sa longue traversée des couches externes ? Le niveau d'énergie auquel cette émission va, au prix d'énormes pertes, parvenir à sortir, les niveaux de dégradation et de transformation qu'elle va encore plus subir en faveur de composantes moins énergétiques du spectre électromagnétique (X, UV), peuvent être considérés comme des « révélateurs » de la nature des milieux traversés, tant sur le plan de la composition, du degré d'ionisation des composants du plasma, de la température, que de la pression. Toutefois, de nombreuses séries d'observations effectuées depuis une quinzaine d'années montrent que le physicien ne possède pas encore, loin de là, toutes les données nécessaires à son équation...

Autre problème qui intrigue les astrophysiciens et pour lequel il n'est pas sûr que SOHO soit parfaitement armé pour apporter des réponses définitives : celui du *déficit de masse*, dû à l'extraordinaire déséquilibre de masse entre le noyau d'hélium et les protons d'hydrogène lors de la nucléosynthèse, émettant des quantités colossales d'énergie. Comment traduire celle-ci au niveau du bilan thermique et radiatif du Soleil ? Peut-on faire un bilan explicatif des causes et du niveau des pertes ?

Du point de vue des deux problèmes que nous venons de soulever, il est bien évident qu'il nous est indispensable de mieux connaître ce qui se passe au-delà du cœur du Soleil, c'est-à-dire dans la zone radiative qui se situe de 0,3 à 0,7 rayon solaire. Nous avons déjà souligné le rôle qu'elle joue en matière de fractionnement des rayons gamma émis tout d'abord sur une plage moins énergétique et transformés en rayons X puis en UV. D'après les modèles solaires reconnus, cette zone a un rôle de transfert des gamma résiduels, des X et des UV vers les couches externes du Soleil. Là, de nouvelles étapes de fractionnement permettent aux produits résiduels de constituer les quanta de base thermiques et de rayonnement visibles éjectés en phase finale par le Soleil vers son environnement immédiat et vers le milieu interplanétaire. Nous sommes de nouveau face à un problème de physique qui pourrait avoir quelques conséquences sur

les phénomènes héliosismologiques : dans cette zone radiative, où la température et la pression tombent brusquement par rapport à ce qu'elles étaient au cœur du Soleil, il n'y a plus vraiment de production d'énergie, mais un « état épouvantable et stationnaire » (selon les dires d'un spécialiste de l'ESA) qui joue un rôle de « frein » dans le transfert d'énergie partant du cœur pour aller vers les parties externes du Soleil. Ceci explique probablement pourquoi cette énergie primaire met le temps inimaginable de 8 à 10 millions d'années pour atteindre la surface du Soleil. Mais tous les problèmes ne sont pas résolus pour autant. Ce ralentissement ne crée-t-il pas des phénomènes d'ondes de choc, et ces phénomènes ne sont-ils pas à leur tour « transférés » sur d'autres modes selon des « vibrations » peut-être non détectées mais qui pourraient jouer un rôle dans certains processus étranges qui caractérisent les zones se situant sous la surface ? Comment et par quels mécanismes de tels phénomènes, nécessairement de grande amplitude et requérant une observation continue pour leur détection, pourraient-ils se traduire au niveau des couches solaires externes, voire de la surface ?

Pour tenter de comprendre ces phénomènes de transfert, il nous faut également modéliser tout ce qui se passe dans la *zone de convection*, laquelle commence à 200.000 km sous la surface de notre étoile, et où la température passe de 2 millions de degrés Kelvin pour les parties les plus profondes, à 5700 K pour la base de la photosphère. Le fait que la vitesse de l'énergie ait déjà diminué au niveau de la zone radiative n'est pas alors sans conséquences sur ce qui se passe dans cette zone de convection. Le rayonnement est incapable d'y transporter les immenses flux d'énergie venant des profondeurs, et de les « tirer » seul vers la surface. Il se passe alors ce que nous connaissons fort bien en laboratoire sous le nom de *phénomène de convection*, où le processus de transport de chaleur est lié à un transport de matière avec formation concomitante de courants électriques. Sous les couches directement



