
Chronique Spatiale

La fin de cette année voit une intense activité spatiale. Le Télescope spatial Hubble vient de se surpasser en livrant les plus fantastiques photos qu'il ait jamais obtenues. Ces découvertes sont discutées dans la rubrique de « l'astronomie dans le monde ».

Deux très importants satellites astronomiques devraient avoir été lancés lorsque paraîtront ces lignes. Il y a bien sûr ISO dont il a déjà été question dans nos colonnes, et dans lequel l'Institut d'Astrophysique de Liège joue un rôle non négligeable (voir les articles de Pierre Bastin dans Le Ciel de septembre, pp185, 265 et 273). Le lancement réussi, et un nouveau communiqué de presse de l'ESA, nous donnent l'occasion d'y revenir, avec de nou-

velles informations. De son côté, la NASA doit lancer le satellite SOHO, qui aura un travail considérable à effectuer en observant le Soleil.

Galileo, après un très long périple, et de nombreuses aventures, atteint enfin son but, la planète Jupiter. La sonde qui s'en est éjectée va plonger dans l'atmosphère de la planète géante, tandis que Galileo se mettra en orbite.

Enfin, l'ESA annonce la publication prochaine des résultats de la mission Hipparcos, l'arpenteur de l'univers. Moins spectaculaire et médiatique que le HST, puisqu'il ne prend pas de photos, Hipparcos a effectué un travail fondamental d'astronomie qui remettra certaines idées en question, en précisera d'autres, et en suscitera de nouvelles.

* * *

La moisson d'Hipparcos

*Basé sur des documents
de l'ESA*

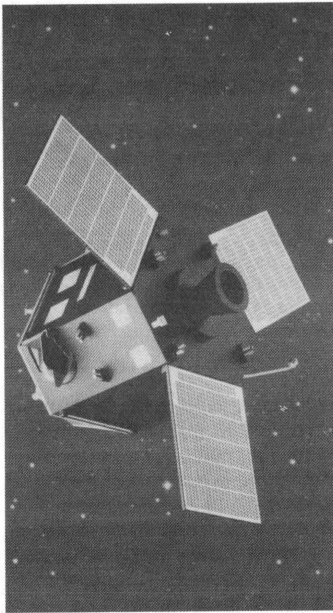
Hipparcos, l'une des missions scientifiques les plus remarquables de l'Agence spatiale européenne, a franchi la semaine dernière une nouvelle étape de son parcours spectaculaire lorsque le groupe de scientifiques européens responsable du projet a rencontré à Paris des représentants de l'Agence pour examiner dans le détail son avancement scientifique. Deux ans tout juste après la fin des activités du satellite, ils ont annoncé que le long et délicat travail d'établissement du catalogue le plus précis et le plus exhaustif des positions d'étoiles était achevé à leur satisfaction mutuelle.

C'est en 1980 que les principaux conseillers scientifiques de l'Agence spatiale européenne lui ont recommandé le projet Hipparcos. Son

unique objectif était de répondre à la question, apparemment la plus élémentaire, et pourtant l'une des plus délicates de toute l'astronomie : dans quelles directions se situent les différentes étoiles constituant notre Voie lactée? Quel est leur éloignement? Et à quelle vitesse se déplacent-elles dans les immensités de l'Es-space?

Un milliard de bits de données ont été acquis par le satellite au cours des trois années de sa vie opérationnelle. Après un lancement impeccable par une Ariane 4 en août 1989, le moteur d'apogée du satellite refusa de s'allumer, si bien que celui-ci a dû mener ses observations scientifiques à partir d'une orbite qui n'était pas la bonne. Les ingénieurs de

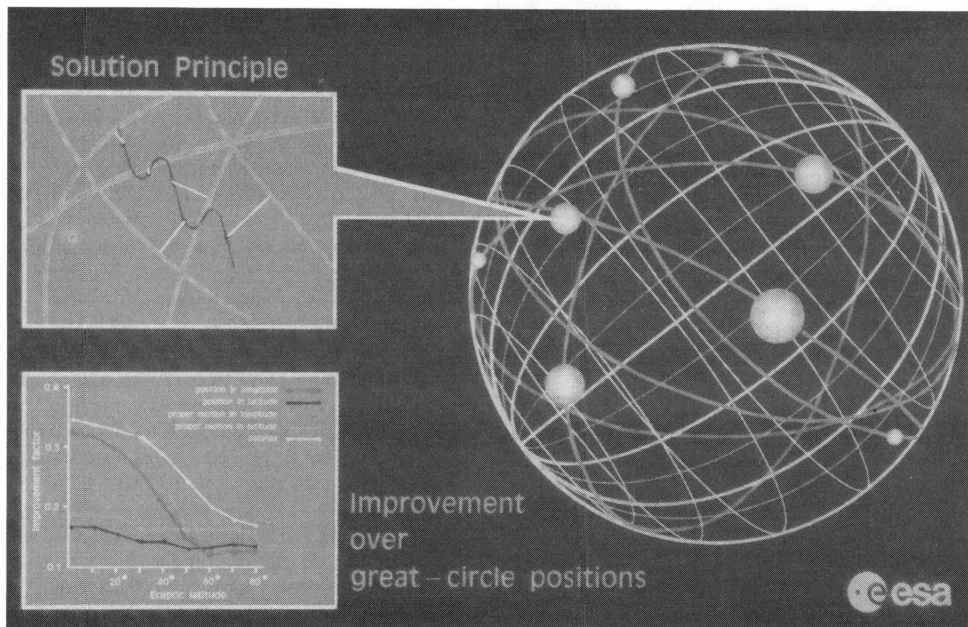
l'ESA et de l'industrie, secondés par des chercheurs, une station sol de la Nasa et un puissant soutien du monde politique et scientifique, refusèrent résolument d'abandonner la mission et firent preuve d'ingéniosité en mettant au point des systèmes de commande encore plus complexes pour garder le contact avec Hipparcos. C'est ainsi qu'entre le satellite et l'ESOC, le Centre européen des opérations spatiales, un flot ininterrompu de données scientifiques de haute qualité s'est écoulé jusqu'en août 1993 et que, dès les jours suivant le lancement, des ordinateurs surpuissants ont digéré ce gigantesque trésor et ont rassemblé les informations recueillies pour constituer le puzzle le plus complexe de l'histoire de l'astronomie (voir *Le Ciel*, vol. 53, 1991, page 56).



Le satellite Hipparcos. On distingue les panneaux solaires, les antennes assurant le contact avec le centre de contrôle, l'ouverture du télescope, ainsi que le moteur qui tomba en panne au moment fatidique.

Pendant des milliers d'années, les astronomes avaient décrit la forme du ciel comme une sphère céleste imaginaire, la direction de chaque étoile étant donnée par des mesures angulaires semblables à la longitude et à la latitude des géographes. Mais les étoiles se déplacent et la Terre elle-même est une plateforme peu stable et en mouvement. Son atmosphère trouble l'image des étoiles et la force de gravité provoque sur les télescopes des fléchissements minimes pendant qu'ils balayent le ciel. De plus, les observatoires terrestres ne peuvent étudier que des secteurs limités du firmament, si bien qu'essayer de constituer un panorama complet avec les observations au sol pose des problèmes insurmontables. L'ingéniosité des chercheurs travaillant sur l'astronomie de position, ou astrométrie, les a incités, il y a près de trente ans, à proposer de procéder à ces observations dans l'environnement relativement bénin de l'espace.

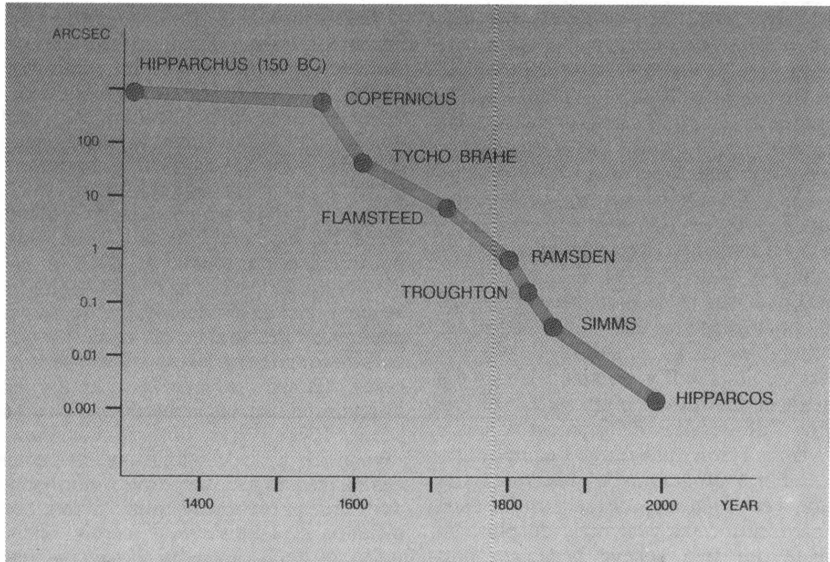
Hipparcos, selon les normes actuelles, est un satellite de dimension moyenne dont le télescope de trente centimètres observe dans le domaine visible. Mais on a dit de lui que c'était l'engin le plus imaginaire de la brève histoire de l'astronomie spatiale. Les espoirs placés en lui ont été d'ailleurs comblés. Dans la longue histoire de l'observation du ciel, il tient sa place à côté d'Hipparque, le Grec du III^e siècle av. J.-C., et de Tycho Brahe, le Danois du XVI^e siècle de notre ère, qui ont tous deux bouleversé la perception que l'homme a de l'univers. Les positions obtenues avec le satellite Hipparcos sont plus fines que le millionième de degré et près de mille fois plus précises que les positions établies traditionnellement avec des moyens au sol. Cette précision permet de mesurer directement la distance qui nous sépare des étoiles. Alors qu'il a fallu aux astronomes 250 ans entre la première tentative de mesure de la distance d'une étoile et la première mesure effectivement obtenue, la mission Hipparcos de l'Agence a révolutionné cette longue, pénible mais fondamentale tâche en établissant avec précision les distances et mouvements propres de plus d'une centaine de milliers d'entre elles.



La sphère céleste est considérée dans son ensemble pour fournir une solution finale aux déterminations de positions. L'encart en haut à gauche montre le chemin d'une étoile et les mesures projetées sur les grands cercles balayés par le satellite.

Le procédé de mesure consiste en une triangulation progressive des étoiles dans l'ensemble du ciel par le satellite, qui trace ainsi une carte du ciel d'une façon très proche des travaux du géomètre procédant à un levé de terrain par triangulation entre les sommets de collines. Mais les angles observés sont beaucoup plus faibles : la précision obtenue dans les données du catalogue Hipparcos est telle qu'elle permettrait de distinguer les deux bords d'une pièce de monnaie placée de l'autre côté de l'Atlantique. Les résultats d'Hipparcos vont donner aux chercheurs des détails qu'ils attendaient depuis longtemps sur notre position dans la Voie lactée. La plupart des étoiles visibles à l'œil nu sont dans une large mesure des compagnons du Soleil, décrivant une marche triomphale autour du centre de la

Galaxie; leur voyage est si long qu'il faut à chaque étoile 250 millions d'années pour le mener à terme, laps de temps dont la longueur est difficile à concevoir sinon que notre galaxie n'a connu que quelques révolutions depuis sa formation, ou encore que les dinosaures peuplaient notre planète il y a moins d'un quart de tour de cela! Hipparcos a mesuré les détails de cette procession cosmique et permettra de débrouiller les mouvements des étoiles prises individuellement; quelles sont celles qui sont relativement proches de notre Soleil? Ou celles qui sont des étoiles massives fortement lumineuses mais extrêmement lointaines? Celles qui décrivent une orbite proche de celle de notre Soleil? Et celles qui s'en éloignent des centaines de fois plus vite que la vitesse du son?



Evolution de la précision, en secondes d'arc, des mesures de positions stellaires depuis Hipparque.

