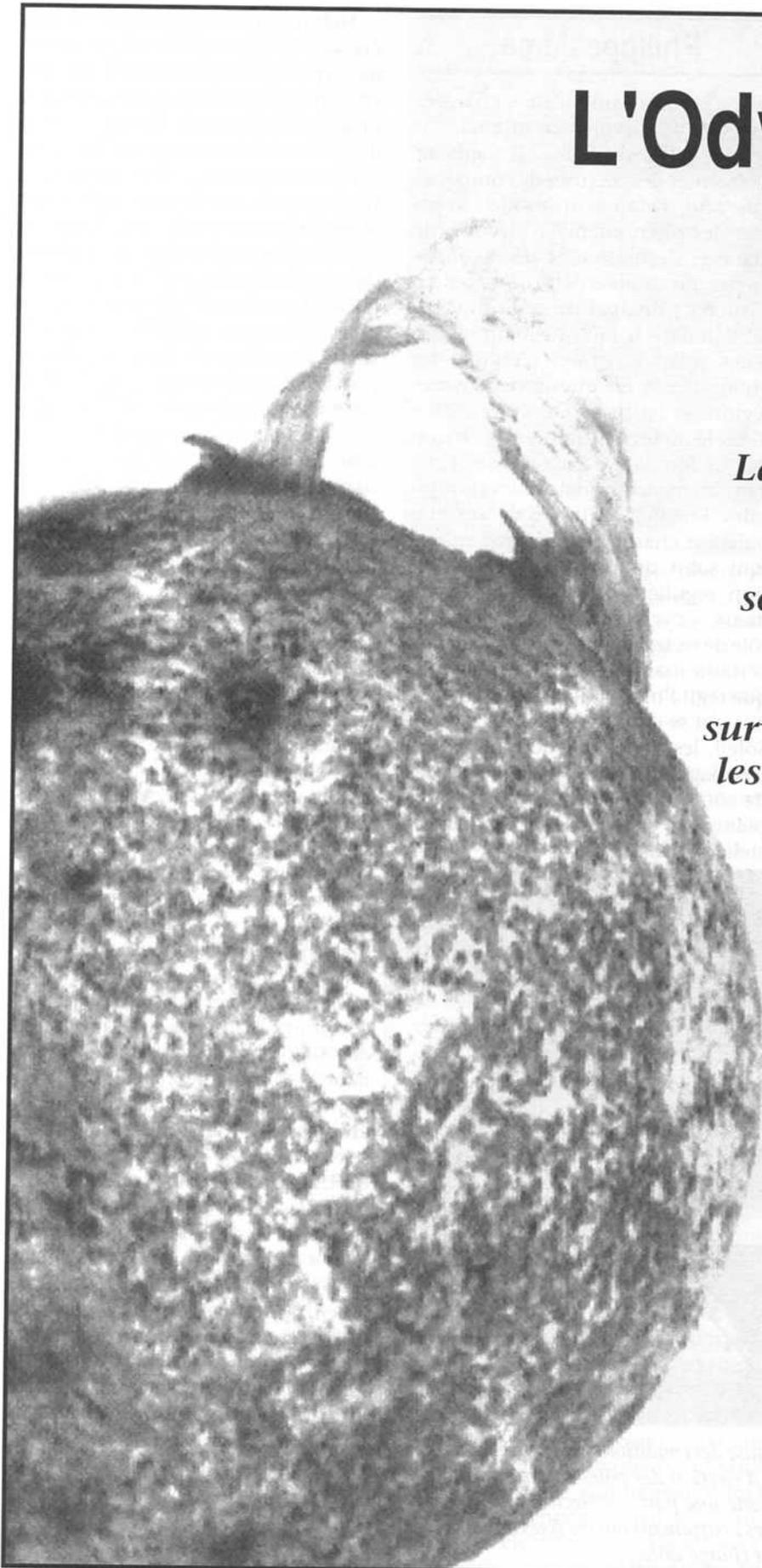


L'Odyssée de la sonde Ulysse

Lancée en 1990 par la navette Discovery (mission STS-41), la sonde Ulysse poursuit un étonnant périple qui lui permettra de survoler successivement les deux pôles du Soleil et de révolutionner nos connaissances en physique héliosphérique.