observables de la photosphère, ces phénomènes se reproduisent, mais à une échelle considérable et avec de monstrueux champs magnétiques liés aux courants électriques. Les mouvements de la matière tirant cette énergie vers le haut entraînent, à leur tour, un effet induit par cette gigantesque association à l'échelle stellaire : l'énergie venue de la zone radiative chauffe alors les gaz de la matière solaire externe en provoquant des mouvements d'élévation, d'expansion mais aussi de dispersion, le tout associé bien sûr aux champs magnétiques, et aussi à quelque chose d'autre qui intéresse particulièrement les scientifiques qui ont conçu SOHO... En effet, tous ces mouvements, ascendants mais aussi descendants, ne semblent pas uniquement dus au chauffage des gaz par l'énergie venue de la zone radiative. D'autres processus plus complexes semblent également entrer en jeu, comme on le soupçonne depuis le milieu des années 60, avec la mise en évidence d'étranges « oscillations » d'une période assez régulière bien que légèrement variable (estimée autour de 300 secondes), et que les astrophysiciens n'hésitent pas à comparer, par analogie, aux ondes acoustiques de « tuyaux d'orgue ». C'est l'observation (accessible de visu avec un bon instrument) de la photosphère qui a conduit à cette conclusion car celle-ci, souvent considérée comme une « barrière » (elle nous empêche de voir ce qui se passe à l'intérieur du

Soleil), n'est pourtant pas suffisamment dense, avec son épaisseur de 500 kilomètres, pour masquer la surface visible de l'astre du jour. Ainsi, les astrophysiciens peuvent « interpréter » indirectement les processus naissant dans les couches plus profondes : l'existence de la zone de convection fut, par exemple, déduite de la découverte, au niveau de la photosphère, de structures comparées parfois à des *granules*, à l'existence éphémère (quelques minutes tout au plus) et dont le déplacement des raies spectrales, inverse par rapport aux structures d'aspect cellulaire qui les entourent, révèle ce phénomène de mouvement ascendant et descendant. De même, toujours en ce qui concerne la photosphère, certaines structures comme les *taches solaires* révèlent le rôle de frein qu'offrent certaines particularités locales du champ magnétique vis-à-vis des mouvements verticaux de la matière, car celles-ci apparaissent plus « froides » (4500 K à 6000 K) que le milieu environnant.

Ce phénomène explique-t-il aussi les fameuses ondes acoustiques détectées dans les années 60 ? En partie probablement, mais seulement en partie, car l'héliosismologie sur SOHO doit également prendre en compte d'autres modes détectés bien après le « mode à 300 secondes », lequel semble provenir de la zone de convection. Selon l'Américain Ulrich, il existerait dans cette zone des types de « cavités de résonance » rendant prisonnières les ondes de choc et acoustiques venues des profondeurs du Soleil qui, amorties à ce niveau, créeraient des oscillations « secondaires » à la surface. D'autres modes d'oscillations, de plus grande amplitude et entrant parfois en interférence avec les premiers, pourraient provenir de la zone radiative et être moins tributaires du mécanisme de ralentissement de la zone de convection. Pour l'Américain Glatzmaier, on pourrait imaginer de gigantesques structures en forme de cellules, glissant sous la surface solaire et perturbant également le champ magnétique. Selon les spécialistes de la physique solaire, il existerait en fait plusieurs modes d'oscillations allant des 300 secondes jusqu'à des modes dont l'amplitude serait de quatre à cinq mois !

Et la situation se complique encore car il existerait également au cœur du Soleil un processus de formation