Après huit années d'études et de travaux, Matra Marconi Space, Alenia Spazio et leur trentaine de partenaires industriels hautement qualifiés ont livré à l'ESA le satellite Hipparcos en respectant le calendrier et les coûts. A l'exception de son moteur d'apogée, le satellite et tous ses instruments ont fonctionné de façon impeccable — en fait ils ont dépassé toutes les attentes — malgré les dures conditions auxquelles les a soumis une orbite imprévue. Le responsable du projet pour Matra Marconi Space, Michel Bouffard, a marqué sa satisfaction lors de l'achèvement du catalogue Hipparcos en remarquant que « ce projet est incontestablement un des plus beaux exemples d'une collaboration intense et fructueuse entre l'ESA, l'industrie et le monde scientifique. »

Il faudra encore quelques mois avant que le catalogue Hipparcos, et son compagnon le

catalogue Tycho de plus d'un million d'étoiles, puissent paraître. « Nous avons à mettre dans le catalogue achevé la totalité des étoiles doubles et toutes les mesures de magnitude qui ont été acquises », explique le Dr Michael Perryman, le chercheur de l'ESA qui travaille avec l'équipe scientifique du satellite, « mais des délais supplémentaires nous ont été consentis pour cette raison ». Les chercheurs qui ont formulé les éléments du programme d'observations du satellite et ceux qui ont été associés à l'analyse des données seront les premiers à avoir l'occasion de comprendre ce que celles-ci signifient, d'un point de vue astronomique, lorsque les résultats leur seront communiqués fin mars 1996. Le produit final de la mission Hipparcos, un monumental catalogue en quatorze volumes dont chaque

page fournit des résultats astronomiques d'une précision sans précédent, sera publié par l'ESA et les équipes scientifiques fin mars 1997.

Les quatre chefs des équipes scientifiques européennes qui ont participé au projet depuis les premiers jours ont fait savoir que les catalogues Hipparcos et Tycho avaient passé avec succès tous les tests qu'ils avaient été capables d'imaginer pour s'assurer de la qualité des données. Le Pr Jean Kovalevsky (Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse, France), le Dr Lennart Lindgren (Observatoire de Lund, Suède), le Pr Erik Hog (Observatoire de Copenhague, Danemark) et le Dr Catherine Turon (Observatoire de Paris-Meudon), ainsi que d'autres représentants scientifiques des États membres de l'Agence, sont ravis des derniers résultats. « Il y aura dans les années qui viennent des milliers d'utilisateurs directs et indirects des résultats d'Hipparcos », nous a dit Madame Turon qui a dirigé l'équipe chargée d'établir le programme d'observations du satellite, « et ils auront accès non seulement à un magnifique catalogue, mais de plus, un catalogue qui sera achevé beaucoup plus rapidement que nous ne l'avions espéré avant le lancement ». Une dizaine de milliers de systèmes d'étoiles doubles connus ont été observés par Hipparcos, et près de 10 000 systèmes supplémentaires ont été découverts. Hipparcos promet de mesurer les masses des étoiles de tels systèmes binaires, constitués de deux étoiles qui gravitent l'une autour de l'autre. Cette information est impossible à établir par tout autre moyen. « Bon nombre de nos collègues scientifiques qui ont attendu patiemment les résultats de cette mission seront stupéfaits par le contenu du catalogue final », a déclaré le Pr Hog, à l'origine du concept du catalogue Tycho, et l'un des éléments moteurs de la mission.

Dans des milliers de cas, les étoiles observées par Hipparcos sont variables. Il s'agit alors d'étoiles dont l'émission lumineuse varie avec le temps, variations qui ont été mesurées avec précision par le satellite. Les astronomes se servent d'un sous-ensemble d'étoiles variables dénommé les Céphéides pour mesurer la distance qui sépare notre galaxie des galaxies plus lointaines. La mesure par Hip-

parcos de la variabilité et des distances étayera les résultats des Céphéides pour l'estimation de la dimension et de l'âge de l'Univers.

L'achèvement du catalogue Hipparcos en décembre, lorsque le catalogue existant aura été complété par des informations sur les étoiles doubles et les étoiles variables, doit coïncider avec la publication des premiers articles scientifiques (dans le journal européen *Astronomy and Astrophysics*) qui expliqueront de façon rigoureuse ce qui a été fait, et ce que ces résultats ont des chances de représenter. D'une façon générale, la précision de la mesure de distance de tout type d'étoile permet d'établir avec précision sa luminosité intrinsèque. Dans ces conditions, les théories sur la naissance, l'évolution chimique, les changements de couleur, les modifications de masse et de diamètre des étoiles seront mises à l'épreuve d'une façon beaucoup plus rigoureuse. Hipparcos a observé des étoiles à rayonnement X, des étoiles géantes émettant des nuages de gaz, des étoiles moribondes et des étoiles récemment nées : objets dont la distance et l'émission d'énergie relevaient jusqu'ici de la devinette. Pour compléter le tout, les mouvements propres des étoiles observés par Hipparcos animent le paysage familier de la voûte céleste. Chacune des étoiles qui paraît si tranquille dans la nuit suit son bonhomme de chemin dans la Voie lactée, et cet itinéraire trahit son origine ainsi que l'architecture et la dynamique de la Galaxie.

Pour Jean Kovalevsky, qui a été associé à toutes les étapes de la conception et de l'exécution de la mission, « certaines personnes ont dit qu'Hipparcos, c'était trop difficile pour l'Europe. D'autres ont jugé la mission fastidieuse comparativement à d'autres sujets plus nettement astrophysiques. Les critiques de la première catégorie ont déjà mangé leur chapeau. Je peux vous promettre que les autres seront eux aussi confondus lorsqu'ils verront l'étendue des retombées de nos résultats sur toutes les branches de l'astrophysique, de la science des planètes à la cosmologie ».

Hipparcos a évalué la plupart des étoiles les plus lumineuses situées à moins de 250 années-lumière de notre Soleil et donnera une image vivante de notre environnement stellaire. Les experts étudieront le contenu du catalogue pour rechercher quelles étoiles

semblent passer à proximité du Soleil. Certaines étoiles sont nées dans des amas et conservent la mémoire de leur origine commune dans un mouvement partagé au sein de la Galaxie. Dans des amas ouverts comme les Pléiades, les étoiles qui les composent sont restées très proches les unes des autres. Partant des mouvements d'étoiles dans des douzaines d'amas ouverts, Hipparcos pourra désormais établir leurs âges ainsi que leur parcours et leur vitesse à l'intérieur de la Galaxie. Pour les étoiles s'approchant ou s'éloignant du centre de la Galaxie, le catalogue contient leurs vitesses relatives sur leurs orbites à des distances différentes. Le satellite a également observé des étoiles qui font des excursions temporaires au-dehors du disque relativement plat de la Voie lactée, ainsi que des étoiles du halo décrivant des orbites en toute indépendance par rapport à ce disque. Des informations sur la masse cachée de la Galaxie devraient pouvoir être déduites des données du catalogue Hipparcos.

Les articles qui seront publiés dans trois mois contiendront déjà quelques résultats surprenants par leur nouveauté. Certaines mesures constituent l'un des meilleurs tests de la théorie de la relativité générale d'Einstein qui aient pu être menés à ce jour. En observant la lumière d'étoiles défléchie de son trajet rectiligne par la présence de la masse de notre Soleil, les scientifiques d'Hipparcos ont pu démontrer que les prévisions de la relativité générale sont exactes au millième près. D'autres chercheurs ont déjà pu aligner le système de référence astronomique établi dans la gamme des longueurs d'ondes radio avec celui d'Hipparcos. Ces deux référentiels peuvent être superposés avec une grande précision et, pour la première fois, la façon dont les émissions optique et radio sont reliées dans les différentes sources peut être étudiée avec précision. Mais la plus grande surprise vient d'un recensement des voisins les plus proches de notre Soleil : on a pu démontrer grâce à la remarquable précision des mesures d'Hipparcos que bon nombre d'étoiles dont on pensait

jusqu'ici qu'elles se situaient seulement à quelques années lumière de notre Soleil sont en fait beaucoup plus éloignées.

« Le catalogue Hipparcos ouvre la voie du XXI^e siècle à l'astronomie fondamentale » a déclaré le Dr Lennart Lindgren, chef de l'une des équipes de réduction des données, et l'une des têtes pensantes d'une mission d'astrométrie qui ferait suite à Hipparcos et que les conseillers scientifiques de l'ESA examinent actuellement. La précision du millionième de degré fournie par Hipparcos pourrait être dépassée par une expérience qui semble capable d'atteindre une précision du milliardième de degré et, dans ce cas, pour des dizaines de millions d'étoiles. Il s'agit d'un domaine scientifique où la créativité est mûre pour être mise en valeur. Une telle mission ne se contenterait pas d'éliminer les derniers éléments d'incertitude quant à notre connaissance des distances et de la dynamique de notre Galaxie. En examinant l'apparition de planètes extra-solaires autour de toutes les dizaines de milliers d'étoiles situées à quelques centaines d'années-lumière de notre Soleil, elle constituerait un progrès remarquable dans notre connaissance des planètes gravitant autour d'autres étoiles et de leur processus de formation. Et si l'on croit aujourd'hui que la matière noire, invisible dans l'espace, représente 90% de la masse totale de l'Univers, on ne sait presque rien sur sa nature physique : se trouve-t-elle dans des trous noirs, des planètes ou des particules élémentaires inconnues? C'est là l'une des plus importantes questions de l'astronomie pour les décennies à venir et c'est dans ce domaine qu'une future mission d'astrométrie spatiale devrait probablement avoir le plus grand retentissement puisque les images du mouvement des étoiles révèlent la répartition de la matière dans l'espace.

Au moment où la communauté scientifique va puiser dans les trésors de la mission Hipparcos, le potentiel étonnant de l'astrométrie spatiale à des niveaux de précision encore plus élevés est un fait mobilisateur d'intérêt parmi les jeunes générations d'astronomes du monde entier.