Dans le domaine des succès historiques en matière d'astrophysique spatiale, il se pourrait fort bien que cette année reste inscrite à jamais comme celle de la réussite de l'obstination de la division des programmes scientifiques de l'ESA. Après les succès de la sonde cométaire Giotto et du satellite d'astronomie Hipparcos, un nouvel engin européen, la sonde polaire solaire Ulysse, se rapproche actuellement à grande vitesse du pôle sud du Soleil et se prépare à réaliser une grande première. Pour des raisons d'efficacité, les responsables scientifiques de l'ESA et leurs associés américains ont choisi une étonnante et paradoxale trajectoire jupitérienne.

Historique et raisons d'un choix

La sonde européenne Ulysse peut être considérée comme la rescapée miraculeuse d'un projet international ambitieux, proposé officiellement en 1982 et dénommé ISPM (International Solar Polar Mission). Dans sa première définition, le projet ISPM consistait en deux sondes, l'une euro-

Philippe Jamet

péenne, l'autre américaine, chargées chacune de survoler simultanément un des pôles du Soleil. Il s'agissait d'effectuer des mesures de comparaison, afin d'établir un modèle complet des phénomènes d'éjection de matière, de plasma et de rayonnements qui caractérisent notre Soleil. L'intérêt principal de cette mission résidait dans le fait que le survol des pôles solaires permet d'étudier les phénomènes en question dans des régions et latitudes élevées, précisément là où les contraintes du champ magnétique s'exercent moins fort que dans les régions équatoriales et tropicales. En effet, les lignes de force du puissant champ magnétique solaire (qui subit un phénomène d'inversion régulier correspondant au fameux « cycle solaire »), jouent un rôle de vecteur dans ces régions. D'une certaine manière, ce champ magnétique régit l'interaction des phénomènes qui se déroulent à l'intérieur du Soleil, les ondes de choc qui les accompagnent avec les parties externes de son atmosphère, le milieu interplanétaire et même le milieu interstellaire proche.

Hélas, phénomène courant aux Etats-Unis depuis la fin du programme Apollo, l'obsession de donner systématiquement la préférence aux projets à court terme, fit passer l'étude des zones invisibles du Soleil au niveau de « programme secondaire ». Le projet de sonde américaine fut abandonné et renvoyé aux calendes grecques, seul fut maintenu le projet de sonde défendu par l'ESA. Encore fallait-il pouvoir compter sur la NASA pour lancer cette petite sonde de plusieurs centaines de kilos. La fureur justifiée des scientifiques américains unie aux pressions de l'ESA aboutirent à un accord de principe pour le lancement de la sonde européenne, baptisée Ulysse à l'initiative du professeur italien Bertotti.

Conséquence de cet accord, la sonde européenne survolera alternativement les deux pôles du Soleil (en 1994 et 1995) mais avec, en contrepartie, l'embarquement d'un certain nombre d'instruments scientifiques américains et une participation plus grande des laboratoires d'outre-Atlantique, impliqués au départ sur le projet de sonde américaine. Ainsi, dix-neuf équipes scientifiques américaines sont désormais impliquées sur Ulysse, auprès des trente équipes européennes. Ils réalisèrent l'exploit d'intégrer un système d'antennes à deux mats, des supports pour instruments, un générateur énergétique radioisotopique RTG, des systèmes de télécommunications et de traitement des données, un système de commande et contrôle d'attitude, de petits réservoirs alimentant le moteur en plus des 54,7 kilos de charge utile scientifique ! A cela, il faut ajouter qu'Ulysse comporte également des systèmes de protection pour ses instruments les plus fragiles et une fraction « d'électronique durcie ». Il ne faut pas oublier qu'à proximité du Soleil, un engin scientifique sophistiqué est soumis à des bombardements de protons et d'ions lourds de haute énergie, dont la menace est à prendre en considération au niveau des instruments les plus sensibles, et plus encore au niveau des logiciels embarqués.