d'ondes gravitationnelles mis en évidence, au début des années 80, par le Russe Valery Kotov (du Crimean Astrophysical Observatory de Nauchny), et étudié plus récemment par les Japonais Makita et Marimoto. Induites par les violents phénomènes de nucléosynthèse se produisant au cœur du Soleil, ces ondes seraient distribuées inégalement au sein de la matière ascendante par l'intermédiaire de structures relativement homogènes, comparables à d'énormes « gélules », et « poussées vers l'extérieur » jusqu'au niveau de la zone de convection dont les cellules, à l'image de ce qu'elles font déjà pour les ondes acoustiques, joueraient un rôle d'écran en ne laissant passer qu'une petite partie de ces ondes gravitationnelles. Celles-ci, en quelque sorte « gelées », ne pourraient atteindre la surface du Soleil, puis en sortir, que par l'intermédiaire de zones relativement homogènes sur le plan vertical et subissant moins que d'autres les mouvements de la matière selon un mode se situant entre 50 et 70 minutes. Les spécialistes qui ont conçu SOHO espèrent élaborer un meilleur modèle pour les couches solaires se situant sous la photosphère. Toutefois, il apparaît que l'étude de ces ondes gravitationnelles et celle des ondes acoustiques sont rendues compliquées par le phénomène spécifique de rotation interne du Soleil en fonction de la latitude, dont la nature est bien mise en évidence par le processus de rupture de lignes des spectres.

Des instruments scientifiques exceptionnels

Au niveau de la division des programmes scientifiques de l'ESA, on espère rien moins que de mettre au point un modèle fiable de la rotation des différentes couches du Soleil en fonction de la profondeur d'ici un an ! Véritable défi scientifique et technologique, car comme le précisent deux chercheurs du centre ESA-ESTEC : « Plus on s'enfoncé, plus il y a d'incertitudes ».

Dans ce but, il est impératif de disposer d'informations continues, ainsi que d'instruments de mesure pointus capables de détecter des os-

cillations extrêmement fines à la surface du Soleil. Les concepteurs de SOHO le savent et il suffit de décrire les instruments Golf, Virgo et SOI-MDI pour s'en convaincre !

Golf (Global Oscillations at Low Frequency), dont l'investigateur principal est le professeur Gabriel (IAS d'Orsay), fait en grande partie appel à tout un ensemble de techniques Doppler. Il doit étudier les mouvements de la matière entre la surface solaire et la photosphère, et essayer de les mettre en relation avec les impacts des ondes acoustiques et les variations à long terme du champ magnétique. Utilisant notamment un spectromètre à résonance sodium-vapeur pour l'étude de la diffusion de la lumière sur un support de gaz en mouvement, Golf est basé en fait sur ce que l'on connaît en laboratoire sous le nom d'*effet Tyndall*, à savoir la mise en mouvement, par le champ électrique, d'une onde électromagnétique des électrons liés au milieu d'impact. Ces électrons subissent alors des oscillations induites et réémettent un rayonnement électromagnétique d'accélération accompagné de diffusion par ce milieu. Les raies spectrales traduisent alors à la fois ce phénomène et les mouvements ascendants et descendants de la matière, permettant ainsi de les comparer aux processus d'oscillations venus des couches les plus profondes.

Virgo (Variability of Solar IR radiance and Gravity Oscillations) est destiné tout d'abord à observer, avec une haute sensibilité, les oscillations solaires sur deux modes au moyen d'un photomètre solaire à trois canaux mesurant les radiations spectrales sur 402, 500 et 862 nanomètres, et à fixer ces observations au moyen de l'instrument LOI (Luminosity Oscillations Imager). L'occasion était également très belle d'améliorer les données obtenues sur la *constante solaire*, habituellement définie comme une « unité de mesure de la densité de puissance transmise par le rayonnement solaire, passant en une minute par une surface de 1 cm² perpendiculaire à ce rayonnement ». Grâce à deux types de radiomètres (PMOG et CROM), instruments particulièrement adaptés pour analyser le rayonnement infrarouge, SOHO pourra, selon l'ESA, « mesurer cette constante avec tout au plus une marge d'erreur de 0,15% ». Cette mesure, effectuée par les observatoires terrestres grâce à des

instruments dénommés pyrrohéliomètres et spectrobolomètres, nécessite d'importantes corrections pour tenir compte de l'absorption atmosphérique et de la rotation de notre planète.

