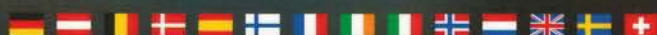


Nigel Calder



Au-delà de la Terre



Les missions scientifiques
de l'Agence spatiale européenne

Publié par

Division des Publications ESA
c/o ESTEC
PO Box 299
2200 AG Noordwijk, Pays-Bas
Tel. (31) 71.565.6565
Fax (31) 71.565.6040

Rédaction

Nigel Calder, Londres

Traduction

Anne-Françoise Méhay
et Evelyne Ron
ESA Paris

Coordination

Simon Vermeer, ESA Paris

Responsable de l'édition

T.D. Guyenne
ESA Noordwijk

Mise en pages et montage

Total Design, Amsterdam
Hans P. Brandt
Gonnie Hengelmolen

Composition et Photogravure

Boxem, Amsterdam

Copyright

© Agence spatiale européenne 1995

Prix

Dfl 35

ISBN 92-9092-388-1

Une mission scientifique ne saurait être menée à bien sans une équipe de chercheurs très motivés. Rien d'étonnant à cela, puisqu'il faut défendre un projet pendant des années avant de le voir adopter; se battre pour obtenir le droit d'envoyer quelques kilogrammes d'expériences dans l'espace; construire des instruments d'une finesse remarquable et puis leur faire subir les pires traitements pour vérifier qu'ils sont aptes à fonctionner dans l'espace; espérer qu'à l'heure du lancement, l'objet conçu avec tant d'ardeur ne plongera pas prématurément au fond d'un océan; et attendre parfois des années avant d'obtenir des résultats. Pourquoi prendre tant de peine? Tout simplement pour en savoir plus sur cet Univers qui est le nôtre.

Table des matières

Un choix de missions propices aux découvertes	3
PREMIÈRE PARTIE Le Soleil et sa famille	7
L'exploration du système solaire: Aperçu général	8
Ulysse: Survol des pôles du Soleil	19
SOHO: Comprendre les humeurs du Soleil	27
Cluster: Des brèches dans l'écran qui protège la Terre	35
Huygens: Le plus étrange des mondes	43
Rosetta: Valse avec une comète	51
DEUXIÈME PARTIE L'Univers vu de l'Espace	59
Les télescopes en orbite: Aperçu général	60
IUE: Un vieux routier de l'ultraviolet	77
Hipparcos: L'aspect du ciel	83
Hubble: La transparence de l'espace-temps	91
ISO: L'astronomie au froid dans l'infrarouge	99
XMM: Un appétit dévorant pour les rayons X	107
Intégral: Le rayonnement gamma d'une nature déchaînée	115
FIRST: L'Univers moléculaire	123
TROISIÈME PARTIE Horizon 2000 Plus	131
Des tâches difficiles pour le siècle à venir: Aperçu général	132

Un choix de missions propices aux découvertes



Roger Bonnet, directeur du Programme
scientifique de l'ESA

Photo: S. Brunier/Ciel et Espace

Au-delà de notre ciel teinté de bleu par l'atmosphère terrestre s'étend l'Univers, ce vide spatial noir ponctué de planètes, d'étoiles et de galaxies. C'est le royaume des chercheurs spatiaux, qui lancent des missions d'exploration du système solaire et font graviter des télescopes autour de la Terre pour mieux observer l'immensité dans laquelle baigne notre planète.

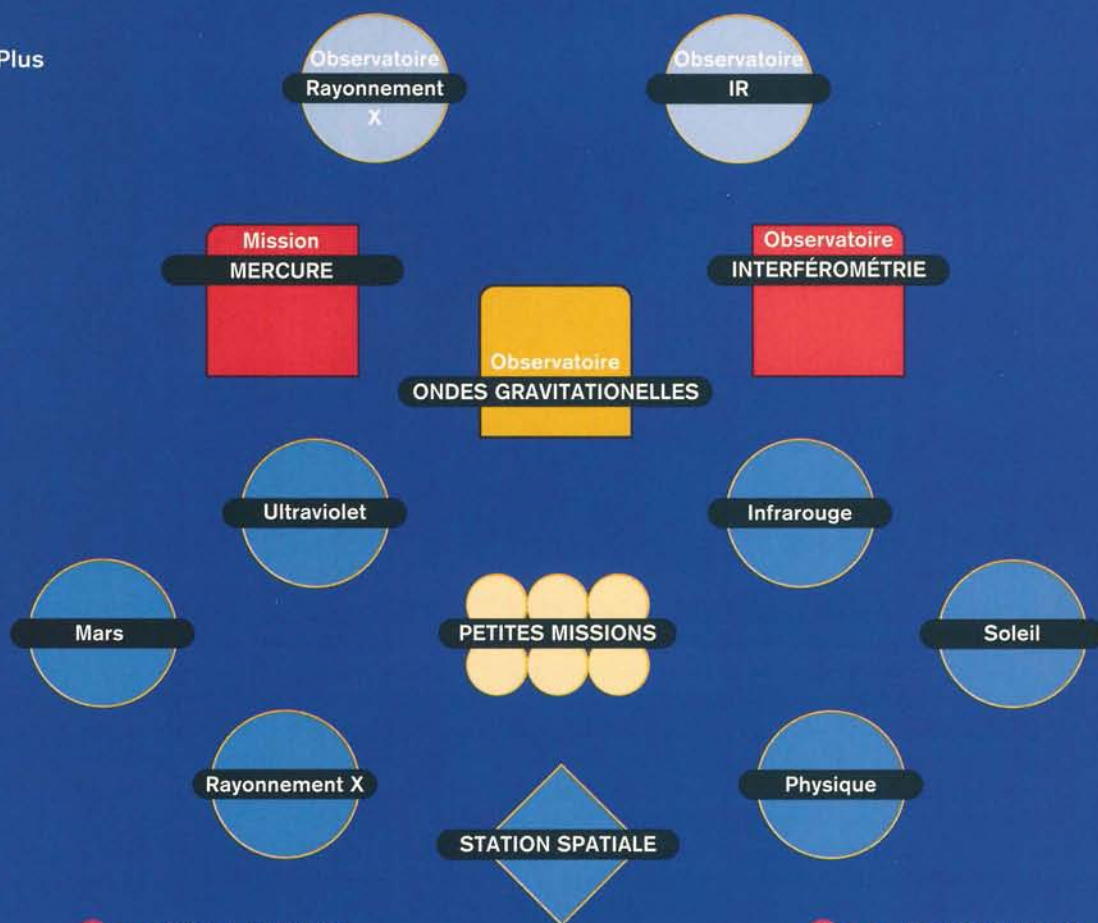
Le panorama des missions spatiales auxquelles est consacré le présent ouvrage débute par d'étonnantes découvertes faites au-dessus des pôles du Soleil et s'achève - pour l'instant - par des ébauches de projets ayant pour ambition de détecter les ondes gravitationnelles qui traverseraient l'espace.

A la clé de cette activité: quatorze pays, possédant chacun ses traditions et ses compétences scientifiques propres, réunis au sein de l'Agence spatiale européenne (ESA). Celle-ci invite les chercheurs de ces pays à proposer toutes sortes de missions et passe au crible les propositions qui lui sont soumises. Elle choisit des équipes de recherche dynamiques, représentant un large éventail de disciplines scientifiques et de pays, et leur demande de bien vouloir émettre des recommandations sur les missions à mettre en oeuvre.

Dans un premier temps, compte tenu des divergences de vues, l'Agence doit engager des études techniques détaillées sur une présélection d'options concurrentes. Puis un consensus commence à se dégager et les réflexions vont de l'avant, jusqu'au stade où l'on peut affirmer que telle mission est la bonne. Les délégués des pays, à qui il appartient d'approuver officiellement les missions, contestent rarement les avis des chercheurs. Ils savent qu'en procédant ainsi, l'ESA parvient à mettre sur pied des missions spatiales d'excellente qualité.

"Nous sommes sans complaisance à l'égard des idées brillantes qu'on nous présente", affirme Roger Bonnet, directeur du Programme scientifique de l'ESA. "Avant qu'une mission ne reçoive le feu vert, les sceptiques ne cessent de mettre en doute l'intérêt scientifique et technique du projet ainsi que son coût. Mais outre ces aspects techniques, toute proposition doit, pour prétendre figurer parmi les missions scientifiques de l'ESA, satisfaire à une condition suprême: prouver qu'il s'agit d'une aventure hors pair de l'esprit humain."

Horizon 2000 Plus
2006-2016



Horizon 2000
1985-2005



“Voici dix ans, nous avons lancé notre premier plan scientifique à long terme”, explique Roger Bonnet. “Il s’agissait du programme Horizon 2000. Aujourd’hui, l’ESA fait appel aux idées issues de l’imagination féconde des chercheurs européens. Elle exécute aussi des missions de premier plan, sans équivalent dans les programmes des autres agences spatiales. Nous collaborons aujourd’hui à plusieurs missions sur un pied d’égalité avec la NASA, tout en cherchant à tisser de nouveaux liens avec la Russie ou le Japon.”

Horizon 2000 et Horizon 2000 Plus

Evolution du programme scientifique de l’ESA. En 1994, une série de propositions pour un programme Horizon 2000 Plus est venue prolonger sur la deuxième décennie du XXI^e siècle le programme Horizon 2000 actuellement en cours de réalisation. Ces propositions comportent trois grandes missions “pierres angulaires”, complétant les quatre pierres angulaires d’Horizon 2000. Le coût de chaque pierre angulaire avoisine les 640 millions d’ECU (800 millions de dollars) au niveau des prix de 1995. Parmi les projets de plus courte durée figurent les missions de “taille moyenne”, moitié moins coûteuses que les précédentes, et les “petites missions”, d’un coût encore plus modeste. Il reste encore à choisir deux missions de taille moyenne dans le cadre d’Horizon 2000, quatre projets de ce type étant envisagés par ailleurs pour Horizon 2000 Plus. L’ESA est également susceptible de participer - dans la catégorie “taille moyenne” - à des projets internationaux d’exploration de Mars et du Soleil.

Avant que l’Europe ne prît de l’assurance dans le courant des années 80, les chercheurs américains et soviétiques tiraient parti des rivalités de la guerre froide pour programmer des missions spatiales plus ambitieuses les unes que les autres. A cette époque, leurs homologues ouest-européens étaient tributaires du bon vouloir des superpuissances pour le lancement de leurs satellites ingénieux, mais petits.

Puis la NASA laissa échapper une occasion exceptionnelle d’envoyer une sonde à la rencontre de la comète de Halley. L’ESA reprit le flambeau pour le compte des scientifiques européens et lança sa sonde Giotto en 1985 à bord d’une fusée Ariane. Un an plus tard, Giotto pénétrait dans la chevelure de poussières de la comète, à une profondeur que Soviétiques ou Japonais avaient préféré ne pas approcher avec leurs propres sondes parties elles aussi observer la comète. Les clichés et données recueillis par Giotto restent les meilleurs à ce jour, en attendant le rendez-vous, au XXI^e siècle, de la sonde Rosetta de l’ESA avec la comète Wirtanen.

Le programme spatial à long terme mis au point pendant les années 80 par les chercheurs européens qui conseillaient l’ESA reflète une assurance nouvelle.

Ce programme, Horizon 2000, avait pour ambition d’utiliser de la façon la plus audacieuse possible le budget modique, mais fiable, du programme scientifique en définissant les objectifs de quatre missions

“pierres angulaires” dont le coût était supportable sur un certain laps de temps. Le principe du choix à la carte des missions s’effaça alors devant celui de la table d’hôte, système souple dans la mesure où il prévoit d’intercaler des missions moins coûteuses d’une durée plus limitée. Et, tandis qu’Américains et Russes éprouvent plus de difficultés à financer des projets ambitieux au lendemain de la guerre froide, l’Europe maintient le cap.

Le nouveau programme Horizon 2000 Plus a pour objet de prolonger les activités du Programme scientifique de l’Agence sur la période 2006-2015. Les missions importantes proposées pour cette période sont l’envoi d’une sonde vers Mercure et le lancement d’un satellite utilisant la technique de l’interférométrie pour observer les étoiles, voire leurs planètes. Si le budget le permet, les conseillers scientifiques de l’ESA recommandent également de mettre sur pied une mission d’étude des ondes gravitationnelles utilisant six satellites. Une telle mission permettrait à l’ESA d’élargir le champ de ses recherches au-delà de leurs domaines traditionnels, à savoir l’étude du système solaire et l’astronomie spatiale, pour s’engager dans une troisième voie, celle de la physique fondamentale.

Pour ce qui est des programmes à long terme, cinq des missions décrites dans le présent ouvrage avaient été approuvées avant Horizon 2000 et y ont été incluses. A cela sont venues s’ajouter sept missions nouvelles, qui seront complétées par au moins deux autres missions d’ici la fin du siècle. Cet ensemble de missions va de SOHO et Cluster, dont les satellites vont être lancés en 1995 pour étudier le comportement du Soleil et ses effets sur la Terre, à FIRST, dont le lancement est prévu en 2005 et qui devrait ouvrir de nouveaux horizons dans le domaine de l’astronomie submillimétrique.

Motivation scientifique

Les missions appartiennent à différentes catégories. La première partie du présent dossier traite des engins spatiaux ayant pour objectif d'explorer les environs de la Terre, le Soleil et d'autres régions du système solaire. La deuxième est consacrée aux télescopes d'astronomie gravitant sur orbite terrestre. Chacune de ces parties commence par un aperçu général situant ces missions européennes dans un contexte plus large. La troisième partie donne un avant-goût du programme Horizon 2000 Plus.

L'observation par satellite de la Terre, de son sol, de ses océans et de ses glaces, de son atmosphère, de sa végétation et de son peuplement humain ne sera pas abordée ici. Car s'il est vrai que la télédétection a révolutionné la géographie et le suivi de l'évolution de l'environnement et que l'ESA occupe une position éminente dans ce domaine avec ses satellites météorologiques Météosat, ses satellites de télédétection ERS et la grande plate-forme Envisat en préparation, le domaine de la science spatiale proprement dite commence un peu plus loin, au-delà de l'atmosphère terrestre.

Les illustrations et tableaux apportent quelques précisions techniques sur les différents véhicules spatiaux, le texte mettant l'accent sur les finalités de chacune des missions avec le souci de rendre compte des facteurs scientifiques et humains qui président à l'immense effort toujours nécessaire.

Compte tenu de leur marge de faisabilité technique souvent étroite, les missions contribuent à stimuler le progrès technologique dans les pays membres de l'ESA. Certains projets répondent à une inquiétude au sujet du bien-être du genre humain: c'est notamment le cas de trois missions en cours qui explorent les relations entre l'humeur instable du Soleil et le climat sur Terre. Tous apportent des éléments de réponse aux questions suivantes: où l'espèce humaine se situe-t-elle dans l'espace-temps? comment la vie a-t-elle bien pu naître sur Terre alors que l'Univers dans son ensemble lui est hostile? Toutes ces missions sont autant d'aiguillons pour notre curiosité, notre intelligence et celles de nos enfants.