A l'instar de ce qui s'est passé pour d'autres satellites scientifiques actuel-



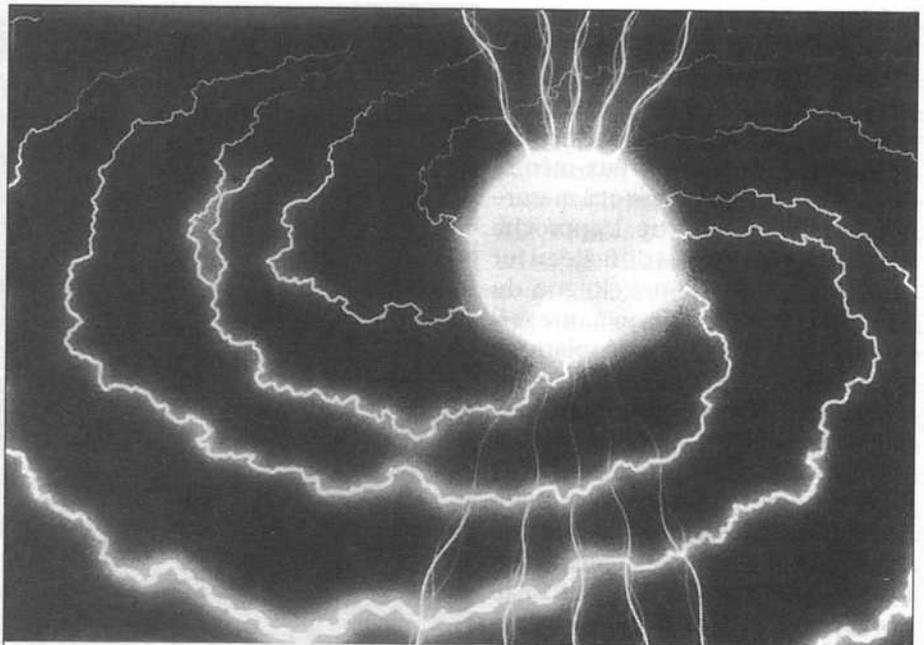
La sonde Ulysse en préparation au sol. A cause des conditions hostiles régnant dans le milieu interplanétaire et dans la ligne d'éjection des pôles solaires (protons et électrons très énergétiques), Ulysse comporte une part « d'électronique durcie ». Cependant, les systèmes de protection de ses instruments ont été fixés au minimum indispensable, afin de ne pas pénaliser sa charge utile.

lement opérationnels, les logiciels d'Ulysse ont été conçus de façon à ce qu'un impact trop énergétique ne puisse avoir des conséquences rédhibitoires : il serait alors possible de les recalibrer à distance par radio. Fait étonnant, la plupart des instruments scientifiques de la sonde européenne n'ont pas été dotés de systèmes de protection très importants afin de maximiser la charge utile scientifique. Ils risquent donc d'être confrontés à une éruption solaire chromosphérique imprévue : au niveau des pôles solaires, le champ magnétique est faible et ne peut guère « contrôler », comme c'est le cas aux latitudes plus basses, les phénomènes venus de la photosphère (couche inférieure et la plus dense de l'atmosphère solaire), ou de la zone de convection qui transmet les rayonnements et le plasma vers les couches atmosphériques.

Une autre contrainte est le passage rapproché du Soleil, et en particulier au-dessus de ses pôles. En effet, il n'était pas évident de conserver à la sonde suffisamment de charge utile résiduelle, surtout lorsqu'il lui faut franchir deux « intervalles énergétiques » dont l'un implique un changement radical de plan orbital.

Une trajectoire épique

Jusqu'à cette période extraordinaire qui va s'étaler de juin à septembre de cette année, avant que la sonde « replonge » vers l'autre pôle (Nord) en mai 1995, tous les engins et satellites ayant eu pour objectif d'étudier le Soleil n'ont jamais effectué leur mission que dans le plan de l'écliptique (cas de certains satellites soviétiques en orbite terrestre ou du satellite américain Solar Max), même lorsqu'elles se sont rapprochées de celui-ci à des distances déjà intéressantes. Ce fut le cas notamment des deux sondes allemandes Helios mises à poste par des lanceurs américains : Hélios 1 et 2 s'approchèrent respectivement à 48 et 45 millions de kilomètres de l'astre du jour en 1975 et 1976, soit à peu près au niveau de l'orbite de Mercure. Lors de ces deux occa-



Représentation schématisée des lignes de force du champ magnétique solaire dans l'espace interplanétaire. Au-dessus des pôles, où la rotation du Soleil ne se fait plus sentir, les lignes de force ne subissent plus cet effet de torsion s'étendant radialement vers l'extérieur.

sions, la charge utile des deux sondes était limitée à quelques kilos !