Golf et Virgo ont été conçus, selon l'ESA, avec « une accentuation particulière du domaine des très basses fréquences », et doivent également étudier les fameuses ondes gravitationnelles solaires détectées par Kotov et dont l'émission, selon la théorie de la relativité, est due « aux masses en mouvement de la même manière que des charges accélérées émettent des ondes électromagnétiques ». Pour les raisons que nous avons déjà exposées, au cœur et vers les parties externes des couches solaires, ces ondes monteraient et descendraient à la manière des vagues de l'océan. Pour les scientifiques impliqués sur Golf et Virgo, l'étude de ces ondes revêt un intérêt double :

- leurs mouvements pourraient révéler ce qui se passe à la fois au cœur du Soleil et au sein de sa structure, en apportant peut-être également des informations sur le problème des neutrinos solaires, dont la théorie prévoit qu'ils sont émis pendant les phases de nucléosynthèse. Il se pose, entre autres, la question du « déficit des neutrinos », non résolue pour l'instant.

- leur mode de propagation, lors de leur montée vers la surface, peut être considéré comme un bon indicateur des vitesses de rotation des différentes couches internes au fur et à mesure que l'on s'enfonce vers le cœur du Soleil.

Tout aussi intéressant et passionnant est le troisième ensemble d'expériences héliosismologiques embarqué par SOHO, à savoir SOI-MDI (Solar Oscillations Investigation-Michelson Doppler Imager), dont l'inspirateur et investigateur principal est Philipp Scherrer, scientifique de l'université de Stanford. Ce dernier est une sommité de l'astrophysique solaire, bien connu pour ses travaux sur les ondes gravitationnelles solaires et auteur d'une théorie selon laquelle ces ondes pourraient déclencher des oscillations de la surface solaire « selon dix à quinze modes différents ». Scherrer était d'ailleurs présent à Paris, lors de la dernière conférence de presse organisée par l'ESA sur SOHO au mois d'octobre 1995, et son exposé impressionna beaucoup les spécialistes et les journalistes scientifiques présents. Avec Golf, SOI-MDI est le

complément indispensable de Virgo : alors que la troisième expérience est plutôt basée sur la mesure de l'intensité des oscillations détectées, les deux premières ont été plus spécialement conçues pour en mesurer la vitesse. Toutefois, SOI-MDI peut véritablement être comparé à un « microscope électronique solaire » ou à une caméra capable de capter des mouvements se développant sur une échelle de temps infime et indétectables par des appareils ordinaires, un peu à la manière des appareils terrestres conçus pour décomposer en phases les battements des ailes des oiseaux ou des insectes. Un des objectifs principaux de cet appareillage, doté de trois programmes d'observations spécifiques, consiste à essayer de mettre en évidence les modifications ultrabèves des lignes de visibilité de la supergranulation créée par les ondes sonores et gravitationnelles à la surface du Soleil et les composants longitudinaux du champ magnétique. Grâce à SOI, les astrophysiciens disposeront pour la première fois d'un instrument d'étude permanent du champ magnétique (programme Magnetic Field Programm) avec l'objectif avoué d'établir plusieurs magnétogrammes par jour.

Travaillant également en parallèle avec Golf, SOI-MDI opérera dans cette configuration comme un détecteur et un sondeur tridimensionnel, qui contribuera à améliorer les modèles explicatifs des conditions internes à l'origine de l'activité magnétique du Soleil. Il servira aussi à multiplier les données sur les distributions radiales de densité, de pression et de température, sur les variations de la rotation solaire en profondeur et en latitude.

On peut donc s'attendre à des percées scientifiques car, comme le déclare fièrement Roger-Maurice Bonnet, directeur des programmes scientifiques de l'ESA, « de son cœur interne jusqu'aux parties extérieures de l'atmosphère du Soleil, c'est la première fois que nous avons un tel instrument ».

L'irritant problème de la température de la couronne

Le monde solaire, nous le comprenons mieux maintenant, se caracté-

rise au plus haut point par des *transferts*, d'une couche à l'autre, de matière, de rayonnements et d'énergie, selon des processus à interactions multiples. Donc, chaque phénomène qui se produit dans quelque zone que ce soit dépend en grande partie de processus ayant pris naissance au cœur du Soleil.