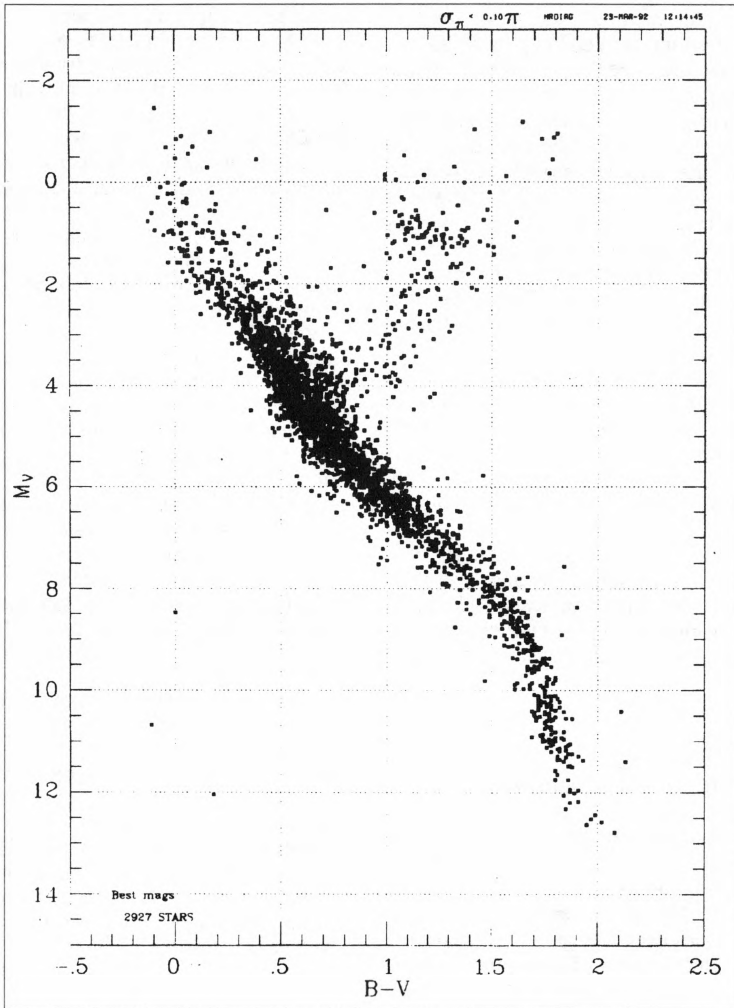


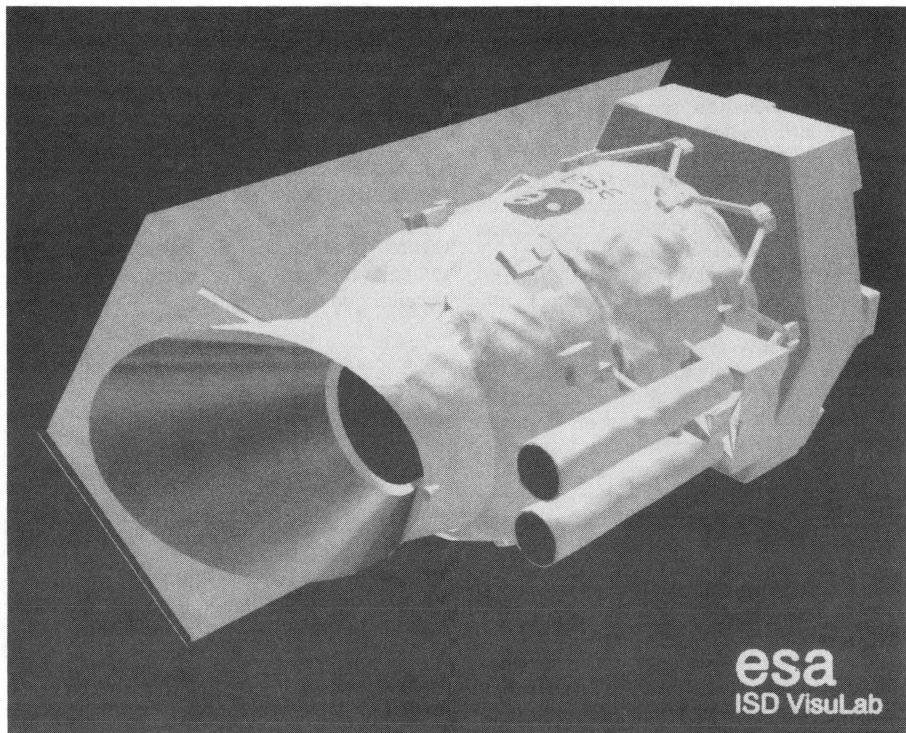
Diagramme de « Hertzsprung-Russel » basé sur les premiers résultats du satellite Hipparcos. Ce diagramme présente l'éclat intrinsèque des étoiles (dont le calcul demande une bonne connaissance de la distance) en fonction de leur couleur. Les données du satellites précisent les différents groupes stellaires.

ISO, Explorateur unique de l'univers invisible

*Basé sur des documents
de l'ESA*

Au moment même où nous écrivons ces lignes, la fusée européenne Ariane 44P met sur orbite un nouveau satellite astronomique. ISO, l'Infrared Space Observatory, très attendu des astronomes du monde entier, est le premier véritable observatoire spatial infrarouge. Il a été construit et lancé sous la responsabilité de l'ESA. Il s'agit d'un projet conduit depuis 1983 par l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre de son programme scientifique Hori-

zon 2000. Il représente un investissement de 650 millions d'Ecus, ce qui couvre la réalisation du satellite, le lancement et l'exploitation en orbite. Les instruments scientifiques ont été fournis séparément par un groupe de onze pays européens. La NASA et le Japon collaboreront aux opérations au sol en échange du droit d'utiliser le télescope à raison d'une demi-heure par jour chacun en moyenne.



L'engin se présente sous la forme d'un cylindre blanc de 3,5 mètres de diamètre et de 5,3 mètres de longueur. L'intérieur abrite le télescope proprement dit, les quatre instruments scientifiques, les ensembles électroniques, les alimentations de puissance et les systèmes de communication radio. Sur le côté, de larges panneaux solaires assurent la fourniture de 600 watts de puissance électrique et jouent un rôle de baffle protecteur contre le rayonnement solaire. (© ESA)

L'engin aura pour tâche de pointer longuement les sources célestes et de les étudier avec une sensibilité et une précision inégalées. Il les observera dans la lumière invisible et froide de l'infrarouge, un rayonnement encore très largement inexploré.

Ainsi, une vision entièrement renouvelée de l'Univers sera acquise. Des planètes proches aux quasars les plus lointains, en passant par la formation des étoiles, la matière noire cosmologique et les galaxies sur-brillantes : les répercussions sur la connaissance devraient être importantes et significatives dans de nombreux domaines de l'astrophysique.

« Le lancement du télescope spatial ISO va consacrer l'aboutissement de douze années d'efforts intenses déployés pour mettre au point cet instrument d'une puissance et d'une précision inégalées », déclare Roger Bonnet, directeur du programme scientifique de l'ESA. « Gageons que celui-ci permettra en retour à l'astronomie européenne, et mondiale, d'effectuer une incursion sans précédent dans l'univers particulièrement riche et fécond que recèle le ciel infrarouge. »

Car c'est bien une nouvelle étape que l'astronomie s'apprête à franchir. Jusqu'ici en effet, l'observation infrarouge s'est toujours heurtée à un double obstacle. D'abord, le rayonnement infrarouge est de nature thermique, calorifique. Autrement dit, tout corps non absolument froid émet naturellement ce type de « chaleur rayonnante » ou de « chaleur obscure ». Conséquence : aux longueurs d'ondes correspondantes, tous les télescopes, les détecteurs et l'atmosphère terrestre paraissent briller spontanément... Observer le rayonnement infrarouge est équivalent à essayer d'observer les étoiles en plein jour avec un télescope un million de fois plus lumineux que les astres visés!

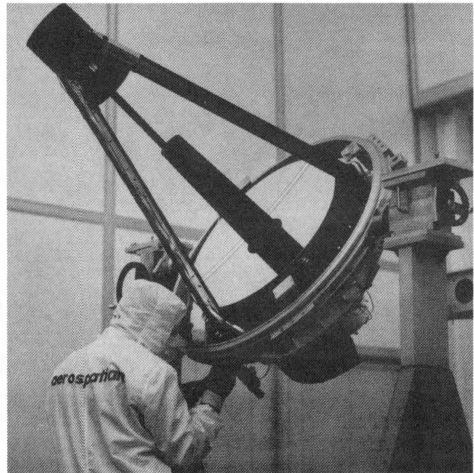
En outre, l'atmosphère est partiellement ou totalement opaque à la lumière infrarouge. Il est donc très tentant d'observer depuis l'espace, au-dessus des couches d'air terrestre et avec un télescope maintenu à très basse température.

Le premier, et le seul, satellite astronomique infrarouge à avoir été lancé en orbite avant ISO est l'InfraRed Astronomical Satellite (IRAS) britannico-néerlando-américain qui a cartographié et inventorié le ciel pendant dix mois

en 1983. Un premier coin de voile était ainsi levé. La scène est découverte mais il reste à regarder chaque personnage, chaque objet.

Pour cela, l'astronomie infrarouge se heurte à un autre handicap majeur : la détection même de la lumière. Bien que le rayonnement infrarouge fût découvert en 1800 (dans le spectre solaire), il a fallu attendre la Seconde Guerre mondiale pour qu'apparaissent des capteurs photoélectriques sensibles à ces longueurs d'ondes. Et IRAS lui-même était dépourvu des matrices multidimensionnelles qui lui auraient permis d'enregistrer de véritables images : il construisait les siennes point par point, ligne par ligne.

Aussi, l'un des grands apports d'ISO sera d'embarquer pour la première fois dans l'espace de telles mosaïques de détecteurs, qu'on peut comparer aux dispositifs optiques DTC utilisés dans les caméras vidéo électroniques grand-public. Ainsi équipé, l'observatoire orbital pourra enregistrer de très longues poses photographiques. Il pourra prendre des images de ciel très « fouillées » et très « détaillées ». Il pourra observer une même cible jusqu'à dix heures de suite avec une sensibilité mille fois plus élevée et une résolution dix fois supérieure à celles que fournissait IRAS!



Le miroir principal d'ISO

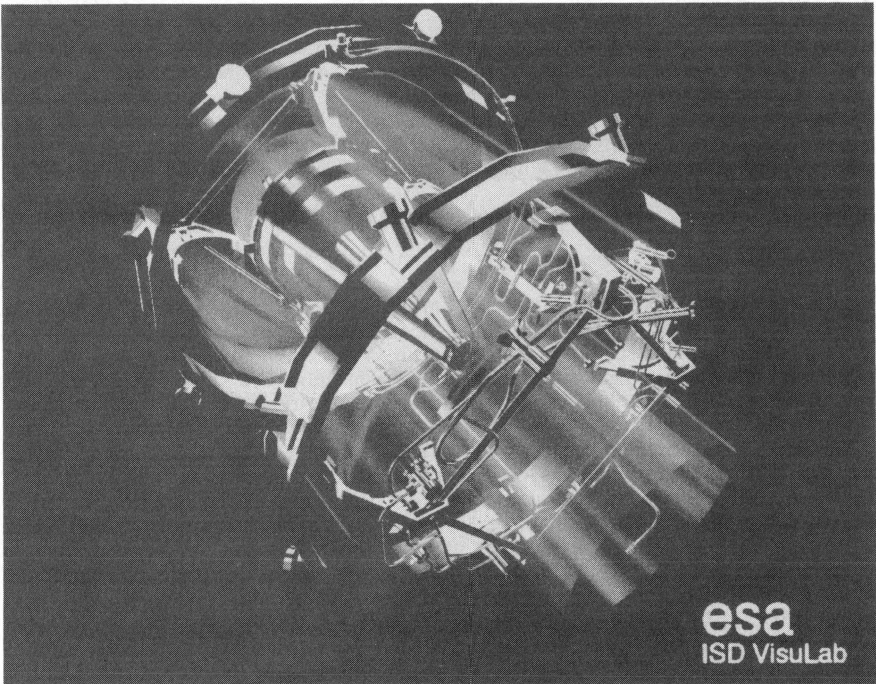
« Sa sensibilité au rayonnement thermique et la finesse de ses images devraient permettre à ISO de déceler à cent kilomètres de distance un objet à température de la glace et de la taille d'un homme », assurent les responsables du programme.

Bien évidemment, la réalisation technique et la technologie d'un instrument aussi innovant et aussi performant n'ont pas été sans poser d'énormes difficultés. « C'est la première fois qu'un satellite de ce type est construit en Europe, et ce travail a mobilisé les efforts de pas moins de trente-cinq firmes hautement spécialisées », déclare le responsable du programme pour l'ESA, Hans Steinz. Le défi a avant tout résidé dans le développement des systèmes de réfrigération cryogéniques qui, aujourd'hui, donnent à ISO

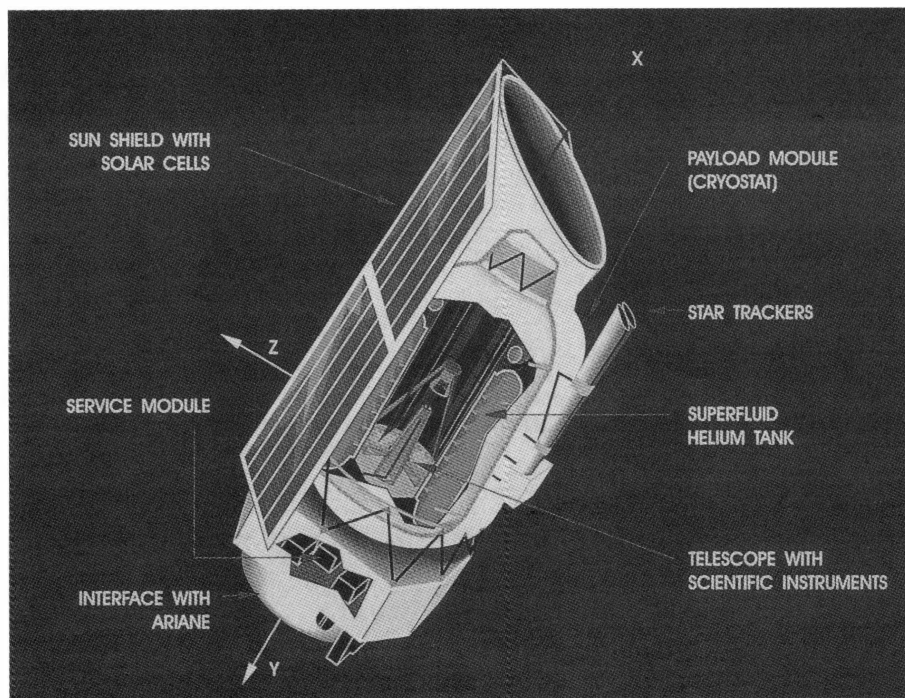
l'apparence d'une énorme bouteille thermos remplie de 2100 litres d'hélium superfluide à -271°C de température (1,8 degré absolu).