Une mission scientifique ne saurait être menée à bien sans une équipe de chercheurs très motivés. Rien d'étonnant à cela, puisqu'il faut défendre un projet pendant des années avant de le voir adopter; se battre pour obtenir le droit d'envoyer quelques kilogrammes d'expériences dans l'espace; construire des instruments d'une finesse remarquable et puis leur faire subir les pires traitements pour vérifier qu'ils sont aptes à fonctionner dans l'espace; espérer qu'à l'heure du lancement l'objet conçu avec tant d'ardeur ne plongera pas prématurément au fond d'un océan; et attendre parfois des années avant d'obtenir des résultats.

Pourquoi prendre tant de peine? Tout simplement pour en savoir plus sur cet Univers qui est le nôtre. Pourquoi engager de telles dépenses? Pour faire reculer les limites de l'inconnu, pour mettre nos compétences à l'épreuve et - objectif ultime - pour jeter les bases d'une exploration pacifique et fraternelle de l'Univers.

SOHO:
observatoire du Soleil et
de l'héliosphère (1995)



esa Première partie

**Le Soleil
et sa famille**

1

L'exploration du système solaire: Aperçu général

Avant l'ère spatiale, la Terre était perçue par beaucoup comme une île, tout juste effleurée par les rayons du Soleil et l'attraction lunaire présidant aux marées. Aujourd'hui, les scientifiques savent que notre planète baigne dans les émanations d'un Soleil d'humeur changeante. Ils savent que des objets célestes analogues à ceux qui ont dessiné des cratères à la surface de la Lune et toute autre surface rigide du système solaire peuvent percuter la Terre. Et ils ne comprendront véritablement bien les conditions exceptionnelles rendant possible la vie sur Terre qu'en établissant des comparaisons avec les mondes très différents qui gravitent autour de l'astre du jour.

C'est à la NASA et, dans une moindre mesure, à l'ex-Union soviétique que revient le mérite d'avoir entrepris l'exploration du système solaire. Les chercheurs européens, pour leur part, se sont d'abord montrés circonspects lorsqu'il s'est agi d'envisager des missions lointaines. Aujourd'hui, toutefois, l'Agence spatiale européenne se trouve aux avant-postes de la recherche sur le système solaire dans les deux domaines qui affectent le plus directement l'existence de l'homme et l'environnement de la Terre.

Prenons d'abord l'étude du Soleil proprement dite. Les variations enregistrées dans la production d'énergie solaire pourraient influencer sur le climat terrestre, et les nouvelles craintes qu'inspire cette hypothèse soulignent l'ignorance des chercheurs sur certains aspects fondamentaux de la physique solaire et des relations Soleil-Terre. Avec la série de ses missions Ulysse, SOHO et Cluster, l'ESA offre enfin aujourd'hui la possibilité de décrypter le comportement du Soleil et ses effets sur la Terre.

Deuxième domaine d'excellence de l'ESA: l'étude des comètes. La sonde européenne Giotto a en effet confirmé que les comètes véhiculent des informations d'un intérêt capital sur l'origine des planètes et de leur atmosphère ainsi que sur la chimie prébiotique. L'Europe projette de poursuivre ses recherches sur les comètes dans le cadre de la mission Rosetta. Cet intérêt pour la chimie de l'Univers primitif a également inspiré le projet Huygens de l'ESA, dans lequel une sonde sera chargée d'analyser l'atmosphère de Titan, satellite de Saturne.



Des capacités en pleine croissance. Le petit satellite ESRO 2, exploité de 1968 à 1971, fut le premier projet spatial réalisé en commun par les Européens. Il pesait 85 kilos. Les satellites de la mission Cluster de l'ESA (1995) pèseront, à eux quatre, 4800 kg.

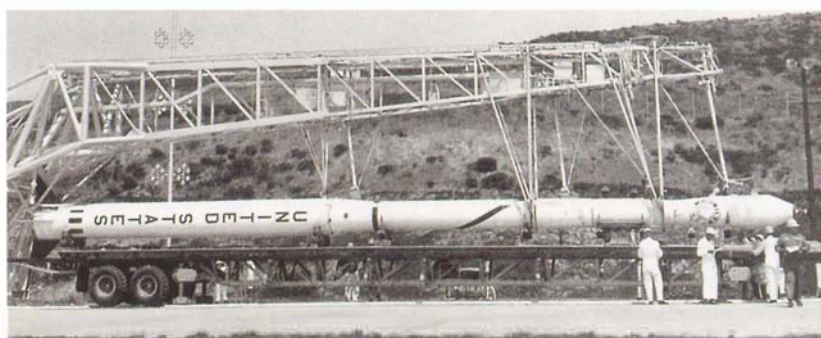
Photo: Dornier

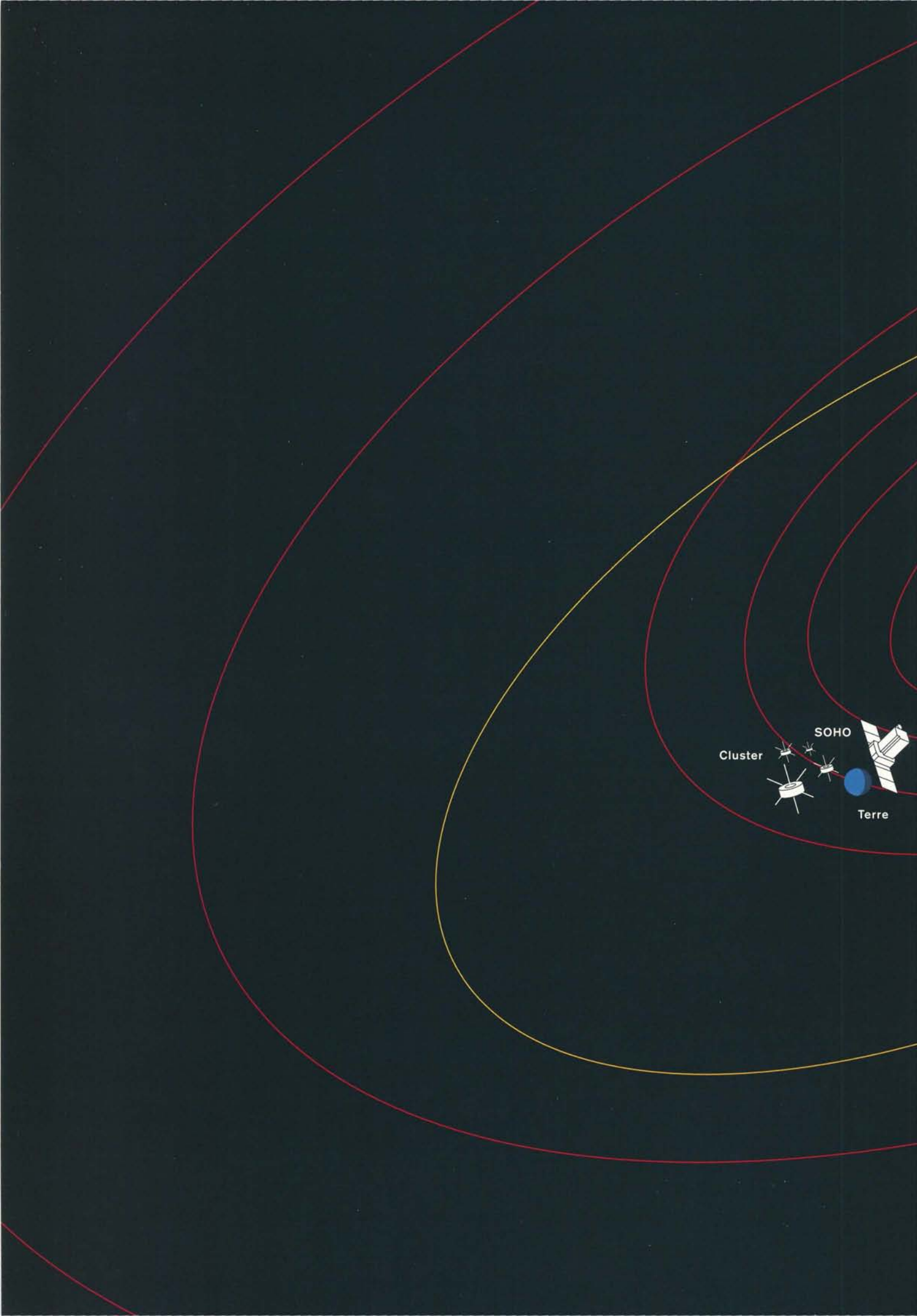
Selon Martin Huber, chef du département Science spatiale de l'ESA à Noordwijk (Pays-Bas), "la recherche spatiale s'inscrit toujours en Europe dans le prolongement des recherches menées au sol, pour lesquelles l'Europe s'appuie sur la tradition la plus ancienne. Nous n'avons pas attendu d'avoir des lanceurs pour nous affirmer sur le plan des techniques et des idées."

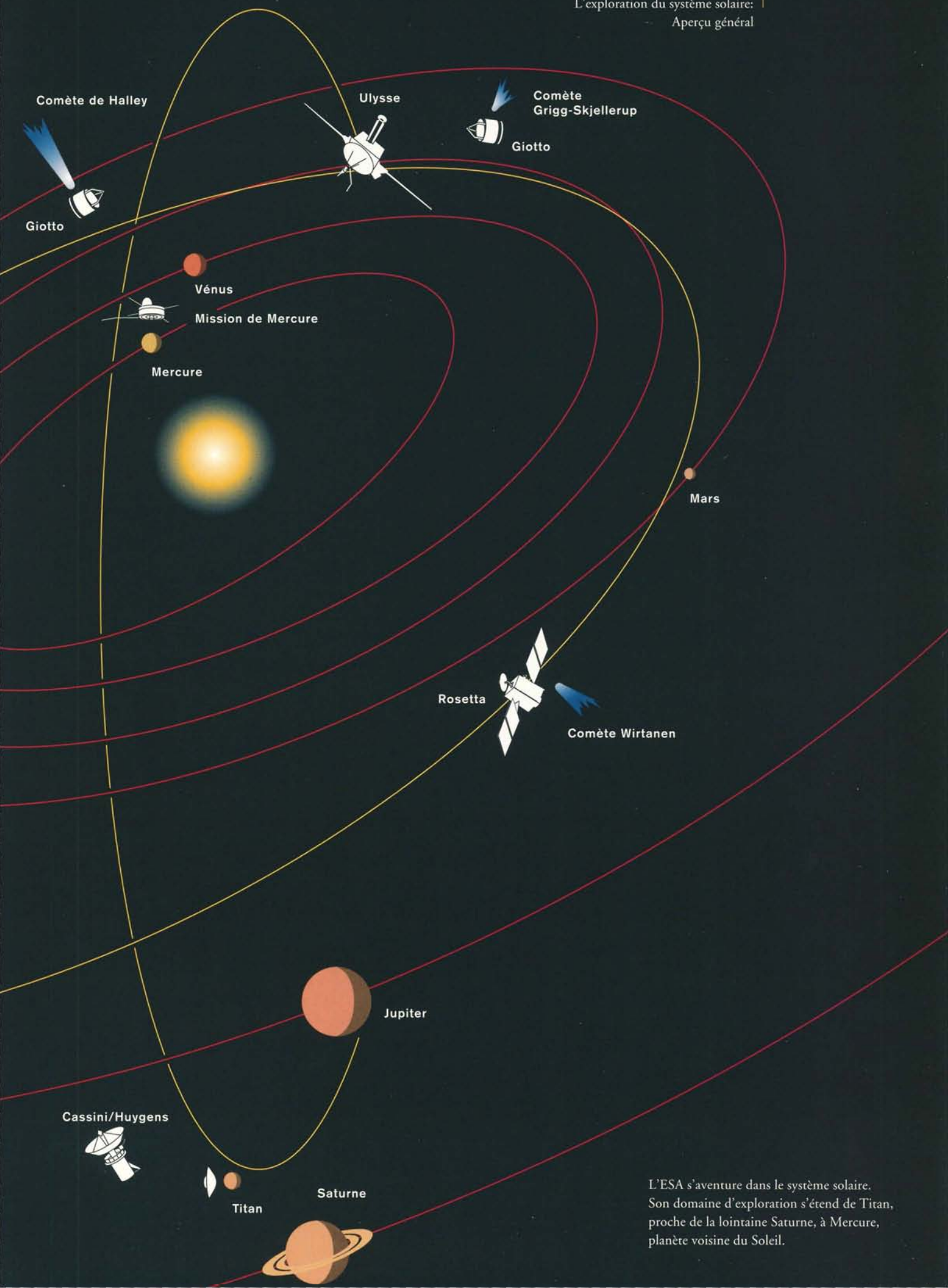
"En Europe, l'observation attentive du Soleil remonte à Galilée. D'autres précurseurs ont effectué les premières études de la chimie du système solaire, reconnaissant par exemple l'origine extraterrestre des météorites. Et la découverte, au XIXe siècle, du lien entre les taches solaires et les orages magnétiques a conduit, par une chaîne ininterrompue de transmission du savoir, à l'élaboration de missions spatiales ayant pour objet d'étudier la magnétosphère terrestre."



Autonomie en matière de lanceurs. A ses débuts, l'Europe spatiale était étroitement tributaire de la NASA pour ses lancements. ESRO 2, par exemple, fut mis en orbite par une fusée Scout en 1968 (à droite). En 1995, l'Europe franchit un cap important dans le développement de ses propres lanceurs avec la réalisation d'Ariane 5 (ci-dessus), qui pourra emporter de grands satellites. Ariane 5 lancera notamment Cluster (1995) et Rosetta (2003), ainsi que les satellites d'astronomie XMM (1999) et FIRST (2005).







L'ESA s'aventure dans le système solaire. Son domaine d'exploration s'étend de Titan, proche de la lointaine Saturne, à Mercure, planète voisine du Soleil.

Un champ de bataille autour de la Terre

Au début du XXe siècle, le physicien norvégien Kristian Birkeland affirma que le phénomène des aurores boréales était provoqué par des électrons d'origine solaire. En 1951, l'astrophysicien allemand Ludwig Biermann, qui étudiait alors la queue des comètes, suggéra l'existence d'un "vent" d'électrons et d'atomes électriquement chargés provenant du Soleil et soufflant sans discontinuer à travers l'ensemble du système solaire.

Le compteur Geiger embarqué à bord du tout premier satellite américain Explorer-1 (1958) permit de déceler, autour de la Terre, la présence de ceintures de radiations composées de particules de haute énergie émises, selon toute vraisemblance, par le Soleil. Quatre ans plus tard, la sonde Mariner 2 de la NASA, franchissant une barrière invisible, détecta le vent solaire. Les Américains et les Soviétiques lancèrent ensuite d'autres missions pour étudier cette frontière à quelque 60 000 kilomètres de la Terre, là où le magnétisme terrestre fait obstacle au vent solaire et dévie sa trajectoire. Inversement, le vent solaire confine le champ magnétique terrestre dans la magnétosphère qui s'arrondit du côté du Soleil pour s'étirer à l'opposé, telle la queue d'une comète, sous le vent solaire. Certaines particules solaires, franchissant cet obstacle, viennent alimenter les ceintures de radiations et déclencher des aurores.

A la création de l'Organisation européenne de recherches spatiales (ESRO), six des sept premiers satellites européens furent consacrés à l'étude de la magnétosphère. ESRO-2 (1968) montra que les particules solaires pouvaient atteindre l'atmosphère au niveau des pôles en passant par la queue de la magnétosphère. ESRO-1A et 1B observèrent les particules aurorales, qui atteignent des latitudes variables en fonction de l'heure du jour et des manifestations d'orages solaires. De son côté, ESRO-4 découvrit l'existence en hiver d'un mystérieux réservoir d'hélium au-dessus des pôles magnétiques.