La couronne, partie la plus externe de l'atmosphère solaire, qui commence entre 15.000 et 20.000 kilomètres au-dessus de l'interface photosphère-chromosphère, pour s'étendre de façon irrégulière jusqu'à 10 rayons solaires, à la manière de monstrueux « battements cardiaques », n'échappe pas non plus à ce type de processus induit. Les oscillations de surface dues aux ondes acoustiques jouent certainement un rôle de transmetteur d'une fraction très minime de ces ondes vers la couronne. D'autre part, des jets de matière chromosphériques à brève durée de vie (quelques minutes), dénommés spicules, transmettent le plasma solaire vers la couronne captuse à des vitesses atteignant parfois plusieurs dizaines de kilomètres à la seconde. Il arrive même, sans que l'on puisse encore inscrire ce phénomène dans un modèle satisfaisant, que l'échange se produise également dans le sens inverse !

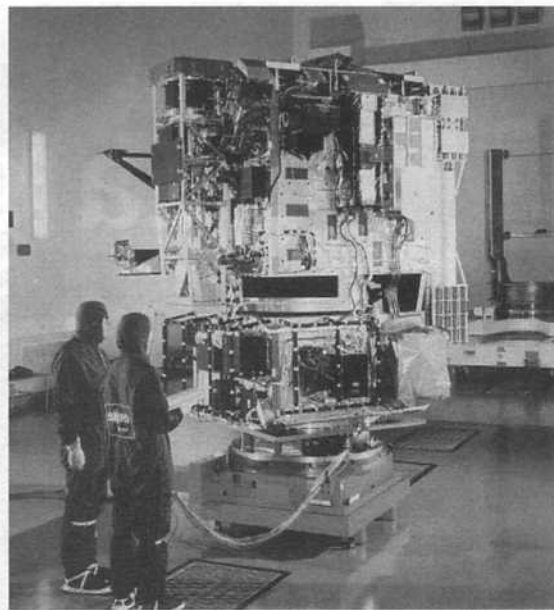
C'est à partir de la couronne que sont éjectés le fameux vent solaire et le champ magnétique qui lui est généralement associé dans le milieu interplanétaire. Maintenant, cette couronne pose un véritable problème : sa température (près de 2 millions de degrés Kelvin), est considérablement plus élevée que celle des couches atmosphériques les plus basses ! Quelle est la cause de ce phénomène ?

Structurée elle-même en parties diverses — couronne interne K, couronne « intermédiaire » et couronne externe F, auxquelles il faut ajouter une couronne équatoriale composée de poussières observables seulement en infrarouge — la couronne ne nous est accessible visuellement qu'avec des télescopes disposant d'un coronographe (instrument inventé en 1930 par Bernard Lyot) ou lors des très rares éclipses totales. Celle de juillet 1991 a permis d'observer pratiquement toute la couronne solaire (dite dans ce dernier cas White Light Corona) et également, par les données recueillies, de contribuer à la préparation de la mission SOHO.

Comme l'écrit Serge Koutchmy, le grand spécialiste français de la physique coronale : « Grâce à la disponibilité d'un flux étendu de radiations dans le domaine optique, les éclipses solaires totales constituent de rares occasions de pouvoir faire appel à des méthodes sophistiquées permettant d'analyser toutes les parties de la couronne fortement structurées en lumière blanche ». Toutefois, SOHO va transformer ces « rares occasions » en observations continues, et cela pendant vingt ans... En effet, la couronne va être littéralement « épluchée », « disséquée » par quatre coronographes, dont un opérant en UV.

Composée d'un plasma de faible densité, cette couronne est le siège de phénomènes aussi étranges que ceux qui se produisent en profondeur dans le Soleil. Elle comporte en son sein des structures (jets coronaux, boucles coronales, trous coronaux) dont la configuration serait liée à des champs électriques et magnétiques et même de bien curieux « plasmoides » détectés en 1991. On peut également y observer des éjections de matière (dénommées Coronal Mass Ejections) qui seraient en relation avec le cycle d'ensemble d'activité solaire. Deux de ces types de structures intéressent particulièrement les astrophysiciens, à savoir les « trous coronaux » et les « jets coronaux » qui, toujours selon Koutchmy, « révèlent à la fois l'existence de phénomènes à petite et grande échelle, et dont l'étude ouvre des opportunités pour la connaissance des champs magnétiques solaires », avec « toutefois de temps à autre des événements de rupture perturbateurs comme les éjections coronales ».