Autre défi : le miroir ultra-léger du télescope, en quartz plaqué-or. Les qualités de polissage requises pour cette pièce optique maîtresse sont telles que, si son diamètre de 60 centimètres se trouvait artificiellement dilaté à la dimension de celui de la Terre, les « creux » et les « bosses » résiduels de la surface réfléchissante ne dépasseraient pas un mètre de hauteur, soit la taille d'un enfant...

Le corollaire de ces multiples difficultés a été un retard de deux ans sur le calendrier de développement : un délai d'importance somme toute limité compte-tenu de l'envergure et de la complexité du projet.



L'intérieur du télescope



Configuration générale du télescope

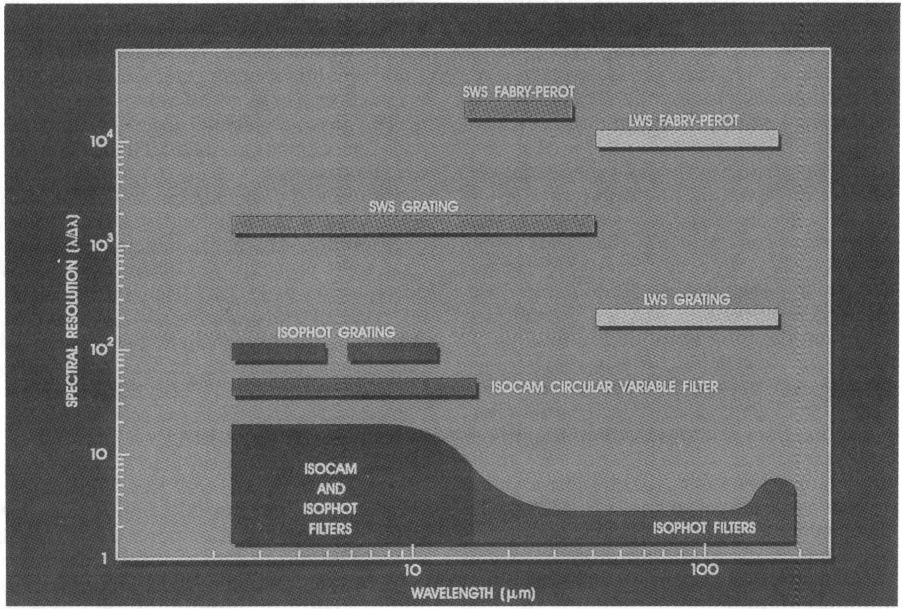
Finalement, tous les problèmes ont été résolus. Les performances du satellite étaient parfaitement conformes aux espérances, et ISO fut transporté à la fin juin au Centre spatial de Kourou où il a subi l'ensemble des essais préparatoires au lancement.

Le satellite est entièrement recouvert d'un isolant thermique de haute efficacité : si par le biais d'une opération tout à fait théorique on remplissait son cryostat d'eau bouillante au lieu d'hélium liquide, il faudrait six années à ISO pour qu'il revienne à température ambiante. Cette isolation est essentielle pour minimiser la sensibilité du télescope aux perturbations thermiques induites en orbite par le rayonnement solaire et celui de la Terre.

Les quatre instruments focaux montés derrière le miroir du télescope représentent le cœur scientifique du satellite. Cet ensemble

instrumental construit par les chercheurs et industriels des états membres de l'Agence offre la possibilité d'effectuer des mesures d'une sensibilité et d'une précision sans précédent sur une très grande gamme de longueurs d'onde — de 2,5 à 250 microns — encore totalement inexplorées sur la portion 120-250 microns.

Le photomètre Isophot, réalisé sous la responsabilité de l'institut allemand Max Planck, est l'instrument le plus complet recouvrant la plus grande gamme de longueurs d'onde. Aux très grandes longueurs d'onde, qui n'ont encore jamais été détectées à ce jour, il devrait révéler des astres et de la matière cosmique extrêmement froids. Isophot mesure à la fois l'intensité de la lumière reçue, sa distribution spatiale ainsi que les composantes spectrales de la lumière infrarouge proche.



Performance des divers instruments (résolution spectrale en fonction de la longueur d'onde)

La caméra Isocam, placée sous la responsabilité du Service d'astrophysique de Saclay (France), photographiera le ciel entre 2,5 et 17 microns à l'aide de deux mosaïques de 1024 détecteurs individuels (32 x 32 pixels) chacune. Une vingtaine de filtres permettent de sélectionner différents domaines spectraux (« couleurs »), et quatre lentilles optiques offrent différentes possibilités d'agrandissements (de 1 à 8). La dimension du plus fin détail observable dans le ciel est de 1,5 à 12 seconde d'arc, soit 1/1200 à 1/150 fois le diamètre de la pleine Lune.

Les spectromètres SWS et LWS, sous la responsabilité respectivement du Laboratoire de recherche spatiale de Groningen (Pays-Bas) et du Queen Mary and Westfield College de Londres (Royaume-Uni), forment un ensemble unique qui analysera la composition spectrale du rayonnement de 2,5 à 200 microns. Ils

permettront ainsi d'accéder à une gamme de phénomènes physiques extraordinairement étendue qui pourront être étudiés avec une très grande finesse et une très grande précision (pouvoir de résolution 50 à 30.000).

Le jour J était initialement fixé au 8 puis au 11 et, enfin, au 17 novembre 1995, mais les possibilités de tir s'étendaient en fait jusqu'au 21 février 1996. ISO a été placé par Ariane sur une orbite très allongée de 1000 km x 70.000 km qu'il parcourra en 24 heures. Cette trajectoire elliptique permet d'obtenir des données scientifiques de très haute qualité pendant les 16 heures par jour où le satellite se trouve à l'extérieur des ceintures de Van Allen dont les radiations induisent des signaux parasites impropres aux mesures.

Le contrôle au sol et la poursuite radio seront assurés par une centaine de spécialistes qui se relaieront 24 h sur 24 à la station de Villafranca

de l'ESA près de Madrid, en Espagne. Dans le cadre de la collaboration internationale, des scientifiques japonais seront impliqués dans ces opérations. Par ailleurs, la station de Goldstone de la NASA, en Californie, relaiera les communications avec le satellite lorsque celui-ci ne sera pas visible au-dessus de l'Europe. Ainsi, une couverture totale de l'orbite pourra être assurée avec des liaisons temps-réel pendant 100% des dix-huit mois de la mission.

Cent septante millions d'octets de données seront reçus chaque jour à Villafranca ce qui, au total sur la durée de la mission, représentera une quantité cumulée de 90 milliards d'éléments d'information : de quoi remplir un document dactylographié de dix millions de pages A4 lesquelles, jointes bout-à-bout, s'étendraient sur une distance de 7000 kilomètres, équivalente à la distance Paris-Miami.

Le programme d'observation scientifique est déjà surchargé. Avant même que le satellite soit entré en service, 60.000 propositions d'observation ont été soumises à l'ESA par les chercheurs européens, américains et japonais, ce qui représente en fait une demande d'utilisation quatre fois supérieure aux possibilités matérielles d'exploitation de la mission.

« Avec ISO, nous allons explorer un univers caché et froid, inaccessible aux télescopes optiques classiques », explique Martin Kessler, le responsable scientifique du projet ISO à l'ESA. Ainsi les astronomes pourront observer des étoiles trop peu chaudes pour pouvoir être observées en lumière visible, ou bien des étoiles dissimulées derrière des rideaux de gaz et de poussières opaques que seule la lumière infrarouge parvient à traverser. « Ce sera le cas des étoiles jeunes et froides en formation dans la Galaxie. Cette étude intensive permettra de mieux comprendre le processus général de la genèse des étoiles et, donc, aussi ce que fut la naissance de notre propre Soleil. »

Dans un premier temps, ISO portera son regard insolite et froid sur les planètes, les satellites, les astéroïdes et les comètes de notre système solaire. Notamment, il s'attardera sur le cas de Titan, l'intrigante lune brumeuse de Saturne qui doit être visitée en 2004 par la sonde Huygens de l'ESA. Les astronomes soupçonnent l'atmosphère de ce satellite d'être le siège d'une chimie organique complexe,

peut-être similaire à celle qui a permis l'émergence de la vie sur Terre. ISO mesurera avec précision la composition de cette atmosphère. Il déterminera l'abondance des espèces chimiques minoritaires et les variations de ces abondances avec l'altitude, bien avant qu'Huygens ne puisse plonger physiquement dans l'enveloppe gazeuse de Titan et la sonder directement.

Le système planétaire qui entoure le Soleil a-t-il un équivalent dans la Galaxie? Vaste question dont la réponse conditionne notamment toute possibilité de détecter des formes de vie extrasolaire. ISO tentera d'y répondre en recherchant des disques de poussières autour de plusieurs centaines d'étoiles variées, proches ou lointaines, jeunes ou évoluées. C'est au sein d'un de ces disques que les planètes du Soleil se sont formées, pense-t-on, et les observations d'IRAS ont, par ailleurs, révélé des structures similaires autour d'une dizaine d'étoiles proches, dont Véga et Bêta Pictoris. Avec une sensibilité mille fois supérieure, ISO devrait dénombrer davantage de ces disques encore. Il étudiera leur masse, leur composition chimique, leurs dimensions et leur évolution au cours du temps. Ainsi les scientifiques obtiendront-ils de nouveaux renseignements sur les possibilités effectives de formation — et d'existence même — de corps planétoïdes autour des étoiles de la Voie Lactée.

Autres cibles de choix pour ISO : les galaxies extérieures dont les astronomes espèrent mieux comprendre comment elles se forment et fabriquent leurs étoiles. Les observations se concentreront en particulier sur une catégorie d'objets intrigants : les galaxies ultralumineuses, qui émettent vingt fois plus de rayonnement en infrarouge qu'en lumière visible et dispensent au total dix fois plus d'énergie qu'une galaxie ordinaire! La source d'énergie qui alimente ces phares cosmiques reste aujourd'hui inconnue : trou noir géant ou brusque flambée de formation d'étoiles? En examinant en détail la lumière émise par ces astres, ISO permettra de tester les deux modèles en concurrence et, peut-être ainsi, de favoriser l'un d'entre eux. ISO passera aussi plus d'une centaine d'heures à traquer la fameuse et mystérieuse matière noire de l'Univers. Détectée par des méthodes indi-

rectes, cette matière « obscure » semble constituer 90 à 99% de la masse de l'Univers mais a toujours obstinément refusé de se laisser observer en lumière visible. Conséquence, sa composition et sa nature physique demeurent totalement inconnues. ISO tentera de détecter cette matière noire en rayonnement infrarouge là où l'on a le plus chance d'observer les étoiles dites « naines brunes » de notre Galaxie ou bien les nuages d'hydrogène moléculaire froid supposés occuper la périphérie des galaxies externes. Ainsi ISO pourra-t-il contribuer de façon décisive au débat concernant la composition et la masse totale de l'Univers.

Enfin, parce qu'il capte des rayonnements des très grandes longueurs d'ondes jusque-là

inobservés, ISO représente une fantastique machine à remonter le temps. Grâce à sa grande sensibilité, ISO observera des objets de plus en plus éloignés, qui existaient à des périodes de plus en plus reculées, et dont la lumière nous parvient décalée vers le rouge et l'infrarouge en raison de l'expansion de l'Univers.

Les astronomes espèrent ainsi pouvoir accéder aux limites de l'espace observable, à des galaxies qui brillaient il y a près de huit milliards d'années, lorsque l'Univers n'avait que le tiers de son âge actuel! Si de tels astres ont réellement existé, alors ce pourrait être les tout premiers formés dans l'Univers et les plus lointains ancêtres identifiables de notre propre Galaxie.

* * *

Galileo atteint son but

Selon le communiqué
STSci-PRC95-46 de la NASA

Au moment où il atteint enfin sa cible, le vaisseau spatial Galileo a déjà derrière lui une histoire bien chargée. De multiples succès scientifiques (comme l'imagerie des astéroïdes Gaspra et Ida) ont alterné avec les déboires (non-déploiement de l'antenne de communication, panne de l'enregistreur) et les prouesses technologiques (rétablissement de la plus grande partie des communications).