Pendant ce temps, HEOS-1 (1968) parcourait l'espace jusqu'aux deux-tiers de la distance Terre-Lune, allant explorer l'onde de choc dans la zone où le vent solaire faiblit à mesure qu'il s'approche de la magnétosphère, et mesurer les variations de ce vent sur une période de sept ans. HEOS-2, survolant les contrées arctiques à haute altitude, localisait quant à lui un afflux de particules solaires regroupées autour d'un "repli" de la magnétosphère, le cornet polaire, au-dessus du pôle magnétique.

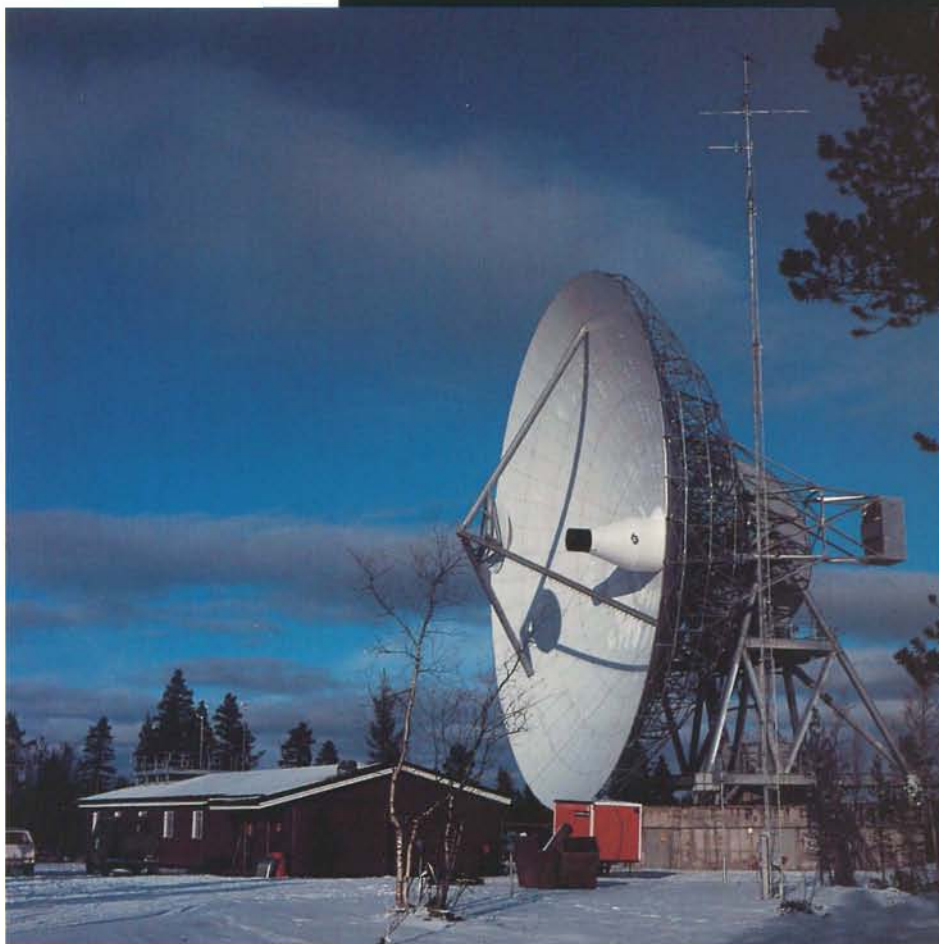
Pendant les années 70, l'Agence spatiale européenne - qui avait entre temps pris le relais de l'ESRO - poursuivit l'étude de la magnétosphère avec Geos-1 et Geos-2 (1977-1978). Ces satellites avaient pour mission d'analyser les champs et les ondes qui accélèrent les particules, et d'établir la raison pour laquelle les particules situées à l'intérieur de la magnétosphère possèdent une énergie plus élevée que les particules ordinaires du vent solaire.

Toutes ces recherches menées par des spécialistes mondiaux souffraient néanmoins de l'ambiguïté des données transmises par les différents véhicules spatiaux, qui n'avaient qu'une vue limitée des phénomènes très complexes de l'espace circumterrestre. On tenta de remédier à ce problème en lançant en 1977 des satellites jumeaux équipés d'instruments similaires: ISEE-1 pour la NASA et ISEE-2 pour l'ESA. Ces deux engins fonctionnèrent en tandem jusqu'en 1988, mais cette association se révéla elle aussi inadéquate.

Pour bien analyser la bataille qui fait rage autour de la Terre et comprendre la façon dont les particules solaires pénètrent dans la magnétosphère, il faut quatre satellites gravitant de concert. C'est le minimum nécessaire pour reconstituer une image parfaitement interprétable des événements en trois dimensions. L'ESA va relever ce défi en lançant en 1995 les quatre satellites de la mission Cluster. Son nouveau lanceur Ariane 5, l'un des plus puissants du monde, les placera sur orbite à l'occasion de son vol inaugural.

Cluster étudiera les particules, champs et ondes de la magnétosphère et de ses parages. De puissants ordinateurs analyseront les résultats très détaillés que les quatre satellites transmettront par radio. Les chercheurs travaillant à cette mission estiment que Cluster apportera des réponses définitives aux interrogations fondamentales qu'eux et leurs confrères du monde entier ne cessent de se poser depuis 1958.

Photo: Torbjörn Lövgren;
European Incoherent Scatter
Scientific Association



Les spécialistes du soutien sol. Des radars de l'Arctique visant les couches supérieures de l'atmosphère à l'observatoire de Ténérife, au large des côtes africaines, la communauté scientifique européenne dispose des moyens et du savoir-faire nécessaires en ce qui concerne l'étude du système solaire pour apporter son soutien tant à la conception qu'à l'exécution des missions spatiales de l'ESA.

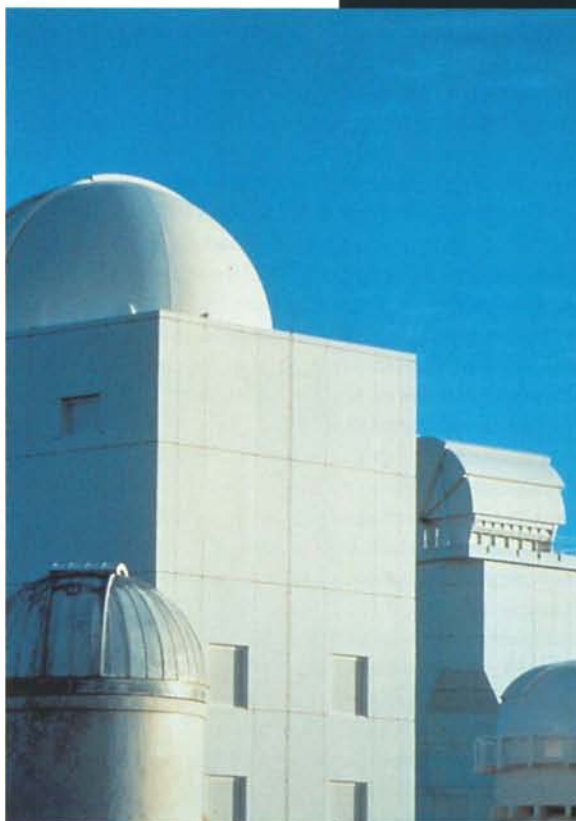


Photo: Instituto de Astrofísica de
Canarias, Espagne

Les sautes d'humeur du Soleil.
La couronne solaire présente une
grande variabilité et une asymétrie à
différentes étapes du cycle d'activité du Soleil.
Cliché: D.G. Sime (HAO, Boulder)



Le Soleil vu de l'espace

Les sondes spatiales américaines lancées vers d'autres planètes permirent de se faire une idée précise des courants de vent solaire, "imprégnés" du magnétisme issu du Soleil, qui sillonnent la région dans laquelle ces planètes gravitent. Les sondes Pioneer et Voyager de la NASA suivirent ainsi le vent solaire et ses tempêtes jusqu'aux régions extérieures du système solaire. Les sondes germano-américaines Hélios-1 et Hélios-2 effectuèrent des observations plus près du Soleil, de 1974 à 1984.

Mais les résultats obtenus soulevèrent plus de questions qu'ils n'apportèrent de réponses. Plus de trente ans après sa découverte, le vent solaire demeure une énigme. Personne ne peut dire exactement ce qui le propulse ni pourquoi sa vitesse varie en fonction de son lieu d'origine sur le Soleil. Une des faiblesses des recherches sur le vent solaire tenait au fait que toutes les observations se faisaient dans le plan de l'équateur solaire. En 1977, l'ESA et la NASA décidèrent d'unir leurs forces pour réaliser un projet exceptionnel d'étude du vent solaire au-dessus des pôles du Soleil.

Après quelques péripéties, la sonde Ulysse de l'ESA fut enfin lancée par la navette spatiale de la NASA, seul véhicule possédant la puissance nécessaire. Elle survola le pôle sud du Soleil en 1994. Sur son parcours, Ulysse avait détecté des différences de nature chimique entre les sources de vent solaire lent et de vent solaire rapide, mais elle avait aussi mis en évidence des ondes de choc suivant des trajets inattendus à travers l'espace interplanétaire. Dans la région du pôle sud du Soleil, elle découvrit un champ magnétique très différent de celui que les chercheurs pensaient trouver. Aujourd'hui, Ulysse poursuit son long voyage qui l'amènera à survoler le pôle nord en 1995 puis à retourner vers le pôle sud en l'an 2000, date à laquelle le Soleil connaîtra une activité beaucoup plus intense.

L'observation du Soleil au moyen de télescopes spatiaux est une autre activité existant de longue date. En 1948, des chercheurs américains utilisant une fusée allemande à courte portée V2 mirent en évidence des rayons X d'origine solaire, qui ne pénétrèrent pas dans l'atmosphère terrestre. Ces observations confirmèrent que la région la plus externe de l'atmosphère du Soleil, la couronne, est beaucoup plus chaude que sa surface visible, comme le soupçonnaient les astronomes.

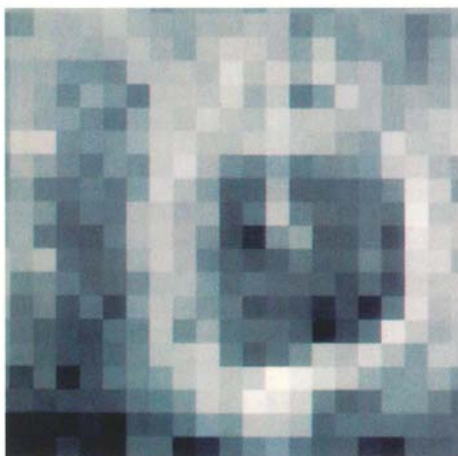
En 1962, la NASA lança l'observatoire OSO-1. Ensuite eurent lieu plusieurs missions d'étude du Soleil, au nombre desquelles figuraient les satellites européens, ESRO 2 (1968) et TD-1 (1972) chargés d'étudier les rayons X émis par les éruptions solaires. Cette phase exploratoire connut son apogée en 1973-1974 lorsque les télescopes de la station spatiale habitée américaine Skylab prirent, dans les rayonnements X et ultraviolet, des clichés classiques de la région externe de l'atmosphère du Soleil. Le satellite japonais Yohkoh (1991) transmet plus tard des images et des données d'une qualité supérieure à celle des clichés X du Soleil pris par Skylab. En 1995, des télescopes de nouvelle génération fonctionnant dans l'ultraviolet seront embarqués à bord du satellite SOHO de l'ESA, lancé par une fusée de la NASA au titre d'un accord de coopération. Les conseillers scientifiques de l'ESA ont choisi d'observer l'atmosphère solaire dans l'ultraviolet, voyant là le meilleur moyen d'étudier les phénomènes à l'origine de l'échauffement de la couronne et de l'éjection du vent solaire.

SOHO se distingue par la variété de ses instruments. Le satellite naviguera entre Terre et Soleil, ses détecteurs de particules immergés dans le vent solaire, de façon que les chercheurs puissent établir une relation entre les émissions solaires et les phénomènes observés dans l'atmosphère. SOHO emportera en outre des télescopes spécialement conçus pour détecter à la surface du Soleil les oscillations qui fourniront des informations sur ce qui se passe à l'intérieur de l'astre.

SOHO sera à même d'étudier l'émission d'énergie radiative du Soleil, dont dépend le climat sur Terre, alors qu'il est impossible de mesurer avec précision l'éclat réel du Soleil à partir du sol compte tenu des voiles de poussières, naturelles ou dues à l'activité humaine, qui enrobent notre globe. Les données du satellite SMM de la NASA (1980) ont montré que le Soleil brille, dans l'ensemble, avec un peu plus d'éclat en période d'activité intense. La surveillance du Soleil fait aujourd'hui partie des tâches courantes des satellites météorologiques américains. SOHO, pour sa part, établira la relation entre les variations de production énergétique et les phénomènes à l'oeuvre tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du Soleil.

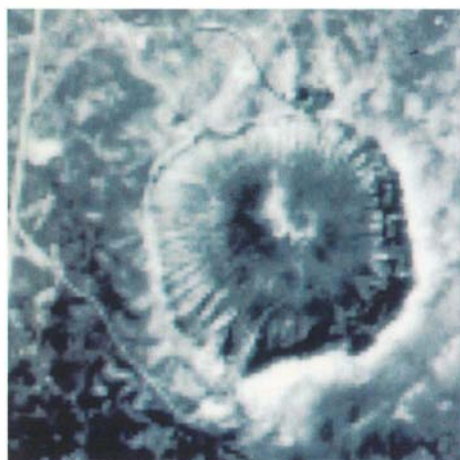
Retour sur la Lune?

Vision plus nette de la Lune. Lors des précédentes missions lunaires, nous n'avons obtenu qu'une image floue (en haut) de ce cratère de 1 km de diamètre. Le deuxième cliché (en bas) de ce même cratère correspond à la résolution nettement supérieure qui serait retenue pour la mission lunaire MORO proposée à l'ESA.



Le porte-instruments européen récupérable Eureka a également emporté à son bord des instruments conçus pour observer les émissions solaires dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge. Cette plate-forme de 4,5 tonnes, pouvant accueillir une grande variété d'expériences technologiques et scientifiques, est lancée et ramenée sur Terre par la navette spatiale américaine. Eureka, lancée pour sa première mission en 1992, a séjourné alors onze mois dans l'espace. Des instruments européens similaires destinés à l'étude du Soleil sont également installés à bord de la navette dans le cadre de missions d'observation de l'environnement.

Le comité scientifique chargé d'étudier le programme Horizon 2000 Plus de l'ESA a envisagé pour le XXI^e siècle un certain nombre de missions d'étude du Soleil. Il recommande d'accorder une attention particulière à la mise au point de nouveaux instruments capables de détecter des détails fins à la surface du Soleil ainsi qu'à la possibilité d'observer cet astre sous plusieurs angles différents afin d'obtenir une vue stéréoscopique des phénomènes qui se déroulent au niveau des couches superficielles turbulentes et en altitude. Une autre proposition consisterait à faire plonger un véhicule spatial dans l'atmosphère solaire puis dans le corps du Soleil lui-même. Entreprise en collaboration avec d'autres agences, une telle mission pourrait prendre rang parmi les projets d'échelle moyenne de l'ESA.