Pour l'étude de ces structures, il est important pour SOHO d'effectuer des mesures précises de densité et de modélisation des courants qui les parcourent (eux-mêmes modifiés par le milieu coronal) et contribuent à leur donner la forme que nous leur connaissons. Ce plasma raréfié, étudié par des spectromètres, se révèle également composé d'éléments chimiques plusieurs fois ionisés (fer, nickel, calcium), phénomène révélateur d'un niveau de température extrême. En tous cas, il n'est possible de l'étudier en lumière visible que dans la basse couronne car, au-delà de 1,5 rayon solaire (distance largement dépassée par les jets coronaux), les coronographes traditionnels se révèlent moins performants. Dès lors, ce



SOHO en cours d'intégration chez Matra Marconi Space. Nous pouvons apprécier l'importante charge utile de SOHO.

plasma devient plus intéressant à étudier en X, UV et EUV puisque, sur ces longueurs d'onde, la densité compte moins du point de vue des possibilités d'observation que la température et la vitesse des composants. On ne s'étonnera donc pas que, sur SOHO, quatre ensembles d'instruments (SUMER, CDS, EIT et UVCS), accompagnés de caméras CCD, opèrent soit en UV soit en EUV. Le cinquième instrument Lasco, équipé de trois coronographes, apparaît plus « traditionnel » mais à fort potentiel technologique (ces coronographes étant équipés de capacités spectroscopiques) puisqu'il pourra masquer les « effets indésirables » aux observations sur trois modes allant de 1,1 à 3 rayons solaires, 1,5 à 6 rayons solaires et 3 à 30 rayons solaires.

En ce qui concerne les *trous coronaux*, soupçonnés d'être la source des courants de vents solaires à haute vitesse, une des préoccupations des concepteurs de SOHO est de comprendre pourquoi ces courants sont accélérés. L'UVCS (Ultraviolet Coronagraph Spectrometer) et le CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer), instrument consistant principalement en une association entre un télescope dit de « type Wolter 2 » et un spectromètre EUV à incidence rasante, effectueront pour ce faire des analyses à haute résolution spatiale, pour modéliser ce qui se passe au niveau de ces trous.

Toutefois, c'est cette température anormale de la couronne qui intrigue le plus les astrophysiciens impliqués sur SOHO. Elle exerce sur le vent solaire une forme de pression anti-

gravité qui l'accélère jusqu'à des vitesses supersoniques ! Aucun des processus de transfert et d'échange identifiés caractéristiques du Soleil ne peut rendre totalement compte de ce phénomène largement révélé en mode radio. Aucun processus de conservation et d'accumulation de l'énergie ne semble capable, pour l'instant, d'offrir une explication vraiment satisfaisante. On parle de processus dus à un phénomène d'accélération des ondes sismiques, de processus magnétohydrodynamique et de conversion d'énergie magnétique liés parfois à des événements locaux comme des « explosions locales » révélées par des satellites opérant en ultraviolet. En une phrase, toutes les conditions sont réunies pour que ce soit la physique en général, et pas uniquement la physique solaire, qui fasse un bond grâce à SOHO, et on peut même s'attendre à quelques retombées dans des domaines protégés de recherches appliquées... ■

Bibliographie

1. ESA, *Bulletin* 84, décembre 1995 : contient cinq articles de haut niveau rédigés par des spécialistes de l'ESA impliqués sur SOHO.
2. S. Koutchmy, « Streamer Eclipse Observation », *Coronal Physics from Eclipse Observation*, IAP, 404, décembre 1992.
3. V.A. Kotov et S. Koutchmy, « On Sunspot and Facular Contrast Variations near 2 or 4 microns », IAP, 389, juillet 1992.
4. S. Koutchmy, R.W. Noyes, J.C. Vial et quatorze autres auteurs, « CFHT Eclipse Observation of the Very-Fine Scale Solar Corona », IAP, 425, octobre 1993.