Le 7 décembre, la petite sonde libérée par Galileo entrera dans l'atmosphère jovienne. Freinée par un parachute, on pense qu'elle pourra transmettre des renseignements physico-chimiques pendant environ une heure et quart. Après quoi, les effets combinés de la pression et de la température auront raison d'elle.

Le module principal, quant à lui, passera très près de la planète. Un freinage judicieux l'empêchera de continuer sa course au-delà de la planète. Galileo deviendra un nouveau

satellite de Jupiter. Sa première tâche sera de capter les signaux du module de descente, pendant sa brève mission. Ensuite il s'attaquera à diverses cibles comme le satellite Io qu'il survolera de très près. A chaque tour (on en prévoit onze sur deux années), l'orbite sera modifiée pour étudier différents satellites (il y aura 15 survols rapprochés) et différentes régions de l'environnement de la planète.

Les communications rendues très difficiles par la perte de l'antenne principale seront encore perturbées par la proximité du Soleil sur la ligne de visée. Pour assurer le succès de la mission, les données seront enregistrées sur bande magnétique. En même temps, les plus importantes mesures seront gardées dans la mémoire vive des ordinateurs. On tentera de récupérer au plus vite, malgré les perturbations solaires, ces données essentielles. Le reste sera transmis au compte-goutte au long de l'orbite.

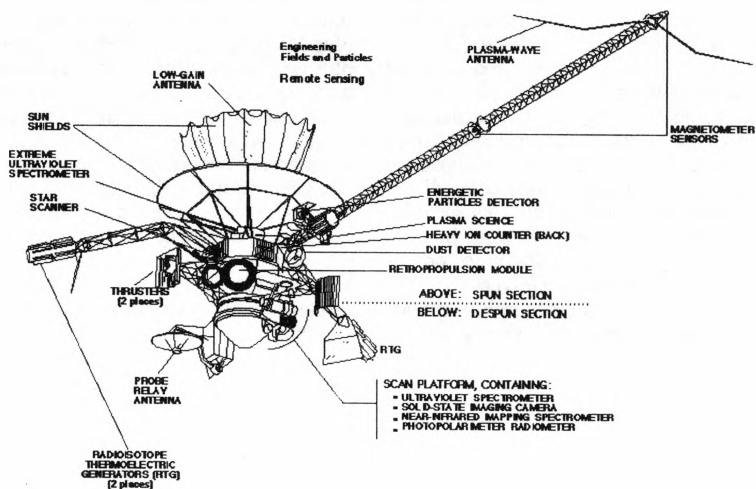
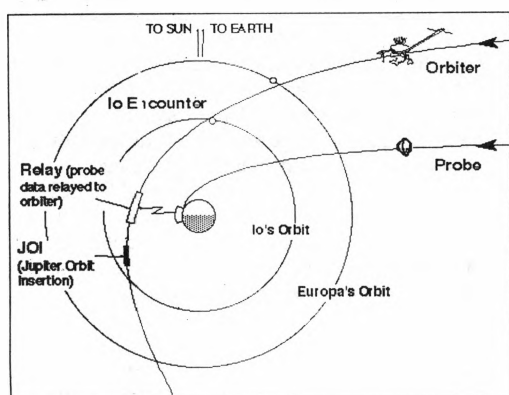


Schéma de la sonde Galileo



Trajectoires d'arrivée de l'orbiter Galileo et de la petite sonde

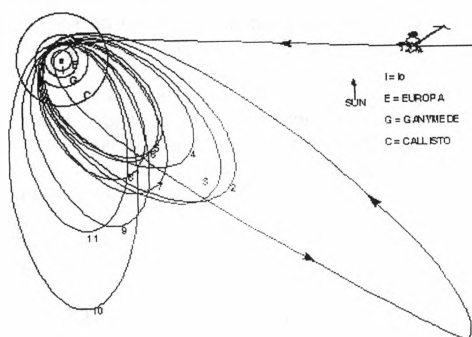


Schéma des onze orbites que décrira Galileo en deux ans autour de Jupiter

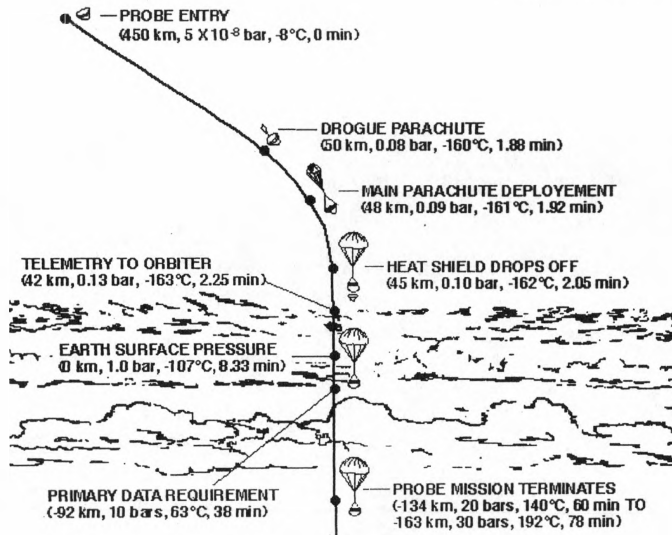
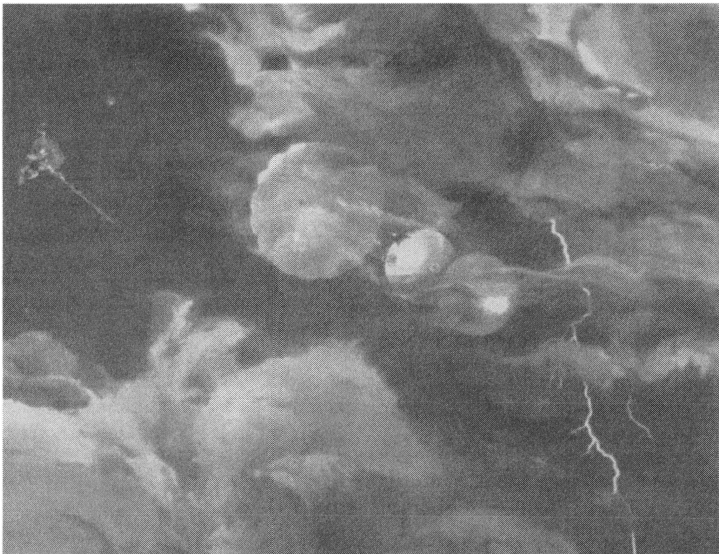
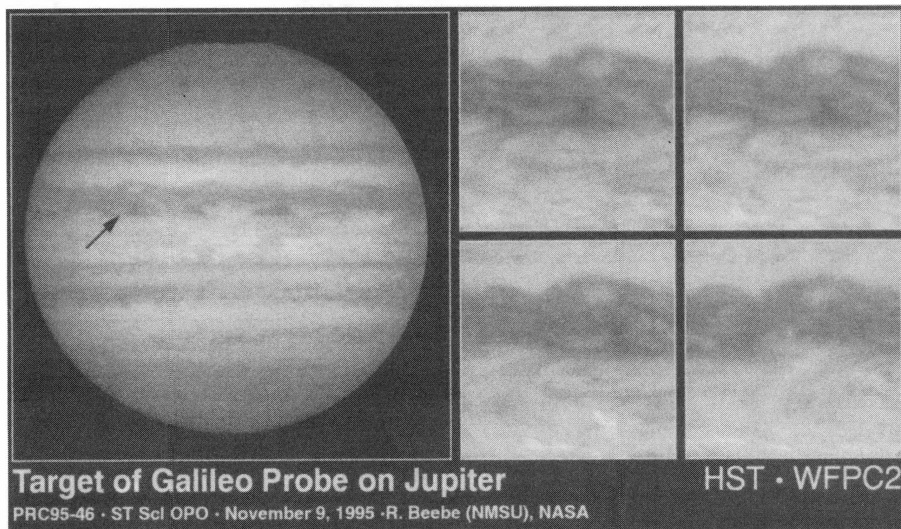


Schéma de l'entrée de la sonde dans l'atmosphère de Jupiter. Après l'ouverture successive des deux parachutes et l'éjection du bouclier thermique, la sonde devrait être opérationnelle durant au moins une heure.



Vue d'artiste de la descente de la sonde, accrochée à son parachute, dans le ciel tourmenté de Jupiter. Contrairement à ce que dépeint ce tableau, l'orbiter sera bien loin dans l'espace.



Le site d'impact de la sonde lâchée par Galileo
© Reta Beebe (New Mexico State University), et NASA

L'image de gauche dans la figure ci-dessus a été prise par le Hubble Space Telescope le 5 octobre, alors que la planète se trouvait à 854 millions de kilomètres de la Terre. La flèche pointe vers l'endroit où la sonde éjectée par Galileo terminera sa carrière le 7 décembre.

A cette latitude, les vents soufflent vers l'est à la vitesse de 110 mètres par seconde. L'ovale blanc au nord du site glisse vers l'ouest par rapport à celui-ci, avec une vitesse relative de 6 mètres par seconde, entraîné par les vents qui sont de plus en plus violents lorsque l'on se rapproche de l'équateur.

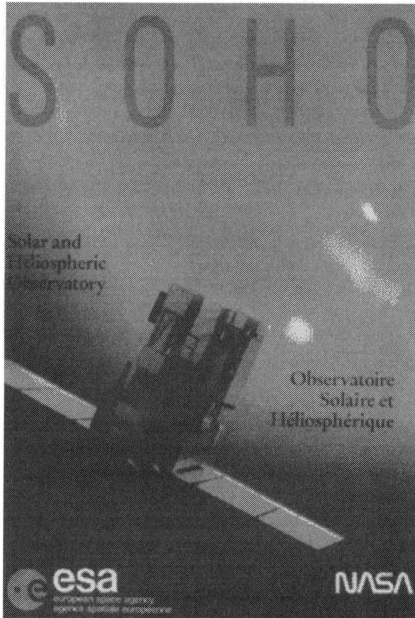
Cette image a été obtenue par la Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) dont le champ

est plus petit que le disque de la planète. Il s'agit donc en réalité d'une mosaïque de plusieurs images obtenues à des moments différents par le HST.

A droite, on remarque l'effet des vents violents qui soufflent sur le site d'impact. Ces cartes couvrent environ 15 degrés, soit trois fois le diamètre de la Terre, dans chaque direction. La première a été obtenue le 4 octobre à 18 h TU; les autres, respectivement, 10, 20 et 60 heures plus tard. Durant l'intervalle séparant la première de la dernière photo, les vents ont déplacé les nuages de deux fois le diamètre terrestre.