La Lune, ce satellite si proche d'une planète à l'échelle interplanétaire, fut le premier objectif de l'exploration extraterrestre. Après l'alunissage réussi de plusieurs sondes automatiques soviétiques et américaines, des astronautes du programme Apollo de la NASA se posèrent sur le sol sélène à l'occasion de six missions distinctes, entre 1969 et 1972. Ils installèrent différents instruments à la surface de la Lune, notamment le "drapeau suisse" ayant pour objet de recueillir des particules de vent solaire destinées à être analysées par des chercheurs bernois. Les sismomètres enregistrèrent de petits séismes dus à des ondes de compression et à l'impact de météorites. Ces mesures révélèrent l'existence d'une croûte de 60 kilomètres d'épaisseur et la présence possible d'un noyau semi-fluide. Les astronautes procédèrent à des observations géologiques et rapportèrent 380 kg d'échantillons de sol prélevés à différents endroits aux fins d'analyse. La récolte d'échantillons par les sondes automatiques soviétiques avait été moins fructueuse. L'analyse et la datation de ces échantillons lunaires - deux activités auxquelles les scientifiques européens furent étroitement associés - montrèrent que les cratères lunaires avaient été creusés par l'impact de météorites géantes. La Lune est comme une reproduction figée, à plus petite échelle, de ce qu'était à sa naissance la planète Terre, qui subit de nombreux impacts encore plus violents. Après une pause de vingt ans, l'exploration lunaire reprit avec la sonde Clémentine (1994) de la NASA, qui survola les pôles de la Lune. Une prochaine mission programmée par les Japonais, Lunar-A, devrait déposer un nouvel ensemble de sismographes sur le sol sélène.

L'ESA se penche actuellement sur le projet MORO, susceptible de succéder à Clémentine. Ce satellite pourrait prendre des clichés plus détaillés et mettre en oeuvre des détecteurs infrarouges et gamma en vue d'une étude minéralogique. Un altimètre radar établirait la topographie de la surface lunaire, tandis que le repérage en continu de la position d'un petit satellite auxiliaire gravitant sur une autre orbite permettrait de relever les variations de la pesanteur lunaire d'une région à l'autre. L'ESA propose également une mission internationale, LEDA, destinée à tester des techniques permettant de se poser en douceur dans l'espace. Cette mission pourrait constituer le prélude d'un programme lunaire concerté qui serait mis en oeuvre au XXI^e siècle par les agences spatiales du monde entier. Les chercheurs européens ont examiné des propositions de programme lunaire prévoyant entre autres la poursuite des études géologiques, la mise en place de réseaux de télescopes d'astronomie à la surface de la Lune, et des recherches sur des systèmes écologiques de soutien-vie. En Europe comme ailleurs, les opinions sont partagées sur le rôle que devraient jouer les astronautes, par opposition aux robots mobiles, dans le cas d'un retour sur la Lune. Il est en revanche plus facile de trouver un terrain d'entente en ce qui concerne la question capitale, toujours sans réponse, de l'origine de la Lune. Certains chercheurs pensent qu'elle s'est formée à partir des débris arrachés à la Terre à la suite d'une collision avec un astéroïde de la taille de Mars. Il est donc indispensable d'éclaircir cette question pour comprendre ce qu'était la Terre au début de son histoire.



La comète de Halley en 1986.
Photo: ESO

D'autres mondes

L'hypothèse des collisions est omniprésente dans l'étude des planètes et de leurs satellites. La théorie classique veut que ces objets célestes d'une variété étonnante se soient formés par accréation de grumeaux de matière de plus en plus gros au sein de la nébuleuse solaire, ce nuage de gaz et de poussières qui, s'effondrant sous l'effet de sa propre pesanteur, donna naissance au Soleil. C'est pourquoi, lorsque la mission Magellan de la NASA (1991-1994) dressa une carte radar de Vénus - enfouie sous une couche de nuages - attestant que la géologie de cette planète diffère considérablement de celle de la Terre, les chercheurs durent envisager des hypothèses de collision différentes pour les planètes jumelles.

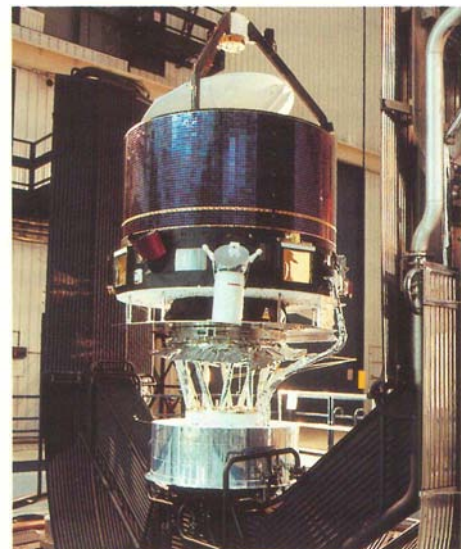
La matière première de la nébuleuse solaire primitive se composait de gaz (principalement hydrogène et hélium) et de poussières, mélange de glace et de composés minéraux et carbonés. Les informations les plus précises sur la matière solide nous ont été livrées par la sonde européenne Giotto et par les sondes soviétiques Vêga qui accompagnèrent Giotto dans son voyage vers la comète Halley en 1986. Les comètes sont en effet des résidus de la formation des planètes et contiennent des spécimens quasiment inaltérés de poussières primitives aux premiers stades du processus d'accréation.

Dans tous les autres corps célestes, la matière a subi des transformations sous l'effet de la chaleur et de la pression. Cela vaut même pour les petits astéroïdes, qui ressemblent aux blocs de matière à partir desquels se seraient formées les planètes rocheuses. Les astéroïdes et leurs produits planétaires occupent le cœur même du système solaire, où la glace cométaire se sublime sous l'effet de la chaleur dégagée par le Soleil en laissant un résidu réfractaire. Il est probable que la glace cométaire fut une source abondante de matière pour les noyaux massifs des planètes supérieures géantes et qu'elle contribua à la formation des satellites glacés et des anneaux de glace de Saturne.

Telles la pierre de Rosette, les comètes recèlent des informations qui permettront de remonter à l'origine des planètes. C'est pourquoi l'ESA a choisi le nom de Rosetta pour sa prochaine mission cométaire. A la différence de Giotto qui n'est restée que quelques minutes à proximité du noyau de Halley, Rosetta passera de nombreux mois à observer de près une comète et larguera des instruments qui iront se poser sur celle-ci.

Les chercheurs s'intéresseront en particulier aux composés carbonés présents dans la matière sombre du noyau, proches de ceux qui auraient éventuellement contribué à fertiliser la Terre au début de son existence. En attendant, l'échappée réalisée par la sonde Ulysse de l'ESA hors des circuits fréquentés par les planètes permet d'identifier les grains de poussière d'origine interstellaire pénétrant dans le système solaire. Parmi ceux-ci, certains sont plus gros qu'on ne le pensait. Il semble que les glaces, les éléments minéraux et les composés carbonés s'y accumulent longtemps avant que s'engage le véritable processus de formation des étoiles et des planètes.

Américains et Russes poursuivent leurs activités d'exploration des planètes. Les sondes de la NASA furent les premières à survoler toutes les grandes planètes, en commençant par Vénus (mission Mariner 2 en 1962) pour finir par Neptune (mission Voyager 2 en 1989). Les impacts d'astéroïdes et de comètes, qui se poursuivirent après la formation des planètes, ont permis aux spécialistes d'estimer l'âge géologique de certaines régions sur les planètes et satellites à surface dure, tout simplement en comptant le nombre de cratères d'impact. Une étude plus approfondie des planètes, faisant appel à des orbiteurs et à des modules d'atterrissage, a déjà été réalisée sur Vénus et sur Mars. De l'avis général, Mars demeure un objectif d'un haut intérêt, car c'est la seule planète sur laquelle l'homme pourrait vivre dans un confort relatif à condition de porter une combinaison adéquate et d'être ravitaillé en oxygène.



Intercepteur de comètes. Lorsque la comète de Halley est venue faire une de ses visites périodiques dans la région centrale du système solaire en 1986, la sonde Giotto de l'ESA a traversé sa chevelure de poussières. Bien qu'endommagée par les poussières cométaires, la sonde a survécu au point de repartir intercepter une autre comète, Grigg-Skjellerup, en 1992. Giotto n'est toujours pas morte, en hibernation seulement, et reviendra au voisinage de la Terre en 1999, quatorze ans après son lancement.

Cible lointaine. La sonde Huygens de l'ESA plongera dans l'atmosphère brumeuse de Titan, satellite de Saturne. Elle sera freinée dans sa descente par un parachute.



Titan photographié par Voyager 1.
Photo: NASA



D'autres atmosphères

Une mission vers Mars, en complément des activités d'autres agences spatiales, est actuellement à l'étude parmi les propositions à budget intermédiaire soumises dans le cadre du programme Horizon 2000.

Le programme Horizon 2000 Plus, appelé à démarrer en 2006, recommande également d'exécuter en priorité une mission vers Mars. Au titre du projet Intermarsnet, l'ESA pourrait installer sur cette planète un réseau de quatre à six observatoires automatiques de géophysique. Le massif du Tharsis, chaîne de volcans géants s'étirant de part et d'autre de l'équateur de Mars, est la région la plus prometteuse pour la détection de séismes et, partant, pour l'exploration de la structure interne de Mars. Mercure, planète la plus proche du Soleil, est la moins étudiée des planètes inférieures. Les trois survols rapides de Mercure par la sonde Mariner 10 de la NASA en 1974-1975 montrèrent que sa surface était criblée de cratères, comme celle de la Lune. Cette mission de reconnaissance suscita toutefois des questions d'un intérêt fondamental pour la recherche planétaire, auxquelles les spécialistes n'ont toujours pas apporté de réponse au bout de vingt ans. Pourquoi Mercure, à la différence de planètes similaires comme Mars et la Lune, a-t-elle un champ magnétique? Et faut-il penser, comme le suggèrent les clichés de Mariner 10, qu'un impact survenu sur une des faces de la planète aurait ébranlé jusqu'aux antipodes l'ensemble de la croûte de Mercure? Le comité d'étude du programme Horizon 2000 Plus suggère à l'ESA d'envoyer une mission importante vers Mercure au cours de la période 2006-2016. L'engin spatial retenu pour cette mission gravitera autour de la planète afin de l'observer de façon plus détaillée. Voici longtemps que les planétologues envisagent une mission de ce type, mais il leur faudra surmonter de grandes difficultés.

Rejoindre la planète Mercure qui se déplace à très grande vitesse pose un problème qui pourrait être résolu en tirant parti de l'assistance gravitationnelle des planètes. Quant à concevoir un véhicule capable de résister à la chaleur intense régnant près du Soleil, ce ne sera pour les ingénieurs européens qu'un nouveau défi technologique à relever. En effet les deux sondes allemandes Hélios de 1974 et 1984 détiennent actuellement le record de longévité sur des orbites aussi proches du Soleil que celle de Mercure.

L'étude détaillée des grandes planètes supérieures et de leurs satellites commence par la mission Galileo de la NASA à destination de Jupiter, actuellement en cours. En 1997, la NASA lancera Cassini en vue d'une exploration prolongée de Saturne, de ses anneaux et de ses satellites. Le satellite Cassini emportera également la sonde Huygens de l'ESA; celle-ci plongera dans l'atmosphère de Titan, satellite de Saturne, pour l'atterrissage le plus lointain jamais tenté sur un autre corps céleste.

La mission Huygens est liée aux théories sur la formation des planètes qui retiennent toute l'attention des conseillers scientifiques de l'ESA. La plupart des objets du système solaire n'ont pas d'atmosphère digne de ce nom. Les planètes géantes, en revanche, étaient suffisamment massives pour aspirer de grandes quantités des gaz primitifs présents dans la nébuleuse solaire. Les planètes intermédiaires comme Vénus, la Terre, Mars et Titan ont, pour leur part, une surface solide enrobée d'une pellicule atmosphérique.

Seules les atmosphères de la Terre et de Titan ont pour principal composant l'azote. Seules la Terre et (par déduction) Titan possèdent de grandes masses liquides en surface. Et ces deux corps célestes sont les seuls sur lesquels des composés carbonés élaborés ont pu se former et subsister en grandes quantités. Il est possible que Huygens trouve sur Titan une version "congelée" des éléments chimiques ayant existé avant l'apparition de la vie sur Terre.

Les théories relatives au rôle des collisions refont surface lorsque les chercheurs tentent d'expliquer les différences entre les atmosphères de Vénus, de la Terre, de Mars et de Titan. Selon des experts américains associés au projet Huygens, ces atmosphères se seraient formées à partir des matières volatiles éjectées lors d'impacts cométaires.

Certains impacts ayant pour effet de dissiper au loin les substances volatiles, des scénarios de collision différents auraient pu se traduire par des résultats très divers. L'analyse des atomes rencontrés dans l'atmosphère de Titan permettra de mettre cette théorie à l'épreuve.



Ida, astéroïde rougeâtre de 60 km de longueur. Lorsque la sonde Galileo de la NASA le photographia en 1994, les chercheurs découvrirent la présence d'un satellite de 1 km de diamètre, visible à droite sur cette photo. La coloration d'Ida en rouge a été exagérée pour accentuer le contraste avec son satellite, plus gris. Photo: JPL/NASA.

Les astéroïdes

Les petites planètes que sont les astéroïdes sont pour beaucoup d'une taille proche de celle des comètes, même s'il en existe de plus grandes. Contrairement aux comètes, aucun de ces corps célestes ne contient ni gaz ni poussières. Parmi les composantes du système solaire, les astéroïdes sont la dernière en date à retenir l'attention des scientifiques, la NASA faisant figure de pionnier dans ce domaine en envoyant sa sonde Galileo prendre des clichés de Gaspra et d'Ida. Ces objets comptent parmi les milliers d'astéroïdes rocheux et riches en fer qui gravitent tels les débris d'une planète avortée dans la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter. La sonde Rosetta de l'ESA observera elle aussi ces objets lorsqu'elle traversera la ceinture d'astéroïdes, en route vers sa comète.

Les astronomes connaissent de nombreux types d'astéroïdes. L'analyse des météorites tombées sur Terre, celles-ci étant des fragments nés d'une collision entre astéroïdes, pourrait donner une meilleure idée de la composition des astéroïdes en général que l'examen détaillé d'un ou de deux de ces objets par des sondes spatiales spécialisées. En revanche, il est important de découvrir l'origine des astéroïdes gravitant sur des orbites qui les rapprochent de la Terre. S'agit-il d'objets essentiellement rocheux éjectés de la ceinture d'astéroïdes, ou de comètes éteintes ayant épuisé toute leur glace de surface? La NASA envisage de lancer un engin spatial baptisé NEAR à la rencontre d'un astéroïde qui passerait à proximité de notre planète.

L'éventualité d'une collision catastrophique avec la Terre préoccupe les chasseurs d'astéroïdes; cette inquiétude donnera probablement lieu à une intensification de l'activité spatiale au XXI^e siècle. Pour l'heure, la NASA propose la mise en place d'un réseau mondial d'observatoires au sol conçu pour détecter et surveiller les astéroïdes et les comètes susceptibles de menacer notre planète.