Il fut possible d'embarquer des instruments d'étude solaire autrement plus conséquents avec la station Skylab en 1973 (télescope couplé à un coronographe et qui permit de prendre plus de 170.000 photos de notre étoile), ou lors de missions de la navette américaine. Mais les scientifiques restaient sur leur faim : observer le Soleil à partir de l'écliptique ne donne en effet qu'une vue tronquée des phénomènes solaires. Comme nous l'avons déjà souligné, à cette latitude le champ magnétique solaire obère complètement le développement « naturel » des phénomènes induits à l'extérieur par son activité interne. Il apparaît évident aux spécialistes que ce champ magnétique doit beaucoup moins jouer, au niveau des pôles, sur ces phénomènes et leur interaction avec le milieu interplanétaire et les franges du milieu interstellaire. Un des objectifs prioritaires d'Ulysse est notamment d'étudier comment se comporte le fameux « vent solaire » aux pôles (que la sonde européenne survolera à environ 210 millions de kilomètres). Principalement composé de particules très chargées électriquement (protons et électrons), le vent solaire est proba-

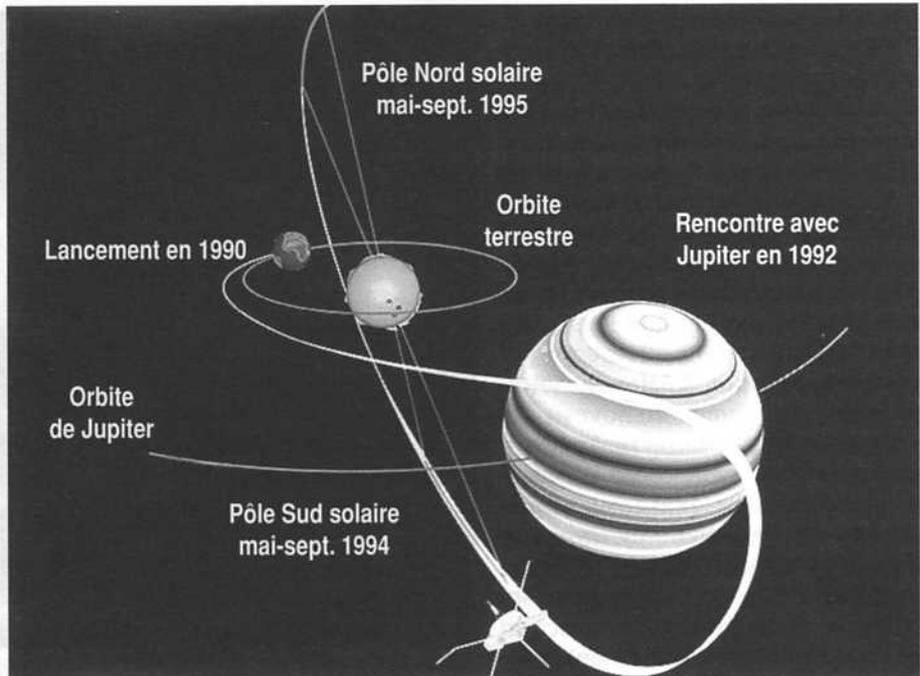
blement causé par des phénomènes de différences de températures et de pression existant entre deux des couches externes de l'atmosphère solaire, à savoir la chromosphère et la couronne, ou plus exactement la partie interne de celle-ci.

Comme le souligne Roger-Maurice Bonnet (directeur des programmes scientifiques de l'ESA) : « En raison de problèmes de limitation, la mission Ulysse revêt un caractère particulièrement innovateur ». Innovatrice, Ulysse l'est en effet et pas uniquement du fait de son instrumentation mais aussi de son incroyable trajectoire ! Aller d'abord à la rencontre de Jupiter pour s'approcher du Soleil au moindre coût d'énergie, il fallait y penser... et c'est pourtant ce qu'avait déjà proposé, dès 1937, le pionnier soviétique de l'astronautique Ari Abramovitch Sternfeld : l'étonnante orbite actuelle de la sonde européenne est décrite de façon prémonitrice dans son livre *Introduction à la cosmonautique* édité, et pratiquement passé inaperçu, aux pires moments de la période stalinienne !