SOHO à l'affût des mystères du Soleil

Basé sur des documents de l'ESA et de la NASA

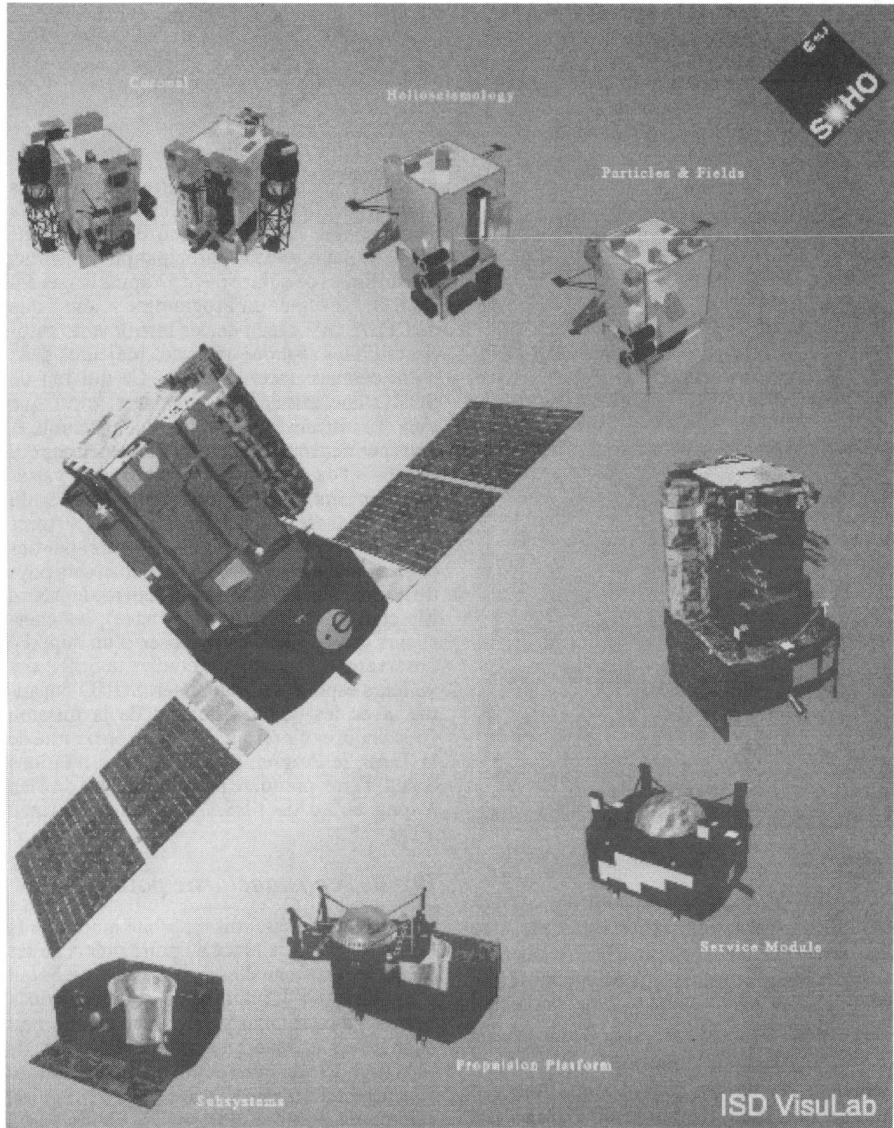


SOHO embarquera douze instruments sophistiqués dont plusieurs télescopes, réalisés en un temps record par douze consortiums internationaux avec la participation d'instituts scientifiques de quinze pays. D'après Roger M. Bonnet, Directeur du Programme scientifique de l'ESA : « Chacun de ces instruments autoriserait à lui seul des avancées majeures dans notre connaissance du Soleil. Ce qui fait de SOHO une mission passionnante, c'est que tous ses instruments travailleront ensemble et nous permettront de découvrir les relations qui pourraient exister entre les phénomènes variés se produisant dans les différentes couches du Soleil et dans le milieu interplanétaire. » Après quatre années de travail intense fourni par des équipes techniques de l'ESA et de divers pays d'Europe, sous la maîtrise d'œuvre de Matra Marconi Space (Toulouse, France), les chercheurs qui rêvaient de disposer d'un superbe observatoire spatial pour étudier le Soleil ont vu leurs espoirs se concrétiser. SOHO constitue, avec les quatre satellites de la mission Cluster qui exploreront l'espace à proximité de la Terre, le Programme d'étude des relations Soleil-Terre, première pierre angulaire du plan à long terme de l'ESA, dénommé Horizon 2000.

Pas de repos nocturne pour SOHO

Au moment où ces lignes paraîtront, SOHO, satellite de l'Agence spatiale européenne, aura sans doute été lancé par la NASA aux fins d'étudier avec une précision non encore égalée le Soleil, notre étoile la plus proche. SOHO est l'acronyme de « SOLar and Heliospheric Observatory »; à l'époque médiévale, c'était également un cri de chasse anglo-français. Aujourd'hui, SOHO se met à l'affût des secrets que recèle le Soleil.

Plutôt que d'être mis en orbite autour de la Terre, SOHO sera placé au point précis où les forces gravitationnelles de la Terre et du Soleil s'équilibrent, à 1,5 million de kilomètres de la Terre en direction du Soleil. Cette position est connue en astronomie comme le point de Lagrange L1, du nom du mathématicien français Joseph Louis de Lagrange qui, le premier, calcula ses coordonnées, vers la fin du XVIII^e siècle.



Les différents instruments de SOHO

SOHO se déplacera sur une orbite elliptique dite « en halo » d'un rayon d'environ 600 000 kilomètres autour du point de Lagrange, où il sera constamment éclairé. Il pourra observer le Soleil en continu, sans interruption 24 heures sur 24 pendant 365 jours par an, et nous livrera une moisson extraordinaire de données.

Tous les observatoires solaires précédents se trouvaient soit sur Terre soit en orbite autour de notre planète. Les observations des télescopes installés au sol sont tributaires des conditions météorologiques et entravées par la distorsion du signal solaire due à l'atmosphère; en outre, il est naturellement impossible de travailler de nuit. Les observations des satellites en orbite autour de la Terre ne dépendent pas de la météorologie mais elles sont périodiquement interrompues, à chaque fois que le satellite passe dans l'ombre de notre planète. SOHO quant à lui pourra pour la première fois observer le Soleil sans entrave et de manière ininterrompue.

Objectifs scientifiques

SOHO ne se contentera pas de regarder le disque solaire visible, il plongera son regard au cœur du Soleil et le tournera vers la Terre, à travers de nouvelles fenêtres d'observation. Trois régions du Soleil seront examinées : son cœur opaque, son atmosphère chaude et transparente, et le vent solaire qui s'échappe sans discontinuer sous la forme d'un flux de particules chargées et de champs magnétiques. Les douze instruments de SOHO sont conçus pour étudier une ou deux de ces régions, chacun travaillant de façon différente mais complémentaire. En combinant leurs données, il sera possible de faire le lien entre les phénomènes observés dans l'atmosphère du Soleil ou dans le vent solaire et les modifications qui se produisent au plus profond de notre astre.

La mission SOHO répond à trois grands objectifs scientifiques :

1. L'étude de la structure et de la dynamique des couches internes du Soleil.
2. L'étude des mécanismes thermiques dans la couronne, couche de l'héliosphère dont la température peut dépasser un million de degrés.

3. L'exploration du vent solaire, de ses origines et de ses processus d'accélération.

« Les spécialistes de la physique solaire n'ont encore jamais disposé d'un observatoire aussi complet, leur donnant littéralement accès à la totalité du Soleil » remarque Martin C.E. Huber, chef du Département de Sciences spatiales de l'ESA.

Les pulsations du Soleil

Pour faire la lumière sur les profondeurs invisibles du Soleil, SOHO enregistrera les vibrations à grande échelle de sa « surface » visible ou photosphère. Ces oscillations sont liées à la propagation de sons (c'est-à-dire d'ondes de pression) piégés à l'intérieur du Soleil. Lorsque ces ondes sonores heurtent la surface du Soleil et rebondissent vers l'intérieur, elles entraînent à leur suite les gaz qui s'y trouvent.

Les ondes sonores qui se propagent vers les profondeurs du Soleil sont à l'origine d'oscillations globales de la surface dont les périodes les plus longues peuvent durer quelques heures; des oscillations plus petites et plus courtes s'observent dans les couches superficielles. En étudiant une séquence d'oscillations de plus en plus longues, correspondant aux ondes sonores se déplaçant de plus en plus loin vers l'intérieur du Soleil, SOHO « épluchera » les couches éloignées du Soleil les unes après les autres et permettra de déterminer les caractéristiques physiques des couches internes du Soleil. Par analogie avec la sismologie, qui étudie les tremblements de terre ou ondes sismiques pour analyser la structure interne de la Terre, la technique utilisée a été baptisée « héliosismologie ».

Les données héliosismologiques de SOHO pourraient aussi nous éclairer sur les neutrinos solaires, ces particules subatomiques de très faible masse produites en quantités prodigieuses à l'intérieur du noyau, source de l'énergie solaire. Les neutrinos se déplacent à la vitesse de la lumière et traversent pratiquement sans entrave les couches externes du Soleil, la Terre et quasiment toute matière. Nous ne comprenons toujours pas pourquoi le nombre de neutrinos piégés par nos détecteurs souterrains est invariablement inférieur aux

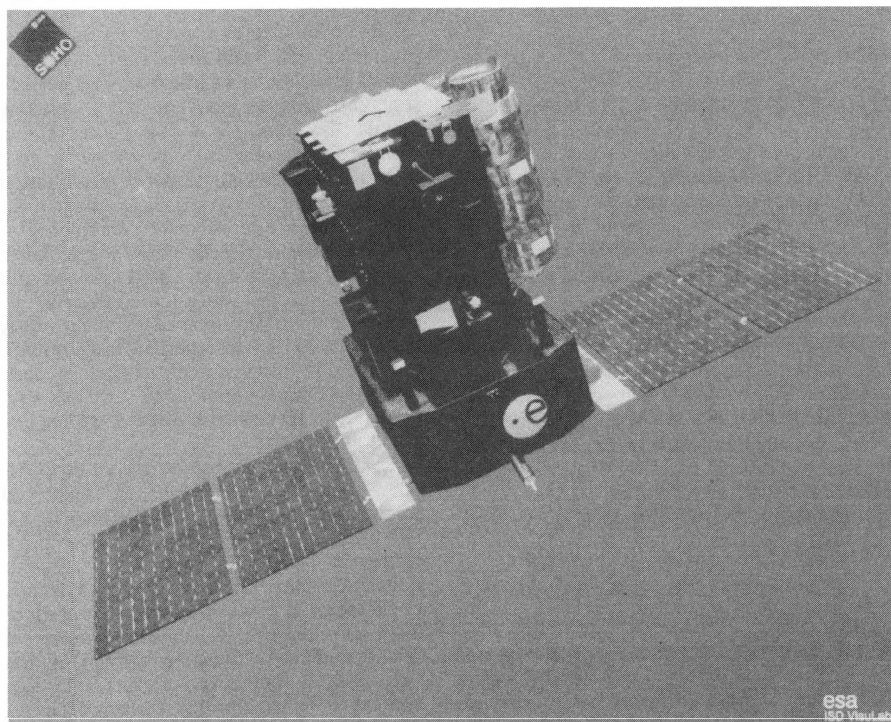
prédictions théoriques. C'est l'énigme des neutrinos solaires. Soit le Soleil n'est pas celui que nous croyons, soit nos connaissances de base sur les neutrinos sont à réviser.

L'enregistrement par SOHO des oscillations de surface pourrait permettre d'établir la température du centre du Soleil et nous révéler une défaillance éventuelle dans notre compréhension de la façon dont les étoiles émettent de la lumière. Si le centre du Soleil se révélait plus froid d'environ un million de degrés que ce que nous pensons actuellement, cela signifierait que les réactions nucléaires produisent moins de neutrinos et l'énigme des neutrinos solaires serait résolue. Mais si la température interne est aussi élevée que nous le pensons, il se pourrait alors que les neutrinos connaissent une crise d'identité et subissent une métamorphose avant d'atteindre les détecteurs terrestres, ce qui expliquerait qu'on ne puisse les

déceler.

Les observations héliosismologiques de SOHO amélioreront également notre compréhension de la dynamo solaire, responsable du champ magnétique du Soleil. Un effet de dynamo se produit à l'intérieur du Soleil, où de la matière chaude en rotation génère des courants électriques et convertit l'énergie cinétique en énergie magnétique.

Les champs magnétiques induits par cette dynamo se fraient un chemin vers l'extérieur, jusqu'à l'atmosphère solaire, dans laquelle ils impriment aux gaz électrisés des formes fluctuantes. L'atmosphère solaire tout entière est en permanence le siège de transformations dues aux variations du magnétisme solaire, à l'origine d'une activité d'une ampleur inimaginable sur Terre.



Vue d'artiste du satellite (©) ESA

Regard sur l'intérieur du Soleil

SOHO embarque trois instruments d'héliosismologie qui observeront longuement, sans interruption, les oscillations solaires. Deux de ces expériences portent particulièrement sur les oscillations globales de longue période et sur les ondes sonores pouvant se propager vers les profondeurs du Soleil. Il s'agit de GOLF (Global Oscillation at Low Frequency) et de VIRGO (Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations). Le troisième instrument recueillera avec une précision inégalée des données sur les oscillations à plus petite échelle spatiale. Il s'agit de l'expérience SOI/MDI (Solar Oscillations Investigation/Michelson Doppler Imager).

GOLF et MDI utilisent la célèbre technique Doppler pour mesurer les mouvements de la photosphère solaire. Lorsqu'une partie de la surface visible se soulève dans notre direction, les raies spectrales formées dans cette région s'observent dans une longueur d'onde plus courte. Si la zone observée s'éloigne de nous, se dirigeant vers l'intérieur du Soleil, la longueur d'onde est plus longue. (Une raie spectrale est absorbée ou émise par un atome ou un ion dans une longueur d'ondes spécifique, qui permet d'identifier l'élément en cause; une raie apparaît comme une ligne dans la distribution spectrale de l'intensité du rayonnement en fonction de la longueur d'onde.)