Les images spectaculaires du télescope spatial Hubble NASA/ESA montrant les impacts des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 sur l'atmosphère de Jupiter lors de la collision de juillet 1994 confirment que les accidents de la circulation interplanétaire ne sont pas le simple fruit de l'imagination des chercheurs.

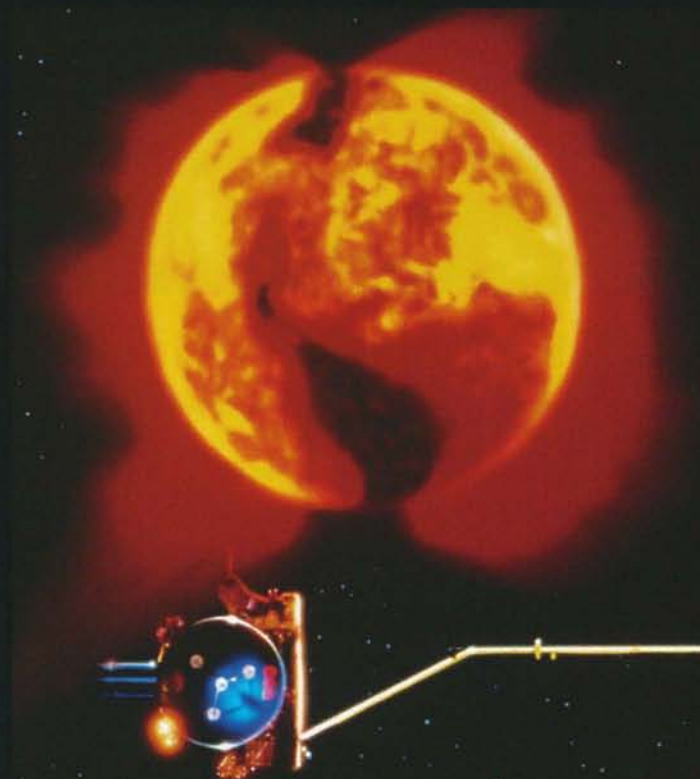
Les clichés de Hubble nous rappellent aussi que les télescopes, tant au sol qu'au voisinage de la Terre, complètent les observations des sondes spatiales en ce qui concerne l'exploration du système solaire. Outre les satellites d'astronomie américano-européens existants que sont IUE et Hubble, les futures missions ISO et FIRST de l'ESA observeront activement, dans l'infrarouge et dans les longueurs d'onde submillimétriques, les planètes et leurs satellites, les comètes, les astéroïdes et les poussières interplanétaires.

Ulysse: survol des pôles du Soleil

“Nous sommes allés au pôle sud magnétique du Soleil, mais il n’était pas là”, déclare le scientifique londonien André Balogh, responsable des magnétomètres embarqués à bord de la sonde Ulysse de l’Agence spatiale européenne. Lors de ce premier survol historique d’une région polaire de l’astre solaire en septembre 1994, ces instruments n’enregistrèrent aucune concentration magnétique analogue à celle qui règne à proximité des pôles de la Terre. Ce n’était pas la sonde qui se trompait de lieu de rendez-vous, mais le Soleil qui décevait l’attente des chercheurs.

En revanche, Ulysse enregistra des ondes magnétiques de forte intensité en provenance des régions polaires. D’après André Balogh, “tout se passe comme si quelqu’un martelait à l’intérieur du Soleil les lignes de force du champ magnétique. Lorsque nous aurons saisi le mécanisme de formation de ces ondes, nous pourrons peut-être mieux comprendre ce qui meut le vent solaire”.

ULYSSE



A la découverte de l'inconnu. Sur cette représentation d'Ulysse, l'antenne parabolique reste pointée vers la Terre. L'extension sombre aux reflets bleus émergeant de la sonde à gauche contient une source radioactive assurant l'alimentation en énergie. Le mât à droite sert de support aux magnétomètres, qui ont permis de faire des découvertes majeures sur le Soleil.

Ulysse: caractéristiques techniques

Objectif

observer les émissions du Soleil
sous des angles nouveaux

Agences responsables

ESA et NASA (partenaires à parts égales)

Nom

d'après le héros grec
(Odusseus en grec, Ulysse en latin)

Maître d'oeuvre

Dornier, Friedrichshafen (Allemagne)

Masse

370 kg

Charge utile scientifique

55 kg, 9 expériences

Alimentation en énergie

générateur à radio-isotope

Stations sol

Réseau de l'espace lointain (NASA)

Lanceurs

Navette spatiale Discovery, puis système
de propulsion à poudre à 3 étages pour
la mise sur orbite interplanétaire (NASA)

Lancement

6 octobre 1990

Gravitéviolation par Jupiter

8 février 1992

Latitude solaire sud maximale (80,2°)

13 septembre 1994

Latitude solaire nord maximale (80,2°)

31 juillet 1995

Retour aux pôles solaires:

Sud: 2000, Nord: 2001

Les manuels devront être mis à jour pour prendre en compte les résultats de la mission Ulysse, signe incontestable de l'avancement des connaissances. On y décrira également l'effet des ondes magnétiques polaires sur les rayons cosmiques venus des profondeurs de l'univers dans les parages du Soleil. Contrairement aux prévisions qui tablaient sur des rayons cosmiques de plus forte intensité au niveau des pôles, Ulysse a constaté que les ondes magnétiques dispersaient les particules entrant dans la sphère solaire, même pendant la période de calme relatif que connaissait le Soleil en 1994.

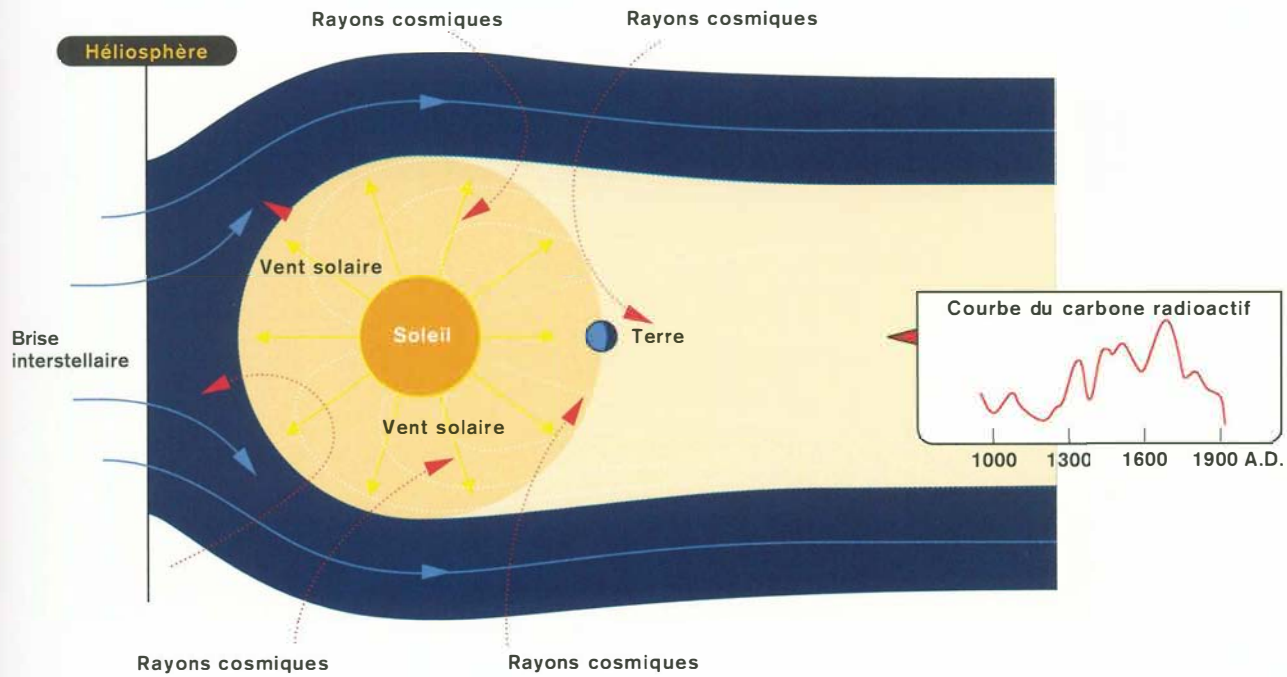
Tels sont les résultats marquants du survol du pôle sud du Soleil par Ulysse. Ils revêtent une importance comparable à celle des grandes découvertes faites au début de l'exploration du système solaire, comme l'absence de vie sur Mars ou la présence de volcans de soufre sur Io. Mais l'exploration de cet astre diffus et changeant qu'est le Soleil appelle des méthodes d'observation très différentes de celles que l'on utilise pour les planètes et leurs satellites.

La sonde Ulysse détecte les particules électriques et le magnétisme véhiculés par le vent qu'émet en permanence le Soleil. Regardant aussi vers l'extérieur, elle observe les particules à haute énergie des rayons cosmiques qui livrent des informations sur des zones reculées de l'empire solaire où elle n'ira pas. Les instruments détectent en outre des gaz et des poussières provenant de l'espace interstellaire au-delà de l'héliosphère, ou bien des ondes radio et d'autres perturbations dues aux éruptions solaires.

L'héliosphère, cette énorme bulle que gonfle le vent solaire dans l'espace, s'étend bien au-delà du royaume des planètes. Ulysse avait pour mission d'observer le Soleil et l'héliosphère sous des angles inédits. Conduire la sonde jusqu'aux régions polaires de l'héliosphère était toutefois beaucoup plus difficile qu'explorer les planètes.

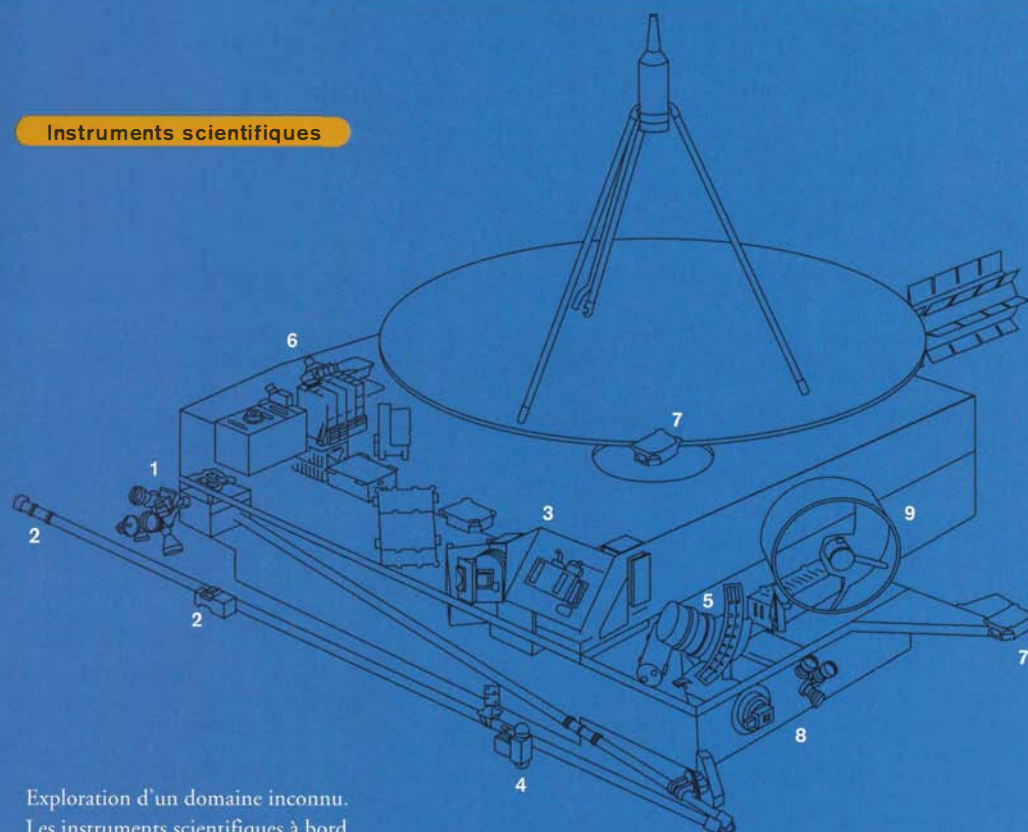
Quelles ont été les variations de l'activité solaire au cours des siècles passés?

L'expérience la plus importante de la mission Ulysse vise à étudier la bataille que se livrent le Soleil et les rayons cosmiques dans l'immense héliosphère entourant le Soleil et ses planètes. Les rayons cosmiques sont des particules atomiques de très haute énergie nées de l'explosion d'étoiles dans l'espace cosmique lointain. Ils n'atteignent la Terre, sous une forme affaiblie et altérée, qu'après avoir franchi les obstacles dressés par le Soleil.



Les particules du rayonnement cosmique sont diffusées par les ondes magnétiques et les ondes de choc présentes dans le vent solaire. Lorsque le Soleil se montre le plus violent, au pic de son cycle de onze ans, le rayonnement cosmique diminue. Mais à plusieurs reprises dans le passé, le rayonnement cosmique atteignant la Terre fut sensiblement plus intense, en moyenne, qu'aujourd'hui. L'examen de troncs d'arbres anciens, dont on peut établir l'âge avec précision en fonction du nombre de leurs cernes, fait apparaître des augmentations du taux de carbone radioactif correspondant à des collisions entre les particules cosmiques et les atomes d'azote de l'air. Certains cernes conservent des traces de telles "bouffées" remontant à plusieurs milliers d'années. Le dernier maximum du rayonnement cosmique coïncide avec une petite glaciation que la Terre a connue à la fin du XVII^e siècle, marquée par un climat exceptionnellement froid. Les astronomes se plaignaient également à cette époque de n'observer quasiment aucune tache solaire. Si les rayons cosmiques n'ont pas d'effet sur le climat proprement dit, ils traduisent en revanche un changement de comportement du Soleil susceptible de modifier sa production d'énergie d'un siècle à l'autre. Ulysse a confirmé ou découvert différents mécanismes par lesquels le Soleil d'aujourd'hui fait obstacle aux rayons cosmiques. Lors du maximum solaire des années 2000-2001, pendant lequel Ulysse survolera à nouveau les pôles, la bataille contre les rayons cosmiques atteindra son point culminant. Et s'ils parviennent à décrypter la relation entre ce rayonnement et le mode de fonctionnement du Soleil, les chercheurs apporteront une contribution capitale à la compréhension des changements climatiques à l'oeuvre, tant autrefois qu'aujourd'hui, sur Terre.

Instruments scientifiques



Exploration d'un domaine inconnu. Les instruments scientifiques à bord d'Ulysse ont pour mission d'identifier les différents types de particules présentes dans les régions jusqu'ici inexplorées de l'espace circumsolaire. La liste ci-après ne mentionne que les noms des "chercheurs principaux" responsables des expériences embarquées. En réalité, plus de cent chercheurs de douze pays différents participent à ce projet.