Pour comprendre la nature du problème, il faut considérer que les astres du Système solaire ne sont pas fixes les uns par rapport aux autres, et

le fait que la Terre tourne autour du Soleil ne facilite pas les choses. On peut en effet imaginer toute la surface allant du Soleil à la Terre comme une sorte de gigantesque disque strié de sillons tournant sur eux-mêmes de plus en plus vite au fur et à mesure que l'on va vers le centre. L'approche devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que l'on s'éloigne du référentiel terrestre, jusqu'à une certaine distance où la gravité solaire va brusquement prendre le dessus et littéralement « happer » n'importe quel objet. Le problème se complique encore davantage si, parallèlement et dans le même temps, l'on veut changer totalement de plan orbital en effectuant un « redressement à la verticale » pour survoler les pôles solaires : l'énergie à mettre en œuvre devient alors disproportionnée et implique que le volume total du système propulseur finit par occuper tout le volume de l'engin polaire solaire.

Ainsi, si l'approche de Vénus permet d'y accéder avec une charge résiduelle importante et un supplément de vitesse réduit à partir d'une orbite terrestre (ce qui explique que plus de 20 sondes américaines et surtout soviétiques aient déjà été envoyées vers « l'étoile du Berger »), tout supplément d'énergie impliqué par une orbite solaire située un peu en deçà de celle de Vénus commence à devenir conséquent. Par exemple, pour la planète Mercure (qui tourne autour du Soleil entre 45 et 69 millions de kilomètres), un vaisseau de type « vénusien », désireux d'atteindre à son tour l'orbite mercurienne en trajectoire directe, est contraint d'augmenter considérablement son système de propulsion, ce qui réduit de *deux tiers* sa charge utile scientifique ! L'effort à réaliser pour la propulsion devient un « véritable gouffre à énergie » et les tables de « sommes des carrés », bien connues des spécialistes de l'astronautique, nous montrent que, rien qu'en restant dans le plan de l'écliptique, nos techniques spatiales actuelles ne nous permettent pas de mettre en trajectoire directe sur une orbite solaire à 40 millions de kilomètres plus de 500 grammes de charge utile scientifique... Ceci explique pourquoi, en 1974, la sonde Mariner 10, dont l'un des objectifs était de



Les scientifiques de l'ESA et de la NASA ont repris l'idée géniale du pionnier soviétique Sternfeld, consistant à utiliser la gravité de Jupiter comme « levier gravitationnel » pour accélérer la sonde de plus de 20 km/sec sur l'orbite solaire choisie.

survoler Mercure, utilisait l'attraction de Vénus comme « levier gravitationnel » pour passer le 29 mars de la même année à 700 kilomètres de la planète la plus proche du Soleil. Imaginée par Sternfeld, cette technique du « levier gravitationnel pour orbite solaire indirecte » a consisté, pour Ulysse, à s'éloigner le plus possible de notre étoile et à utiliser le tremplin de la réaction de gravitation d'un des gros corps planétaires gazeux de la partie extérieure du Système solaire. Dès lors qu'un tel corps est survolé à une distance bien précise, et dans certaines conditions de distance, de vitesse et de position, il est alors possible, à partir de manœuvres effectuées avec un moteur d'attitude, d'utiliser résiduellement une partie de cette vitesse dans le plan perpendiculaire choisi et correspondant à l'orbite solaire polaire désirée, et de conserver celle-ci pendant tout le trajet précédant la phase d'incurvation de cette orbite à l'entrée du domaine solaire proprement dit. L'idéal pour Ulysse aurait été d'utiliser successivement la gravité de Jupiter en mode « équinoxiale » (laquelle communique dans un premier temps un supplément d'énergie qui est « pompé » par la sonde), et d'effectuer la manœuvre orbitale dé-

finitive après une seconde accélération au niveau de Saturne. Dans ce cas, le voyage aurait demandé de longues années supplémentaires, inconvenient qui ne fut pas jugé suffisamment avantageux malgré la possibilité d'embarquer sur Ulysse quelques kilos d'instruments scientifiques supplémentaires. Avec l'impulsion de 20 km/sec donnée par Jupiter, notre sonde possède suffisamment de « réserves » sur sa lancée pour pouvoir effectuer sa mission commencée en 1990.