Les ondes sonores peuvent elles aussi être utilisées pour mieux connaître la rotation interne du Soleil. Les ondes se propageant dans la direction de rotation sembleront, pour un observateur fixe, se déplacer plus rapidement et leurs périodes seront plus courtes. Les ondes se propageant dans la direction opposée seront ralenties et leurs périodes plus longues. A l'aide de mesures précises des périodes d'oscillation, il sera possible de déterminer les mouvements de rotation de l'intérieur du Soleil.

GOLF a pour objectif de mesurer les oscillations globales se produisant à la surface du Soleil dont la vitesse ne dépasse pas un millimètre par seconde et dont la période va de 3 minutes à 100 jours. SOI/MDI recueillera des données précises, de haute résolution spatiale, sur les oscillations de surface observables sur des échelles spatiales et temporelles relativement petites. Ces deux instruments nous renseigneront sur la distribution radiale de la densité, de la pression et de la température, sur la variation de la rotation en profondeur et en latitude, ainsi que sur les conditions internes qui sont à l'origine de l'activité magnétique du Soleil.

VIRGO mesurera les variations de la brillance ou émission totale de lumière du Soleil, à l'aide de radiomètres de très haute sensibilité, précision et stabilité. A mesure que le Soleil s'affaiblira ou s'éclairera, VIRGO enregistrera avec une grande sensibilité ses oscillations globales de longue période et nous aidera ainsi à affiner notre connaissance des propriétés physiques et dynamiques des profondeurs du Soleil.

Les mesures précises, sur le long terme, de GOLF et de VIRGO pourraient également nous permettre d'observer en détail les ondes dites « de gravité » du Soleil¹. Celles-ci sont pour la plupart confinées à l'intérieur du cœur du Soleil, producteur d'énergie, et c'est la force de gravitation qui dicte la vitesse avec laquelle elles montent et descendent, un peu comme les vagues de l'océan. On pense que les ondes de gravité qui parviennent jusqu'à la surface visible de l'astre se caractérisent par de longues périodes allant jusqu'à une heure ou davantage et qu'elles pourraient nous révéler les conditions régnant au cœur même du Soleil. Elles pourraient jeter un éclairage nouveau sur la

1 Ces ondes, parfois appelées « ondes gravifiques », sont bien matérielles et comparables aux vagues à la surface d'une étendue d'eau. Elles n'ont rien de commun, si ce n'est l'analogie de dénomination, avec les « ondes gravitationnelles » prédites par Einstein dans sa théorie de la relativité générale et que l'on peut représenter comme des oscillations de l'espace-temps lui-même. D'amplitude infime et de nature immatérielle, les ondes gravitationnelles n'ont pas encore été observées avec certitude. Les émetteurs potentiels de telles ondes doivent exhiber des propriétés physiques et géométriques bien différentes de celles du Soleil.

question des neutrinos solaires et nous aider à déterminer si la vitesse de rotation du Soleil augmente lorsqu'on se rapproche de son cœur.

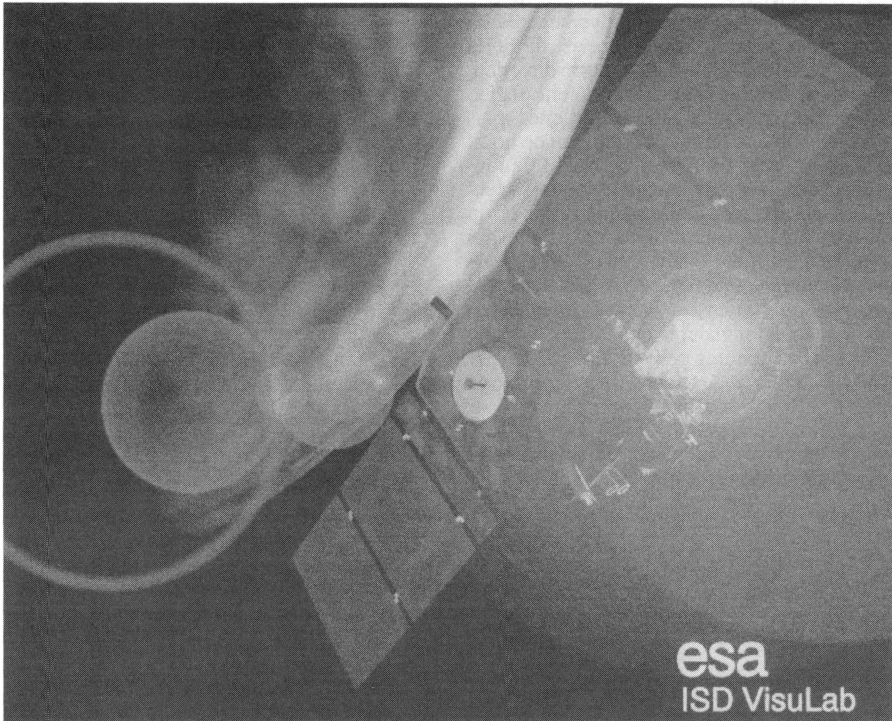
L'atmosphère solaire

Le Soleil est une immense sphère gazeuse comprimée en son centre et plus ténue vers l'extérieur. La bordure bien visible de cette sphère est une illusion optique. Le Soleil est enveloppé de gaz si raréfiés que nous ne les voyons pas, pas plus que nous ne voyons l'air qui entoure notre planète. La couche extérieure ténue est donc appelée atmosphère solaire.

La couche la plus basse et la plus dense de l'atmosphère solaire est appelée photosphère

(du grec *phôtos*, lumière) car elle émet une lumière visible. Juste au-dessus de la photosphère se trouve une fine couche appelée chromosphère (du grec *chrôma*, couleur). La région la plus extérieure, au-dessus de la chromosphère, est la couronne, qui s'étend jusqu'aux planètes et au-delà.

La température de la couronne, extrêmement élevée, atteint quelques millions de degrés. Son existence même est l'un des plus grands paradoxes non résolus qui se posent à la physique solaire moderne. La photosphère est plus proche du centre du Soleil que la couronne mais sa température est plusieurs centaines de fois inférieure.



Vue d'artiste du satellite en orbite (©) ESA

Que la chaleur puisse se déplacer d'une région plus froide vers une région plus chaude heurte le sens commun et va à l'encontre de la deuxième loi de la thermodynamique. Les recherches se poursuivent depuis plus d'un demi-siècle sans que l'on ait pu découvrir le mécanisme précis du réchauffement de la couronne : c'est l'un des principaux objectifs scientifiques confiés à la mission SOHO.

La lumière solaire traverse la couronne sans y déposer d'importantes quantités d'énergie. Le rayonnement n'apporte donc pas de réponse à la question du réchauffement de la couronne. Il se pourrait que les mécanismes en cause fassent intervenir l'énergie cinétique de la matière en mouvement ou l'énergie magnétique. Contrairement au rayonnement, ces deux formes d'énergie peuvent passer d'une région froide à une région chaude.

Il est possible que les mouvements d'entrée et de sortie observés à l'intérieur du Soleil génèrent des ondes sonores qui s'accélèrent jusqu'à se transformer en chocs supersoniques; ces mouvements pourraient dissiper de l'énergie et produire de la chaleur dans la basse chromosphère. Toutefois, les observations suggèrent que les ondes sonores ne peuvent réchauffer la couronne de manière significative car elles ne parviennent pas à de telles distances. SOHO vérifiera cette hypothèse et étudiera les diverses signatures spectrales des ondes sonores dans la chromosphère et dans la couronne.

L'énergie magnétique intervient probablement dans le réchauffement de la couronne. Les champs magnétiques donnent à la couronne sa forme très structurée et les structures les plus brillantes de la couronne s'observent là où les champs magnétiques sont les plus forts. Les spectromètres de SOHO enregistreront donc également les signatures d'intensité et de vitesse variables des ondes magnétiques générées par les variations du magnétisme solaire. L'énergie magnétique peut également être convertie en chaleur par les nombreuses petites explosions localisées qui ont déjà été observées par des télescopes spatiaux travaillant dans l'ultraviolet. SOHO nous apportera de nouveaux renseignements sur la fréquence, la localisation et la puissance de ces explosions.

Instruments d'étude de l'atmosphère solaire

Cinq instruments de SOHO étudieront l'atmosphère solaire. Trois d'entre eux exploreront la chromosphère et la zone de transition vers la basse couronne; il s'agit de SUMER (Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation), de CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer) et d'EIT (Extreme-ultraviolet Imaging Telescope). Les deux autres étudieront la partie centrale de la couronne, située entre 1,1 et 10 à 30 rayons solaires du centre du Soleil; il s'agit de l'UVCS (UltraViolet Coronagraph Spectrometer) et de LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph).

Quatre de ces instruments travaillent dans les longueurs d'ondes de l'ultraviolet (UV) ou de l'ultraviolet extrême (EUV), dont le rayonnement est invisible à l'œil nu. La lumière ultraviolette s'observe dans des longueurs d'ondes un peu plus courtes que la lumière visible et l'extrême ultraviolet dans des longueurs d'ondes un peu plus courtes que l'ultraviolet. Ces rayons étant absorbés en partie ou en totalité par l'air terrestre, ils ne peuvent être observés qu'à l'aide de télescopes placés au-delà des perturbations de l'atmosphère, à bord de satellites comme SOHO.

Nous pouvons obtenir une image des différentes couches de l'atmosphère solaire en isolant le rayonnement UV ou EUV dans certaines longueurs d'ondes. Dans l'UV ou l'EUV, certaines raies jouent le rôle d'un thermomètre et indiquent la température du lieu où elles se forment, tandis que d'autres sont sensibles à la densité locale. La vitesse de la matière en mouvement peut également être déduite du décalage ou de l'élargissement des raies spectrales. Les mesures de température, de densité et de vitesse recueillies par ces quatre expériences seront utilisées pour établir le réchauffement, les flux et les mouvements des ondes dans différentes structures magnétiques et dans différentes couches de l'atmosphère solaire. En les combinant, nous disposerons d'une vue unique sur un monde encore inconnu caractérisé par de profonds bouleversements, des températures extrêmes

et des explosions violentes, qui ne ressemble guère au visage lumineux et impassible que nous montre le Soleil.

SUMER, CDS et EIT entreprendront l'observation des raies dans une gamme de températures allant de 10 000 à quelques millions de degrés et calculeront des vitesses de l'ordre d'un kilomètre par seconde. SUMER et CDS enregistreront avec une haute résolution spatiale et temporelle (jusqu'à une seconde d'arc et une seconde de temps respectivement) des images de la chromosphère et de la couronne; leur angle de visée couvrira environ 4 minutes d'arc. EIT prendra des images de tout le disque avec une moindre résolution. UVCS est un télescope pourvu d'un masque qui pourra mesurer les intensités et les profils de raies dans l'UV et établir les caractéristiques physiques de la couronne dans une région située entre 1,2 et 10 rayons solaires du centre du Soleil, avec une résolution angulaire allant jusqu'à 12 secondes d'arc.

Le cinquième instrument d'observation de l'atmosphère solaire, LASCO, est muni d'un disque d'occultation servant à dissimuler la photosphère et à observer la lumière visible ténue dispersée par les électrons libres de la couronne (à une température d'un million de degrés, les atomes libèrent plusieurs électrons et se transforment en ions). Comme la lumière du ciel perturbe ce type d'image, les détails les plus fins sont obtenus à partir de l'espace, où le ciel est toujours totalement noir. L'instrument LASCO est équipé de trois coronographes de ce type, dont les champs de vision annulaires sont emboîtés et se chevauchent; ses observations porteront sur une zone située entre 1,1 et 30 rayons solaires du centre du Soleil, repoussant les limites des zones étudiées par les coronographes embarqués à ce jour.

Les images des coronographes nous renseigneront sur la densité d'électrons ou nombre d'électrons par unité de volume, ainsi que sur leur distribution générale et leur variation radiale. Avec le coronographe interne, des images à haute résolution seront obtenues dans tout un domaine de longueurs d'onde infrarouges, dans une zone située entre 1,1 et 3 rayons solaires. Cet instrument mesurera l'intensité et le décalage Doppler des raies visibles émises par les ions coronaux; il

transmettra des données de température, de densité et de vitesse qui seront également utilisées pour comprendre le mécanisme du réchauffement de la couronne, qui reste encore inconnu actuellement.