1 HI-SCALE

Ions et électrons de faible énergie
L.J. Lanzerotti
Bell Laboratories

2 VHM et FGM

Champ magnétique
A. Balogh
Imperial College
Londres

3 SWOOPS

Plasma du vent solaire
J.L. Philips
Los Alamos

4 GRB

Rayons X solaires et sursauts gamma
K. Hurley
UC Berkeley
M. Sommer
MPE Garching

5 SWICS

Composition ionique du vent solaire
J. Geiss
Berne
G. Gloecker
U. Maryland

6 COSPIN

Rayons cosmiques et particules solaires
J.A. Simpson
Chicago

7 URAP

Ondes plasma et radio
R.G. Stone
NASA/GSFC

8 EPAC, GAS

Particules énergétiques et gaz neutre interstellaire
E. Keppler
MPAe Lindau

9 DUST

Poussière cosmique
E. Grün
MPK Heidelberg
U. Maryland



Prêt à partir pour des cieux lointains. Voici Ulysse revêtu de sa protection thermique couleur d'or. L'antenne parabolique (au-dessus) doit toujours rester pointée vers la Terre afin d'assurer la liaison avec les stations sol et le centre de contrôle de la mission.

Le coup de fouet de Jupiter

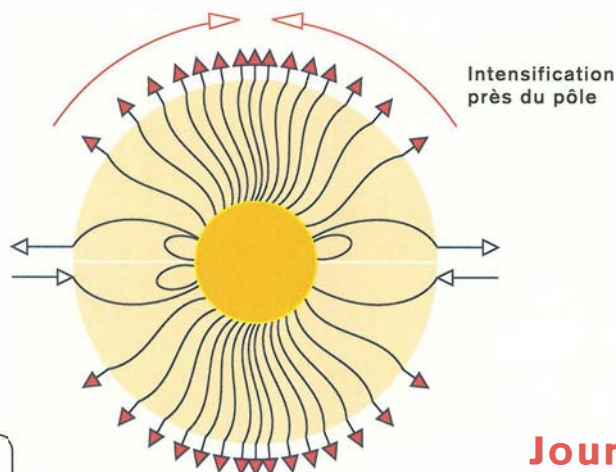
“Imaginons que nous vivions à l'équateur et que nous n'ayons aucune idée précise du temps qu'il fait sous d'autres latitudes. Comment pourrions-nous nous comprendre le climat de la planète?” Telle est la question que pose Richard Marsden, responsable scientifique du projet Ulysse à l'ESA. “Il en va de même pour le Soleil. Et pourtant, jusqu'à Ulysse, les astronomes et les chercheurs spatiaux ont toujours dû se contenter d'observer le Soleil dans son plan équatorial.” La Terre tourne en orbite dans le plan dit de l'écliptique, formant un angle de sept degrés seulement avec l'équateur du Soleil. Les autres grandes planètes restent très proches de ce plan. Les lanceurs actuels ne sont pas assez puissants pour propulser une sonde hors du plan de l'écliptique et la faire passer au-dessus des pôles du Soleil. Ils ne peuvent que soustraire ou ajouter un peu de vitesse à celle de la Terre, qui se déplace à 30 km/s en orbite autour du Soleil.

Lors de son lancement en octobre 1990, Ulysse atteignit la vitesse de 41 km/s par rapport au Soleil, devenant ainsi la sonde interplanétaire la plus rapide de l'histoire. Encore lui fallait-il s'affranchir de la force d'attraction terrestre et prendre de l'accélération dans une nouvelle direction. Pour cela, les ingénieurs chargés du pilotage d'Ulysse firent en sorte de conduire la sonde, seize mois plus tard, à proximité du pôle nord de la planète géante Jupiter. Sous l'effet de l'attraction gravitationnelle de cette dernière, la sonde fut déviée vers le sud, sortit du plan de l'écliptique et prit une nouvelle trajectoire qui devait lui permettre de survoler les pôles du Soleil en 1994 et 1995.

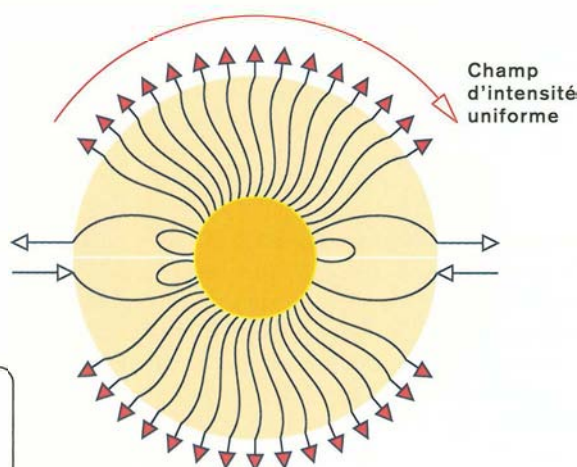
Ce périple de quatre ans via Jupiter n'était pas long par rapport au temps qu'il avait fallu pour construire la sonde, puis attendre son lancement, différé en raison notamment de l'accident de la navette américaine Challenger en 1986.

La mission d'étude des pôles solaires conçue dans les années 70 était une mission commune ESA/NASA, ce qu'elle est encore aujourd'hui. La NASA annula le projet d'une deuxième sonde qui avait pour objectif de contourner le Soleil dans le sens opposé à celui d'Ulysse, mais elle tint ses promesses en ce qui concerne le lancement de la sonde européenne, la fourniture d'une source d'énergie à radio-isotopes et la mise à disposition des stations sol nécessaires pour communiquer avec la sonde dans l'espace lointain. L'ESA a réalisé le véhicule spatial dont elle conduit maintenant les opérations. Des équipes scientifiques américaines se partagent pour moitié avec des équipes européennes les expériences embarquées à bord d'Ulysse.

Résultat



Escompté



Découvert par Ulysse

L'action du Soleil sur l'espace qui l'entoure et sa variabilité sont entièrement liées à son magnétisme, qui demeure une énigme. Avant Ulysse, les chercheurs savaient que le vent solaire étire le magnétisme équatorial sous forme laminaire, mais ils pensaient que près des pôles géographiques du Soleil, la situation ressemblerait plus à ce qu'elle est sur notre planète, le champ magnétique s'intensifiant au niveau de pôles magnétiques bien définis. Néanmoins, Ulysse a trouvé un champ magnétique également réparti et les experts devront réviser leurs théories.

Journal de bord

Tout au long de sa course vers Jupiter, Ulysse a retrouvé les données bien connues de la "météorologie solaire" de l'héliosphère équatoriale, où prédomine un vent solaire relativement lent, se déplaçant à environ 400 km/s. Les courants de vent provenant des hémisphères nord et sud se disputent cette zone équatoriale et finissent par s'écouler côte à côte.

Ces flux de vent solaire entraînent dans leur sillage le champ magnétique solaire de l'hémisphère dont ils sont issus. La frontière qui les sépare ondule et virevolte dans le même sens que le Soleil telle la jupe d'une ballerine. La sonde enregistra de nombreuses inversions brutales du champ magnétique au franchissement de ces replis. Elle ressentit également des ondes de choc, aux moments où les rafales engendrées par les éruptions solaires rejoignent le vent solaire lent.

Lorsque le vent solaire rencontre le champ magnétique intense de Jupiter, les deux forces en présence entrent en conflit. Dans l'ensemble, la planète tient le vent solaire à l'écart en l'empêchant de pénétrer dans la vaste zone que constitue sa magnétosphère. En février 1992, les chercheurs du projet Ulysse profitèrent du survol de Jupiter pour observer cette magnétosphère. Elle était animée d'un mouvement d'expansion ou de rétraction en fonction de la force du vent solaire et contenait une matière dense éjectée par Io, satellite volcanique de Jupiter.

Après sa rencontre avec Jupiter, Ulysse traça progressivement son chemin vers le sud, sortant de la région équatoriale de l'héliosphère pour rejoindre les hautes latitudes solaires. Les conditions météorologiques régnant dans l'héliosphère commencèrent à changer, en partie du fait du Soleil qui abordait une phase d'activité plus calme après avoir traversé une période de fortes turbulences marquée par la présence, en 1990, d'un nombre maximum de taches à sa surface.

A partir d'août 1992, Ulysse rencontra des flux ponctuels de vent solaire beaucoup plus rapide, pouvant atteindre deux fois la vitesse du vent lent. Ce vent rapide qui souffle à 800 km/s prend naissance dans des zones relativement froides de l'atmosphère solaire, dites trous coronaux. Fin 1993, la sonde était totalement immergée dans le vent rapide issu d'un trou coronal austral. Entre temps, les ingénieurs avaient comparé la composition des deux types de vent solaire.

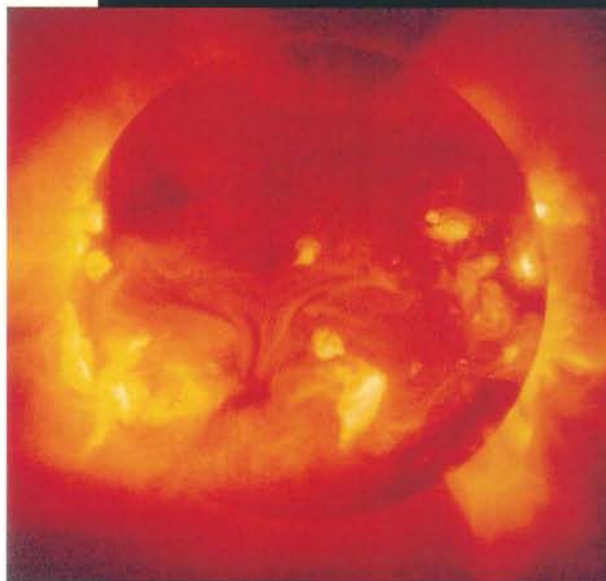
“Notre instrument a décelé une différence frappante entre ces vents”, explique le chercheur bernois Johannes Geiss. “A la source du vent lent, la température de l’atmosphère solaire est de l’ordre de 1,8 million de degrés, dépassant de plusieurs centaines de milliers de degrés la température enregistrée dans les trous coronaux. Malgré la température plus élevée de sa source, ce vent est pauvre en éléments comme l’azote qui sont difficiles à ioniser. Ces éléments ont dû se raréfier.”

Ulysse continua d’enregistrer à des latitudes plus élevées qu’on ne l’escomptait les ondes de choc déclenchées par les éruptions solaires. Ces ondes se propageaient par des voies détournées. En février 1994, des particules chargées provenant d’une éruption solaire à 20 degrés de latitude nord atteignirent la sonde à 55 degrés de latitude sud. Selon Richard Marsden, “Ulysse nous apprend que les différentes régions de l’héliosphère sont reliées les unes aux autres par des liens que nous étions loin d’imaginer.” Grâce à l’accalmie solaire, les phénomènes qui avaient été masqués par l’activité turbulente de l’astre purent être observés plus facilement. On constata d’étranges “évanouissements” du champ magnétique du vent solaire, pouvant durer une minute. On suppose que ces phénomènes sont dus à l’éjection par le Soleil d’une matière suffisamment chaude et dense pour repousser le magnétisme.

Dans la course du Soleil au milieu des étoiles, le gaz interstellaire ténu donne naissance à une brise qui façonne l’héliosphère. L’un des instruments emportés par Ulysse détecta directement les atomes de cette brise, montrant qu’elle est un peu plus forte qu’on ne le pensait. La sonde recueillit dans son collecteur ultra-perfectionné des particules de poussières d’origine interstellaire, représentant une matière première analogue à celle des planètes.

Partis à la recherche du pôle sud magnétique du Soleil, les scientifiques s’attendaient à le trouver décalé par rapport à l’axe de rotation, qui correspond au véritable pôle géographique. Ils pensaient que compte tenu de la rotation, le pôle magnétique serait directement aligné sur Ulysse vers la mi-septembre 1994, lors du passage de la sonde au plus près du pôle sud solaire, à 80,2 degrés de latitude par rapport à l’équateur.

Même en août, aucun signe d’intensification du champ magnétique ni du rayonnement cosmique susceptible d’indiquer qu’on se rapprochait du pôle magnétique n’avait été enregistré. Plus tard, alors que la sonde se trouvait plus loin vers le sud, les chercheurs d’Ulysse se rencontrèrent au Centre ESTEC de l’ESA, à Noordwijk. Malgré la déception ou la perplexité que ce constat suscitait chez certains, c’est dans une atmosphère de grande excitation que les scientifiques durent convenir, au vu des données transmises par la sonde, que le Soleil cache au monde extérieur le pôle magnétique banal qu’il pourrait éventuellement receler.



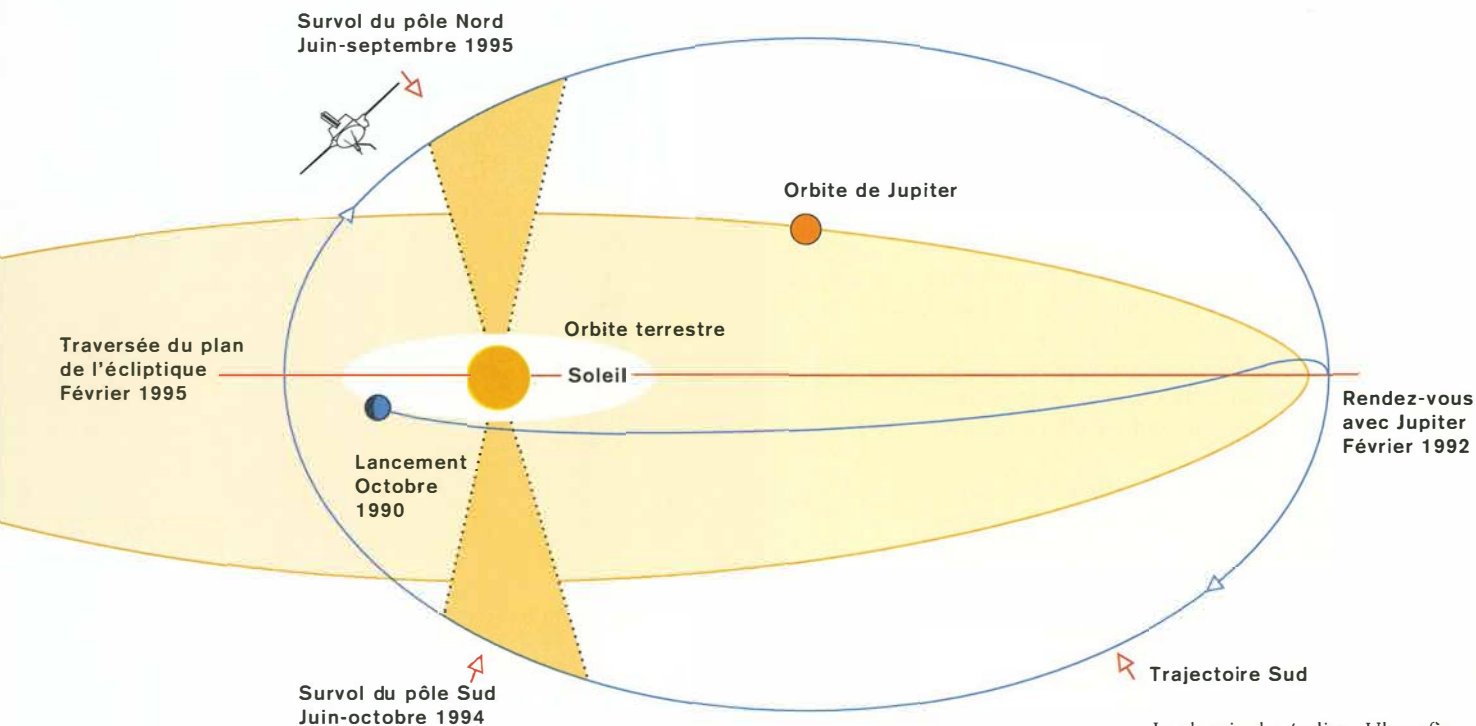
Octobre 1991



Mars 1994

Accalmie solaire. Pendant le long voyage d’Ulysse, le satellite japonais Yohkoh, alors en orbite autour de la Terre, observa l’atmosphère solaire dans le rayonnement X. Entre 1991 (date proche du maximum d’activité solaire) et 1994 (évolution vers le minimum d’activité solaire), le Soleil retrouva une existence plus calme et plus ordonnée. Les trous coronaux sombres d’où émerge le vent solaire rapide apparaissent nettement sur le deuxième cliché.