Ulysse rencontre Jupiter

Les scientifiques de l'ESA et de la NASA auraient eu bien tort de laisser passer l'occasion d'une telle trajectoire, choisie pour des nécessités purement techniques. Jupiter, qui n'avait pas reçu la visite d'un observatoire spatial terrestre depuis Voyager 2 en 1979, a été l'objet de certaines observations lors de son survol le 31 janvier 1992. A la grande surprise des scientifiques, il fut démontré que le champ magnétique de Jupiter était en quelque sorte « modulé » par le

vent solaire, phénomène qui n'avait pas été mis en évidence avec les sondes Pioneer 1, Voyager 1 et 2. Il semble bien en effet que l'interaction de ce vent solaire sur le champ magnétique jovien (outre des aurores boréales dans la haute atmosphère qui se traduisent par la formation d'ions d'hydrogène moléculaire H_3), amène un phénomène d'étirement de celui-ci. Il se peut que la vitesse atteinte par ce vent solaire au niveau de l'orbite de Jupiter soit plus élevée que prévue. Rappelons qu'au niveau de l'orbite terrestre, cette valeur se situe aux alentours de 400 km/sec, ce qui est considérable.

Une autre découverte intéressante, et changement important depuis Voyager 2, concerne le tore de plas-

ma et de poussières qui entoure en permanence le satellite Io. Ce tore composé d'une forte proportion de ions soufre, oxygène atomique et hydrogène moléculaire H_3 diffuse un véritable « anneau jovien » sur l'orbite que décrit Io autour de Jupiter. Il semblerait que ce tore ait considérablement évolué depuis 1979 et qu'il soit le siège de radiations intenses, notamment d'émissions radio mises en évidence par l'expérience URAP, où étaient impliqués des laboratoires français. Une des découvertes effectuées par Ulysse à propos de cette étonnante structure fut que les points d'émission radio du tore de Io correspondaient à des hétérogénéités d'intensités locales, liées au champ magnétique jovien. On sait que ce tore est dû au volcanisme de Io dont le

noyau n'est pas vraiment actif, mais dont l'étonnante chaleur interne est due aux « forces de marée » exercées conjointement sur ce petit satellite de 3630 kilomètres de diamètre par l'attraction gravitationnelle conjuguée de Jupiter (dont la masse est de 317,9 fois la Terre !) et de deux autres satellites galiléens à savoir Ganymède et Callisto (deux gros conglomerats de silicates et de glaces dont les diamètres respectifs sont de 5260 et 4840 kilomètres). Cette hypothèse du rôle des forces de marée comme facteur principal du volcanisme de Io fut émise, à la suite des missions Voyager, par les spécialistes Cassen, Peale et Reynolds, puis les observations d'Ulysse n'ont fait que renforcer la validité de ce modèle. La dispersion de ces poussières et de ce plasma

La participation française

Après les Américains et les Allemands, les Français peuvent être considérés comme le troisième pays en importance impliqué dans le programme Ulysse. Outre le CNES impliqué sur URAP-STO, d'autres institutions scientifiques hexagonales participent activement aux expériences embarquées sur la sonde européenne : c'est le cas du Département de recherche spatiale de Meudon (DESPA), du Centre d'études spatiales des rayonnements de Toulouse (CESR), du CRPE d'Issy-les-Moulineaux et du service d'Astrophysique du CEA à Saclay.

Associés au Goddard Space Flight Centre de la NASA et à l'Université du Minnesota, le DESPA et le CRPE ont concentré une fraction importante de leurs efforts sur la mise au point d'antennes magnétiques pour mesurer les ondes de plasma, de sondes de mesure des densités électroniques et un système de traitement des données dans le cadre du programme URAP-STO. Parmi les autres objectifs de cette association, notons l'étude des émissions radio interplanétaires venues du Soleil, la mesure « in situ » de la densité et de la température du vent solaire en fonction des latitudes, l'influence des ondes de choc magnétohydrodynamiques à l'origine de discontinuités dans le vent solaire, le rôle des ondes acoustiques solaires dans les phénomènes de transfert d'énergie et de plasma entre les diverses couches atmosphériques de notre étoile, et l'élaboration d'un modèle à grande échelle des structures évolutives qui rythment l'activité héliosphérique, en fonction des diverses latitudes, en partant de l'Equateur jusqu'aux pôles solaires. L'opportunité offerte par le passage d'Ulysse à proximité de Jupiter a permis également à ces laboratoires d'étudier le rôle des ondes UBF dans le phénomène des aurores polaires de Jupiter qui se traduit notamment par l'émission d'ions d'hydrogène moléculaire.