Le vent solaire

La couche chaude la plus extérieure du Soleil, ou couronne, se répand dans l'espace interplanétaire, remplissant le système solaire d'un flux continu de matière électrisée appelé vent solaire. A la différence des vents qui soufflent sur Terre, le vent solaire est un mélange raréfié de protons et d'électrons parcouru de champs magnétiques, qui s'échappe du Soleil dans la direction radiale. L'espace interplanétaire n'est donc pas totalement vide, il est rempli de particules chargées provenant du Soleil.

A grande distance du Soleil, là où ses forces gravitationnelles s'affaiblissent, la matière coronale chaude exerce une pression vers l'extérieur qui l'emporte sur la gravité du Soleil; c'est ainsi que naît un vent qui s'accélère jusqu'aux vitesses supersoniques, comme l'eau débordant d'un barrage. A mesure que la matière s'échappe de la couronne, elle est remplacée par des gaz provenant par vagues de l'intérieur du Soleil, alimentant un vent solaire qui jamais ne s'essouffle.

Des satellites ont procédé à des mesures in situ du vent solaire à proximité de la Terre et nous ont appris qu'il se manifeste de deux façons, soit comme un vent de vitesse relativement faible, comprise entre 300 et 400 kilomètres par seconde, soit comme un courant très rapide se déplaçant à une vitesse de 600 à 800 kilomètres par seconde.

Quelles sont les forces qui propulsent le vent solaire à ces vitesses supersoniques avec une telle énergie et d'où proviennent les constituants du vent solaire ? L'accélération et l'origine du vent solaire sont des phénomènes mal connus. Répondre à ces questions fait partie des principaux objectifs de la mission SOHO.

Dans cet environnement de températures élevées, l'existence d'un vent de faible vitesse est la conséquence de l'écoulement vers l'extérieur du flux de matière s'échappant du Soleil. En s'éloignant du Soleil, ce vent s'accélère jusqu'à atteindre des vitesses

supersoniques de plusieurs centaines de kilomètres par seconde, à quelques rayons solaires du centre du Soleil. Pour résoudre l'énigme fondamentale de l'accélération de ce vent de faible vitesse, il faut découvrir la source de chaleur de la couronne. Personne ne sait précisément comment s'accélère le vent solaire.

Mais d'où provient donc le vent solaire ? Le flux rapide du vent solaire semble jaillir de vastes zones de faibles densité et température de la couronne. Ces régions, appelées trous coronaux, apparaissent sur les images dans l'EUV ou les rayons X comme de larges zones sombres semblant dépourvues de rayonnement. Dans les trous coronaux, le magnétisme s'étend radialement vers l'extérieur et offre une voie rapide au vent de vitesse élevée. La source du flux à faible vitesse demeure néanmoins une énigme que SOHO s'attachera à résoudre.

Instruments d'étude du vent solaire

Les données de télédétection et les observations in situ de la couronne recueillies par SOHO constitueront un ensemble exhaustif de données contribuant à l'étude du vent solaire de sa source jusqu'à la Terre. Nous avons déjà présenté deux instruments, UVCS et LASCO, qui fourniront des informations sur la température, la densité et la vitesse des régions proches du Soleil dans lesquelles la vitesse du vent solaire s'accroît et où il trouve sa source (voir le paragraphe « Instruments d'étude de l'atmosphère solaire »). Trois instruments embarqués par SOHO, à savoir CELIAS, COSTEP et ERNE, analyseront in situ les particules chargées du vent solaire. L'instrument SWAN cartographiera la structure à grande échelle du vent solaire.

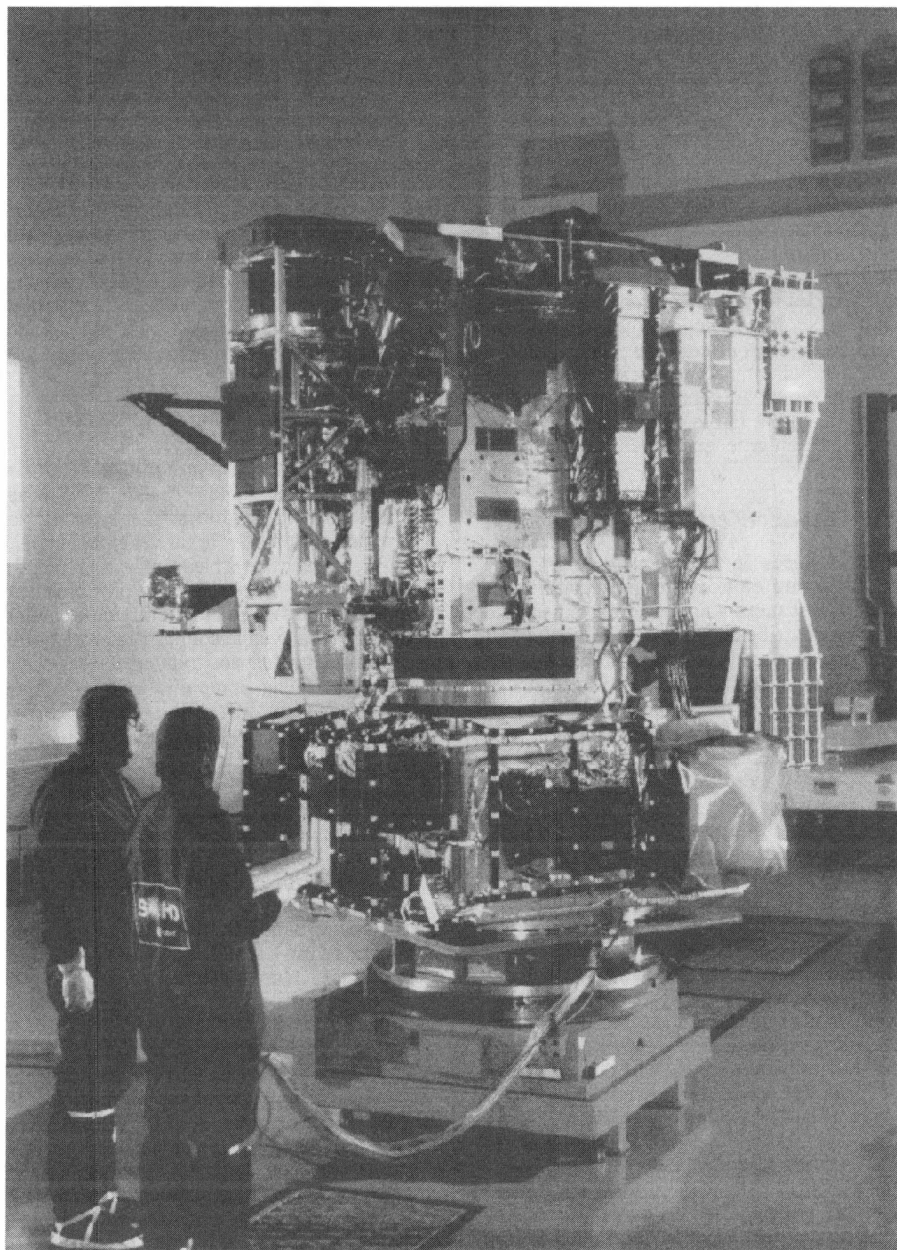
L'instrument CELIAS (Charge, Element and Isotope Analysis System) mesurera la masse, la charge ionique et l'énergie des deux composantes (flux à faible et haute vitesse) du vent solaire ainsi que des particules énergétiques produites lors des explosions solaires. Les instruments COSTEP (Comprehensive SupraThermal and Energetic Particle analyser) et ERNE (Energetic and Relativistic Nuclei and Electron experiment) seront utilisés ensemble pour étudier les processus de libération d'énergie et d'accélération des particu-

les dans l'atmosphère solaire ainsi que la propagation des particules dans le milieu interplanétaire. COSTEP mesurera les spectres énergétiques des électrons (jusqu'à 5 MeV), des protons et des noyaux d'hélium (jusqu'à 53 MeV/noyau). ERNE mesurera les spectres énergétiques des ions lourds (jusqu'à 540 MeV/noyau), le rapport des teneurs isotopiques et l'anisotropie des flux de particules. L'instrument SWAN (Study of Solar Wind ANisotropies) produira des cartes complètes du ciel montrant la densité d'hydrogène dans le vent solaire : il déterminera la distribution des flux massiques dans le vent solaire, de l'équateur aux pôles, ainsi que les variations de cette distribution.

Commande et contrôle de SOHO

L'ESA assume la responsabilité générale de la mission SOHO tandis que la NASA se charge du lancement, de la poursuite, de la commande et du contrôle du véhicule spatial. Celui-ci sera lancé de la base de Cap Canaveral, en Floride, par un Atlas IIAS, le plus puissant des lanceurs Atlas-Centaur. Le véhicule spatial communiquera avec le sol par l'intermédiaire du Réseau pour l'espace lointain (DSN) de la NASA. Ce réseau comprend trois antennes radio installées en différents points du globe, l'une à Goldstone (Etats-Unis), l'autre à Madrid (Espagne) et la troisième à Canberra (Australie). A elles trois, ces antennes permettent de rester en contact permanent avec les satellites, quelle que soit leur position par rapport à la Terre.

Lorsque le DSN aura enregistré les données de SOHO, celles-ci seront acheminées vers le Centre spatial Goddard de Greenbelt (Maryland, Etats-Unis), d'où SOHO recevra ses instructions. Une installation spécifique appelée Centre de commande des expériences de SOHO y a été implantée. Elle servira à centraliser toutes les opérations concernant SOHO. Les chercheurs s'y rendront pour utiliser l'observatoire spatial et planifier les études scientifiques dont il sera chargé. Les données provenant de toutes les observations y seront stockées dans des archives et les chercheurs du monde entier pourront y accéder par voie électronique, à l'aide de leurs ordinateurs.



SOHO en laboratoire (©) ESA

La Terre sous influence

Heureusement pour la vie sur Terre, le champ magnétique terrestre joue le rôle d'un écran protecteur qui empêche le vent solaire de nous heurter de plein fouet; il le renvoie vers l'extérieur en y creusant une cavité. Pourtant, ce cocon magnétique, appelé magnétosphère, est constamment malmené, déformé et remodelé par un vent solaire d'intensité variable, dont une partie parvient à traverser les défenses magnétiques de la Terre en leurs points faibles. Le Soleil tisse autour de la Terre une vaste toile mouvante, constituée de particules énergétiques, de courants électriques et de champs magnétiques.

Les rafales du vent solaire peuvent affecter considérablement notre environnement. Elles peuvent perturber le champ magnétique terrestre et déclencher des tempêtes géomagnétiques, elles sont à l'origine des aurores boréales ou australes, peuvent perturber les systèmes de communication et de navigation, endommager les circuits électroniques, mettre en danger les astronautes et provoquer de vastes pannes d'électricité. Les études de SOHO sur l'accélération, l'évolution et l'origine du vent solaire intéressent directement les activités humaines. Les effets du vent solaire

ont une telle importance que les centres nationaux emploient des prévisionnistes de météorologie spatiale et surveillent en permanence le Soleil, à l'aide d'instruments au sol et embarqués, afin de pouvoir lancer l'alerte en cas d'activité trop intense de notre astre.

Le programme d'étude des relations Soleil-Terre, qui comprend SOHO et sa mission complémentaire Cluster, a pour objectif de mieux comprendre les relations vitales qui existent entre le Soleil et la Terre. SOHO étudiera la source de tous ces phénomènes, à savoir le Soleil, afin de déterminer et d'analyser l'origine des perturbations que subit la Terre. Cluster étudiera en détail et en trois dimensions, puisqu'il se compose d'une flotte de quatre satellites d'étude de la magnétosphère, la nature physique des phénomènes se produisant dans l'environnement proche de la Terre.

En guise de conclusion, citons Roger M. Bonnet : « Tous ceux qui ont travaillé sans relâche à la mise au point de la charge utile, de la plate-forme et du secteur sol de SOHO doivent être remerciés pour leur excellent travail; ils ont réalisé un outil remarquable qui nous aidera à mieux comprendre le Soleil et son environnement, l'héliosphère. »

* * *