Photo: R.D. Bentley (MSSL, UK) et équipe Yohkoh SXT



Le chemin des écoliers. Ulysse fit appel à l'assistance gravitationnelle de Jupiter pour quitter le plan de l'écliptique dans lequel gravitent les planètes et gagner l'orbite qui allait le mener au-dessus des pôles solaires.

L'odyssée se poursuit

Si Ulysse a déjà récompensé les chercheurs des années de travail qu'ils ont consacrées à la préparation et à l'exécution de la mission, l'aventure n'en est pas pour autant terminée. Navigant maintenant à vive allure en orbite polaire autour du Soleil, la sonde a franchi à nouveau l'équateur et se dirige vers la région du pôle nord, qu'elle survolera en juillet 1995.

Entre temps, l'expérience de collecte de poussières installée à bord d'Ulysse livre des résultats particulièrement intéressants. Les poussières interstellaires détectées se révélant plus lourdes que prévu, l'équipe allemande les imagine enrobées de glace. S'il en est ainsi, la glace devrait se vaporiser au voisinage du Soleil et la poussière devenir plus légère lors du passage d'Ulysse au plus près de l'astre du jour. Et cela conforterait une hypothèse de plus en plus répandue, selon laquelle la glace serait l'un des ingrédients essentiels de la formation des planètes.

Le passage au-dessus du pôle nord pourra confirmer ou modifier les impressions recueillies par les chercheurs au-dessus du pôle sud. Il était prévu de mettre un terme à la mission Ulysse après le survol du pôle nord en 1995, la sonde poursuivant sa trajectoire l'éloignant du Soleil. Toutefois, forts des succès déjà remportés dans le cadre de cette mission, les chercheurs ont réussi à obtenir sa prolongation jusqu'en 2000-2001, date à laquelle la sonde retournera vers le Soleil.

La mission s'en trouvera notablement enrichie. Les observations polaires de 1994-1995 coïncident avec une accalmie du Soleil, caractérisée par un très petit nombre de taches solaires. A la fin de la décennie, le Soleil reprendra une activité intense - les taches solaires seront alors proches de leur maximum - qui aura pour effet de modifier radicalement les conditions régnant aux latitudes élevées de l'héliosphère explorées par Ulysse.

SOHO: comprendre les humeurs du Soleil

26 | 27

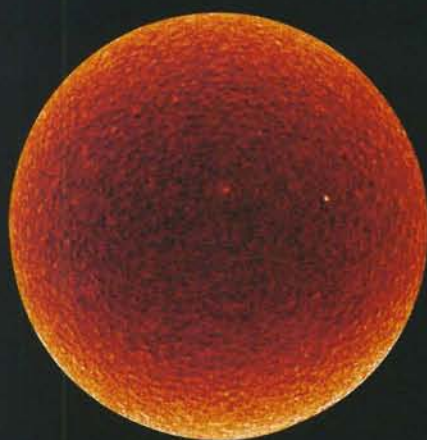
En ce qui concerne le Soleil, l'une des découvertes les plus étonnantes des décennies passées a été de constater que notre étoile chantait. Les notes, trop basses pour être perçues par l'homme, ne peuvent pas franchir l'espace interplanétaire. Les physiciens parviennent néanmoins à détecter à la surface du Soleil un mouvement rythmique engendré par la réverbération d'ondes sonores à l'intérieur de l'astre. Les oscillations qui en résultent ont des fréquences bien définies, comme les notes de musique et leurs harmoniques, et leur étude jette un nouvel éclairage sur la structure du Soleil.

En 1995, le satellite SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) de l'Agence spatiale européenne ira se positionner à 1,5 million de kilomètres de la Terre, du côté du Soleil, là où l'attraction gravitationnelle de la Terre et celle du Soleil sont en équilibre.

SOHO



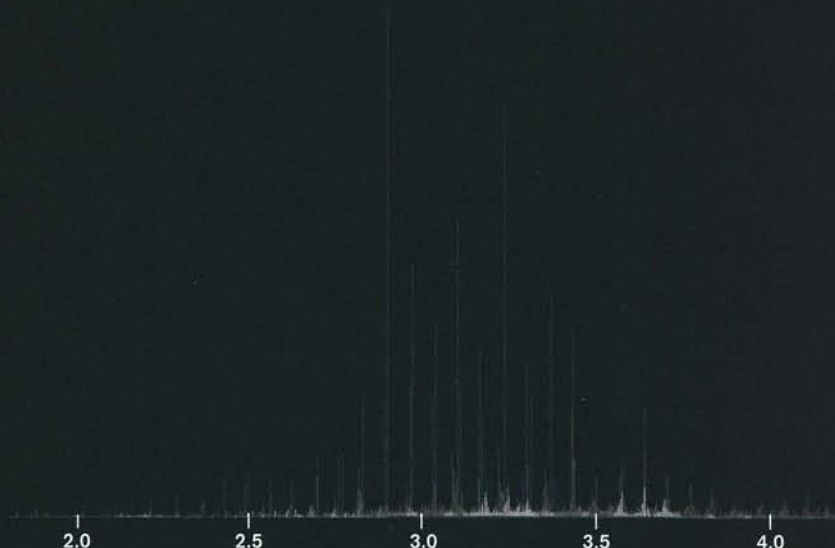
Données brutes



Carte des vitesses corrigées

SOHO aura notamment pour tâche de faire un enregistrement du chant du Soleil. D'autres instruments procéderont à l'étude coordonnée des phénomènes qui portent la température des régions supérieures de l'atmosphère à plusieurs millions de degrés et qui propulsent le vent solaire.

Chant solaire. Ce cliché pris par l'instrument MDI de SOHO fait apparaître des régions de la surface solaire qui se soulèvent (en jaune) ou s'abaissent (en rouge). La rotation du Soleil est le facteur prédominant au niveau des données brutes. Après soustraction de cet effet (en bas), on peut voir les vagues de surface provoquées par les ondes sonores venues de l'intérieur de l'astre. Le spectre ci-dessous donne les "notes" enregistrées par le réseau mondial d'observation au sol de l'Université de Birmingham. Ces notes correspondent aux oscillations de l'ensemble de l'astre solaire. Les oscillations, mesurées en millihertz, durent environ 5 minutes. Cliché: P.H. Scherrer (Stanford) et Lockheed Palo Alto Research Lab. Spectre des oscillations: G. R. Isaak (Birmingham)



Raffinement technique. Cette photo prise au cours de la fabrication du satellite témoigne de la complexité des instruments de SOHO. Chaque composant et chaque instrument est conçu en vue de résister aux conditions rigoureuses du lancement et du milieu spatial.

SOHO: caractéristiques techniques

Objectif

observer le Soleil, de son noyau jusqu'à ses couches externes et au vent solaire

Agences responsables

ESA et NASA
(programme STSP commun SOHO/Cluster:
ESA 70%, NASA 30%)

Nom

Solar and Heliospheric Observatory

Maître d'oeuvre

Matra Marconi Space, Toulouse (France)

Masse

1610 kg, plus 240 kg d'ergols

Charge utile scientifique

650 kg, 12 expériences

Longueur

3,8 mètres

Lancement

1995

Lanceur

Atlas IIAS (NASA)

Orbite

autour du point de Lagrange L1,
1,5 million de km entre Terre et Soleil

Centre de contrôle

NASA/GSFC

Stations sol

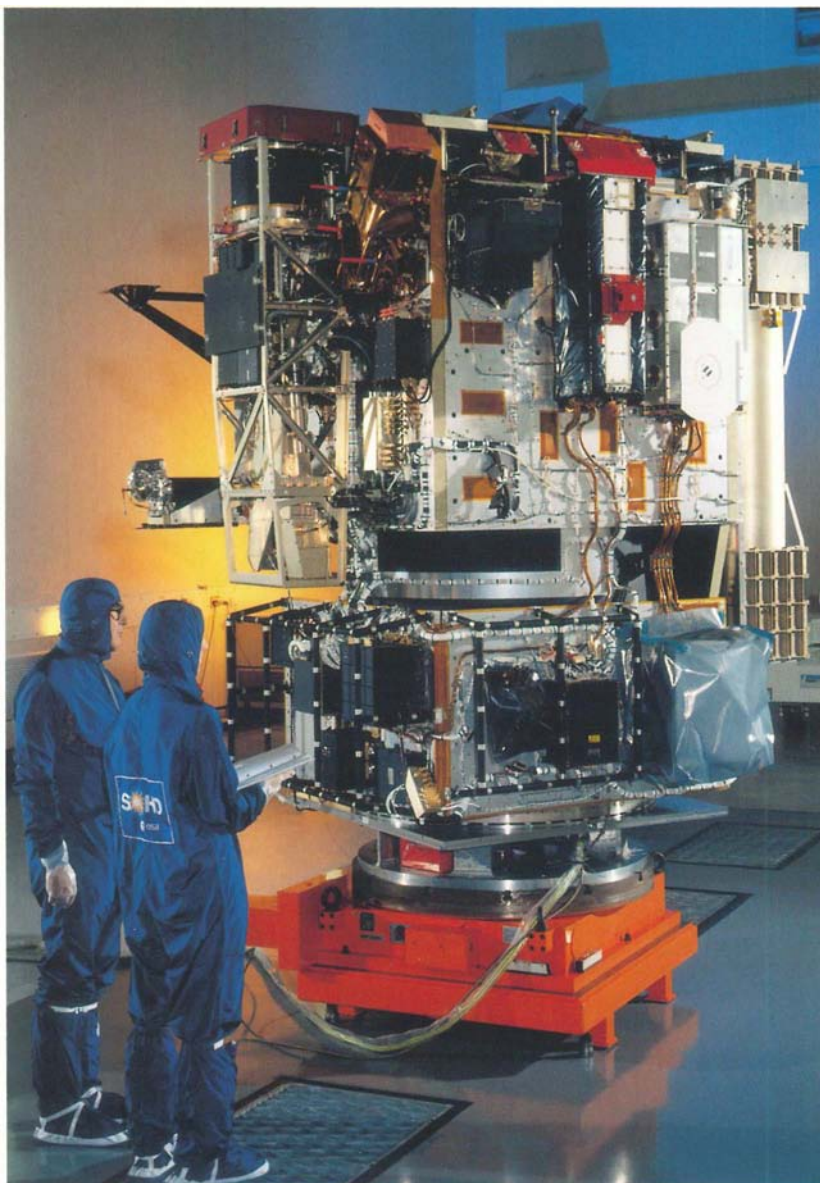
Réseau de l'espace lointain (NASA)

Durée de vie

2 à 6 ans

Alimentation en énergie

panneaux solaires



Le Soleil dans l'ultraviolet

L'atmosphère bouillonnante qui enveloppe la surface brillante de l'astre est le siège d'une lutte intense entre les gaz chauds électrisés et le champ magnétique solaire, ce cataclysme dont boucles proéminentes, formations filamenteuses et bouffées de gaz enflées comme des nuages d'orage sont des manifestations visibles. On sait quel est le résultat de cette agitation.

L'atmosphère solaire, ou couronne, atteint une température suffisamment élevée pour diffuser des rayons X. Certaines particules électriques, sorties victorieuses du combat, sont éjectées et vont alimenter le vent solaire. Ce dernier s'éloigne dans l'espace en entraînant dans son sillage le champ magnétique solaire, dont les déformations ont pu être étudiées par Ulysse. Les processus présidant à ces événements restent toutefois très mystérieux.

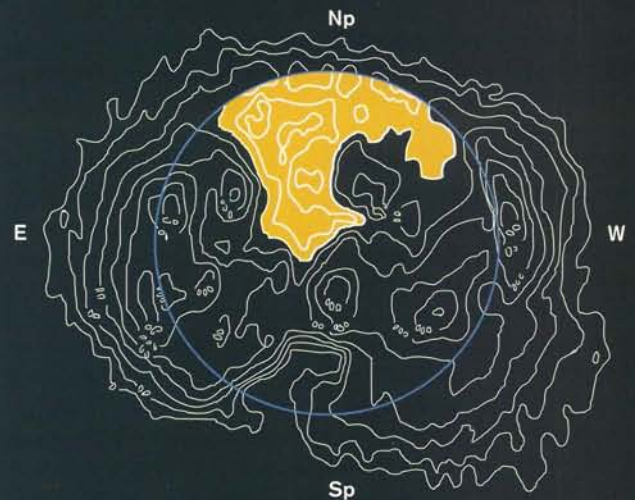
C'est pourquoi la majeure partie des instruments embarqués sur SOHO observeront ces processus dans l'ultraviolet. De toutes les émissions solaires, l'ultraviolet a été retenu parce que c'est ce domaine d'observation qui pourra le plus probablement nous dévoiler ce qui se passe dans les régions supérieures de l'atmosphère solaire. Cet ultraviolet est différent de celui qui, de longueurs d'onde plus grandes, pénètre dans l'atmosphère terrestre et brûle les épidermes; il s'agit d'ondes beaucoup plus courtes que l'on ne peut détecter que dans l'espace.

"Nous voulons savoir par quel mécanisme l'atmosphère du Soleil est portée à des températures aussi élevées", déclare Klaus Wilhelm, "et comment des fragments s'en détachent pour former le vent solaire." Ce chercheur de Lindau (Allemagne) est le responsable de l'expérience SUMER, qui aura pour objet de balayer sans relâche des régions actives et calmes du Soleil dans des longueurs d'onde précises de l'ultraviolet.

"L'ultraviolet ondes courtes", explique Klaus Wilhelm, "permet de distinguer précisément les couches inférieures de l'atmosphère solaire dans lesquelles la température commence à s'élever, passant de 10 000 degrés à plus d'un million de degrés. Comme nous supposons que les épisodes de montée en température sont limités et rapides, il nous faut un instrument adéquat pour les observer. SUMER distinguera des structures de moins de 1000 kilomètres et balaiera le Soleil quarante fois par heure sur une bande de 80 000 kilomètres."

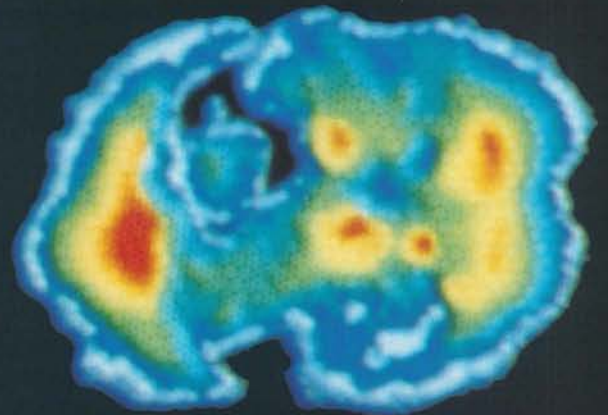
Un autre instrument, le CDS, conçu au Royaume-Uni explorera des régions du Soleil dans des longueurs d'onde plus courtes de l'ultraviolet. En comparant les intensités dans différentes longueurs d'onde, les observateurs pourront repérer des zones denses de l'atmosphère; les décalages de fréquence permettront d'en mesurer la vitesse.