Une autre implication importante des scientifiques français sur Ulysse a été le fait du fameux CESR de Toulouse, mondialement connu par les travaux des équipes Vedrenne-Mandrou, déjà impliqué sur le programme franco-soviétique GRANAT-SIGMA. Associés aux Allemands du MPI/Garching, au Space Research Institute d'Utrecht et au Space Science Laboratory de la NASA, les chercheurs toulousains ont mis au point un instrument composé de deux détecteurs de rayons X dont l'un travaille à la fois sur les X et sur les Gamma. Un des objectifs du programme GRB-HUS, auquel participe le CESR, a été de mettre dans un carcan de surveillance continue, au cours du voyage depuis Jupiter et lors des passages au-dessus de l'Equateur et des pôles solaires, l'émission X du Soleil en tentant (au moyen d'une vision stéréoscopique en profondeur sur les diverses couches de son atmosphère) d'en localiser les points d'émission particuliers, variables ou fixes. Un des points intéressants de ce programme consiste à comparer les spectres X et Gamma des hautes latitudes et des régions polaires à celui des régions équatoriales. Profitant encore une fois des opportunités offertes par le voyage « jovien » choisi pour Ulysse (qui a conduit la sonde à s'éloigner de plus de 5,3 unités astronomiques de l'astre central), les chercheurs du CESR et leurs associés ont pu aussi étudier les sursauts gamma cosmiques galactiques et effectuer des tentatives de localisation par triangulation. Certaines équipes impliquées dans les programmes radio ont également profité de cette occasion pour étudier le fameux « pulsar du Crabe », dont les émissions sont en effet parfois « réfractées » par le vent solaire et la couronne solaire.

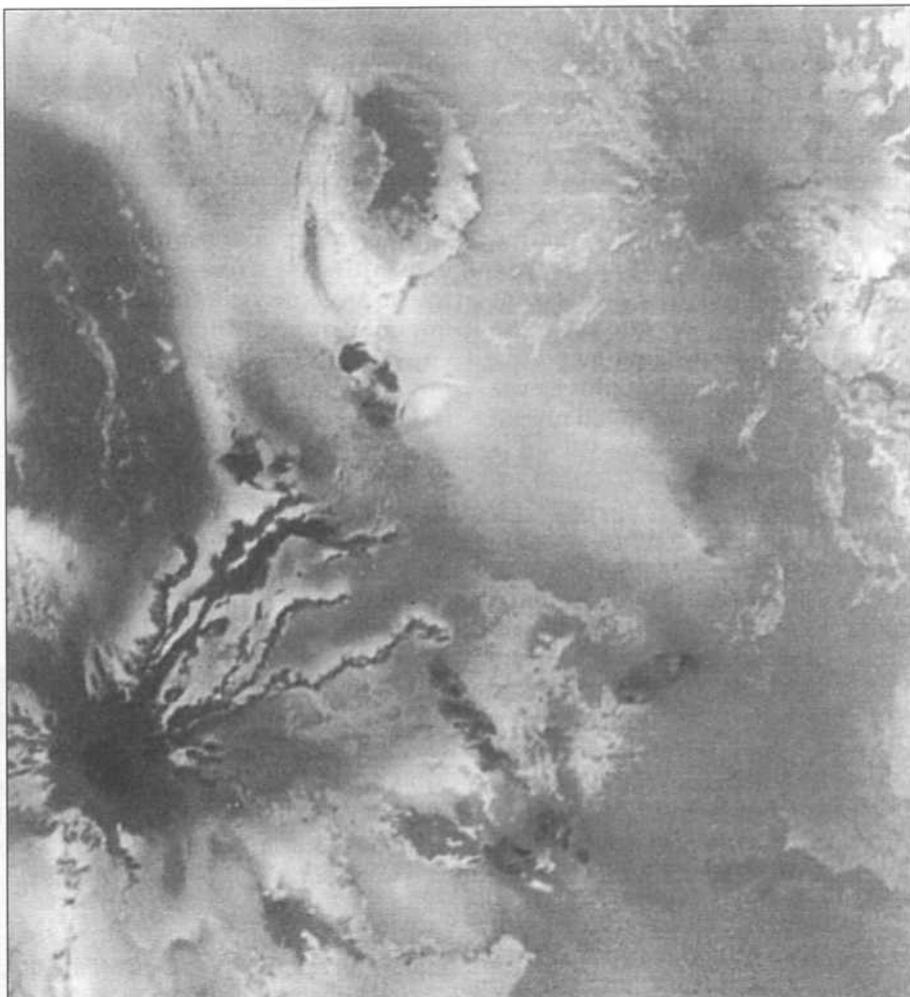
Parmi les participants français au programme Ulysse, n'oublions pas le Service d'Astrophysique du CEA impliqué avec l'Université allemande de Kiel dans la construction d'un télescope à électrons.

venu de Io a d'ailleurs permis à Ulysse de cartographier le champ magnétique de Jupiter puisque ce plasma et ces poussières s'étendent, de façon plus diffuse, en dehors du tore et au-delà de l'orbite de Io, pouvant aller jusqu'à 600.000 km de celle-ci. Ces poussières sont piégées par le champ magnétique de la planète géante jusqu'au niveau de la magnétopause jovienne, là où ce champ subit de plein fouet les ondes de choc du vent solaire. Les mesures effectuées par Ulysse ont également montré que les émissions radio étaient majoritairement concentrées dans les hétérogénéités situées dans les parties extérieures de cette incroyable structure. Ces parties externes se déplacent à une vitesse élevée qui peut atteindre 100 km/sec (le tore de Io orbite autour de Jupiter à 400.000 km de distance et en 45 heures), et sont parfois le siège de températures allant de 5000 à 10.000°C !

L'arrivée dans le domaine solaire

C'est à partir de ce mois de mai qu'Ulysse, ayant étudié également le comportement des poussières cométaires du milieu interplanétaire, va commencer son travail purement solaire. Elle va notamment tenter de mesurer la perte de masse solaire globale en comparant ce qui se passe au niveau des pôles de notre étoile avec ce que l'on connaît des régions équatoriales, où les lignes de force du champ magnétique sont plus refermées. On en espère une simulation plus proche de la réalité de l'évolution future du Soleil, en mesurant les fameuses « ondes d'Alfvén » qui sont produites par l'agitation de l'hydrogène à basse fréquence.

L'étude de ces ondes d'Alfvén pourrait peut-être nous permettre d'extrapoler certains mécanisme à des étoiles de catégorie solaire. Pour les scientifiques, il ne fait aucun doute que les effets de celles-ci apparaissent plus nettes à mesure que l'on s'éloigne de l'écliptique. « Plus pures et mieux distribuées, elles permettent de mieux étudier les mécanismes d'interaction entre les ondes et le vent solaire et la structure



Selon le Docteur Wenzel, l'un des spécialistes du centre de l'ESA-ESTEC, « les mesures d'Ulysse permettront peut-être d'apporter des éléments de réponse possibles sur l'évolution volcanique de Io ».

de la photosphère au voisinage des pôles », comme le dit André Mangeney, de l'Observatoire de Paris-Meudon, dont le laboratoire participera au dépouillement des données envoyées par Ulysse.

Le Soleil est en effet un lieu d'interactions complexes et variables entre les diverses zones qui le composent à partir du noyau : elles vont de la zone de nucléosynthèse (un tiers du rayon du Soleil) là où s'effectuent les réactions proton-proton et hélium-carbone (elles contribuent notamment à la formation de l'hélium-3), à la couronne externe en passant par la zone de transfert d'énergie (« zone d'équilibre radiatif »), où se forment les phénomènes de convection de la matière sous les couches atmosphériques, la photosphère (source principale du rayonnement visible) et la chromosphère, moins dense que la

photosphère, mais où la température externe monte brusquement à la suite d'ondes de choc qui contribuent à l'ionisation de l'hélium, de l'hydrogène et à la formation de rayons X. Ces phénomènes, de même que le champ magnétique (dont les variations sont à l'origine des « facules » et des « taches » de la photosphère), ont bien sûr des conséquences sur la couronne externe, là où s'échappe notre fameux vent solaire.

Parmi les scientifiques participant à la mission il en est un en particulier qui doit se frotter les mains en pensant avec humour qu'une longue patience est parfois récompensée et que la découverte peut provenir d'une très longue obstination. Il s'agit du physicien américain John Simpson qui avait proposé une mission identique à l'ancêtre de la NASA... en 1959! ■