Ces deux spectromètres à balayage seront orientés vers les sites les plus intéressants grâce à un télescope conçu par une équipe franco-belgo-américaine. Ce télescope prendra quotidiennement des clichés du disque solaire complet et de sa basse atmosphère dans quatre longueurs d'onde différentes de l'ultraviolet sélectionnées par des filtres, mais il scrutera également le Soleil en détail, secteur par secteur, et apportera son concours aux autres instruments lorsqu'il s'agira d'observer de près les zones choisies.



Le Soleil dans l'UV extrême. Les données transmises en 1972 par le satellite OSO-7 de la NASA nous donnent une idée de l'atmosphère du Soleil telle que SOHO pourra l'observer avec une meilleure définition à l'aide de son instrument EIT: contours d'intensité en haut, et image codée en couleurs en bas. Les atomes de fer fortement ionisés émettent aux très courtes longueurs d'onde de l'ultraviolet. Les émissions les plus intenses (en rouge) correspondent aux régions proches de l'équateur. EIT enverra chaque jour des images du temps qu'il fait sur l'ensemble de l'astre solaire, de même qu'il examinera en détail certaines régions prédéfinies.

Cliché: W. Neupert; Spectrohéliographe EUV



Echantillons de l'atmosphère solaire

Un instrument italo-américain examinera la couronne, plus au loin, à une distance de 7 millions de kilomètres du Soleil, soit cinq fois le diamètre de l'astre. Il observera des éléments chimiques précis dans l'ultraviolet, notamment dans la lumière émise par les atomes d'hydrogène du Soleil. A mesure que les atomes s'accélèrent dans le vent solaire, les courants ainsi formés voient leur éclat s'atténuer en raison du déplacement de leur longueur d'onde apparente. A partir de cet effet d'atténuation, on peut mesurer leur vitesse. Un deuxième coronographe, américain, fonctionnant dans le visible, prendra des clichés de la couronne jusqu'à la distance record de 21 millions de kilomètres où elle n'émet plus qu'une lueur extrêmement faible. Des instruments connexes de conception franco-britannique et allemande recueilleront des données plus détaillées sur la couronne, observée de plus près.

Les possibilités extraordinaires offertes par SOHO d'observer, dans l'ultraviolet comme dans le domaine visible, les processus à l'oeuvre dans l'atmosphère solaire seront en partie le fruit des qualités propres à chacun des instruments. Mais c'est le recours simultané aux cinq instruments opérant à différentes échelles et dans différentes longueurs d'onde qui permettra aux chercheurs d'appréhender le déroulement de ces phénomènes depuis les couches les plus basses de l'atmosphère jusqu'à sa frange de vents.

"Nous avons concocté la meilleure combinaison possible de télescopes", fait remarquer Klaus Wilhelm. "Nous les ferons fonctionner ensemble et nous regrouperons les résultats des uns et des autres pour mieux interpréter nos observations."

Au lieu d'observer le Soleil, l'un des instruments de SOHO travaillant dans l'ultraviolet observera le faible reflet des atomes d'hydrogène dans lesquels baigne le système solaire. Conduite par une équipe française, cette expérience qui portera sur l'observation de l'ensemble du ciel aura pour objectif de déterminer si l'héliosphère, cette bulle géante de l'espace dans laquelle sont enfermés le champ magnétique et le vent solaires, est ou non aplatie du côté des pôles.

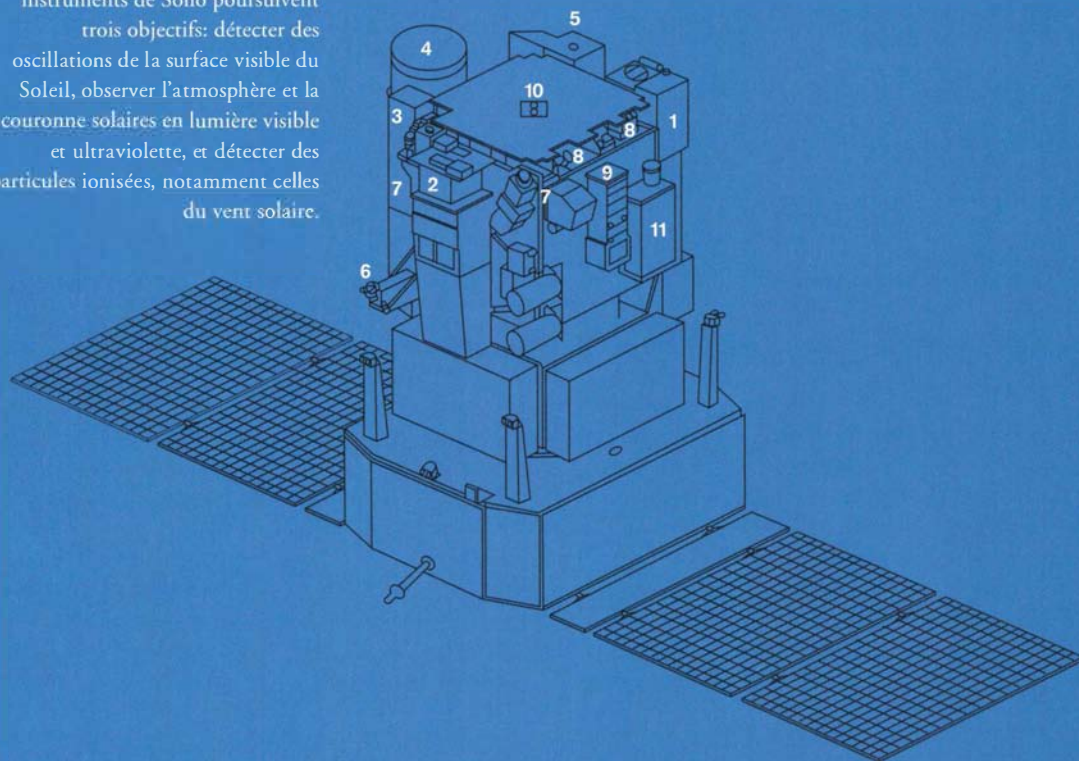
Le vent solaire s'écoulera de part et d'autre du véhicule spatial à une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres à la seconde. Un instrument mis au point par l'Allemagne, la Suisse et les Etats-Unis aura pour mission d'identifier ses composants chimiques et d'en mesurer la charge électrique. Il comptabilisera également les particules plus rares et plus rapides accélérées sous l'effet des éruptions solaires, et les impacts correspondants: ces particules, se déplaçant le long du champ magnétique, présentent un angle d'impact différent.

En ce qui concerne les particules de très haute énergie, presque aussi rapides que la lumière, SOHO fera appel à des dispositifs de fabrication germano-irlandaise pour distinguer les électrons et les noyaux des différents éléments en suivant leur trace à travers des couches de semi-conducteurs. Des détecteurs d'origine finlandaise étendront ces recherches à d'autres plages d'énergie, plus basses et plus élevées.

Les atomes et électrons de l'espace interplanétaire sont des échantillons de l'atmosphère solaire. Grâce à SOHO, les chercheurs pourront remonter à l'origine de ces éléments au niveau du Soleil. Les comparaisons avec les données des télescopes les aideront à vérifier les théories avancées sur le mécanisme de propulsion des particules. Environ une heure après avoir croisé SOHO, le vent solaire arrivera à proximité de la Terre. C'est là que les quatre satellites Cluster de l'ESA observeront les effets du vent solaire au voisinage de notre planète. SOHO et Cluster étant des projets apparentés, les chercheurs participant à ces deux missions ne manqueront pas d'échanger leurs données et leurs théories. Tous leurs efforts tendront vers une meilleure compréhension du Soleil, dans l'espoir d'apprendre comment ce dernier régit l'espace interplanétaire et l'environnement de la Terre.

Observant le Soleil de multiples façons au moyen de sa batterie d'instruments, SOHO établira le lien entre les phénomènes qui se déroulent au sein de l'atmosphère et du vent solaires et l'activité du Soleil, ponctuée par son étrange musique, au-delà de sa surface visible.

Les yeux rivés sur le Soleil. Les instruments de Soho poursuivent trois objectifs: détecter des oscillations de la surface visible du Soleil, observer l'atmosphère et la couronne solaires en lumière visible et ultraviolette, et détecter des particules ionisées, notamment celles du vent solaire.



Instruments scientifiques

1 SUMER

Spectromètre à balayage UV
(50-160 nanomètres)
PI: K. Wilhelm
MPAe, Lindau (Allemagne)
Co-Is: D, CH, F, USA

2 CDS

Spectromètre extrême UV
(15-79 nanomètres)
PI: R.A. Harrison
DRAL, Chilton (Royaume-Uni)
Co-Is: UK, CH, D, I, N, USA

3 EIT

Télescope imageur extrême UV
(17-30 nanomètres)
PI: J.P. Delaboudinière
IAS, Orsay (France)
Co-Is: F, B, USA

4 UVCS

Spectromètre coronographe UV
(50-130 nanomètres)
PI: J.L. Kohl
SAO, Cambridge, USA
Co-Is: USA, CH, D, I

5 LASCO

Coronographe grand angle en
lumière visible
PI: G.E. Brueckner
NRL, Washington DC (Etats-
Unis)
Co-Is: USA, D, F, UK

6 SWAN

Imageur UV Lyman Alpha
de l'ensemble du ciel
PI: J.L. Bertaux
CNRS, Verrières le Buisson
(France)
Co-Is: F, SF, USA

7 CELIAS

Composition du vent solaire et
flux dans l'UV extrême
PI: D. Hovestadt
MPE, Garching (Allemagne)
Co-Is: D, CH, Russie, USA

8 COSTEP

Particules énergétiques (basses énergies)
PI: H. Kunow
Université de Kiel (Allemagne)
Co-Is: D, E, ESA, F, IRE, J, USA

8 ERNE

Particules énergétiques (hautes énergies)
PI: J. Torsti
Université de Turku (Finlande)
Co-Is: SF, UK

9 GOLF

Oscillations globales de vitesse
PI: A. Gabriel
IAS, Orsay (France)
Co-Is: F, CH, D, DK, E, ESA, NL,
UK, USA

10 VIRGO

Irradiation solaire et oscillations de
luminosité
PI: C. Fröhlich
PMOD, Davos (Suisse)
Co-Is: CH, B, E, ESA, F, N

11 SOI

Mesure des oscillations par
imagerie Doppler Michelson (MDI)
PI: P.H. Scherrer
CSSA, Université de Stanford (Etats-
Unis)
Co-Is: USA, DK, UK

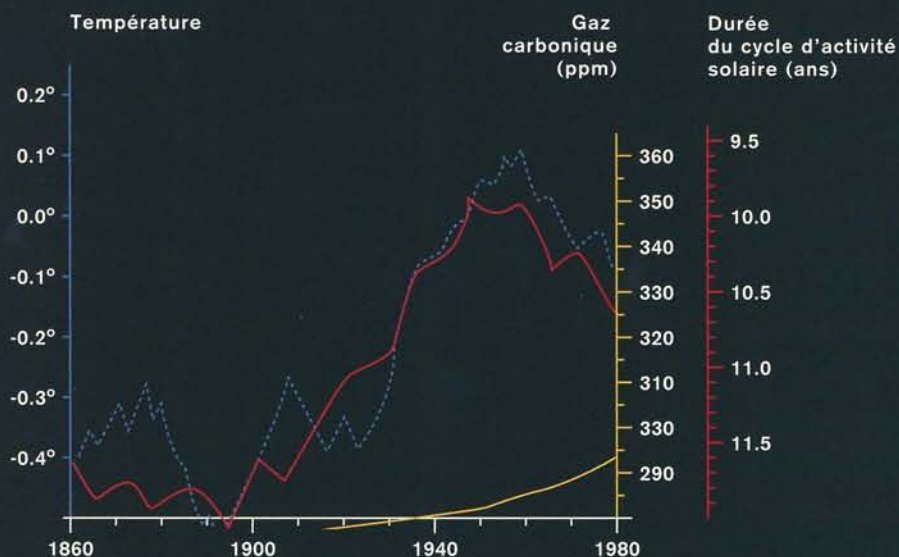
PI= chercheur principal
Co-Is= pays des chercheurs associés



Une orbite paisible. SOHO naviguera au voisinage du point de Lagrange L1 où les forces de gravitation de la Terre et du Soleil sont en équilibre. Il gravitera lentement autour de L1, bénéficiant ainsi de conditions idéales pour observer le Soleil en permanence (la gêne occasionnée par les couchers de Soleil et le déplacement du véhicule spatial est ainsi évitée).

Pourquoi le Soleil a-t-il des sautes d'humeur?

Le climat de la Terre



Selon de nombreux climatologues, le réchauffement de notre planète serait dû à l'augmentation du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine. Des physiciens de Copenhague spécialisés dans l'étude des relations Soleil-Terre attribuent quant à eux ce réchauffement à une accélération du cycle solaire. Ils laissent entendre que les cycles rapides entraîneraient une élévation et les cycles lents un abaissement des températures. Les spécialistes de la physique solaire ne sont en mesure ni de confirmer ni d'infirmer la théorie danoise, malgré l'importance cruciale pour la gestion de l'environnement d'un verdict sur le rôle respectif de la nature et de l'homme dans ces changements climatiques.

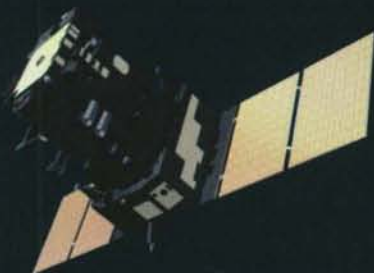
A peu près tous les onze ans, le champ magnétique solaire connaît un profond bouleversement: on assiste à une inversion des polarités magnétiques nord et sud au milieu d'un foisonnement de taches solaires et d'événements cataclysmiques à la surface visible de l'astre. Le nombre des taches solaires va ensuite diminuant jusqu'à la prochaine inversion magnétique. Le cycle des taches solaires peut durer de neuf à quatorze ans, et il lui est même arrivé de cesser complètement.

Les manuels scientifiques expliquent les sautes d'humeur du Soleil par un effet dynamo, dû à des vitesses de rotation différentes à l'intérieur de l'astre. Les courants électriques engendreraient le magnétisme qui, sous l'effet des rotations différentielles des couches du Soleil, se propage comme une corde vrillée et jaillit à la surface sous forme de taches solaires. Puis la corde casse et le magnétisme bascule. Cette théorie est toutefois fragile. Par la cartographie des oscillations de surface, SOHO permettra de sonder les couches internes où l'effet dynamo pourrait exister.

Il n'en reste pas moins à déterminer si la variabilité solaire pourrait avoir des conséquences sur le climat de la Terre et lesquelles. L'atmosphère terrestre pourrait être directement affectée par les vagues de particules provenant d'une atmosphère solaire orageuse. Les observations de SOHO sur le vent solaire apporteront peut-être quelques lumières sur cette relation possible. La mission SOHO se penche aussi sur le problème de l'énergie rayonnée par le Soleil, qui peut varier d'une décennie à l'autre et d'un siècle à l'autre.

L'expérience VIRGO est axée sur le climat. Ses six instruments enregistreront les fluctuations survenant de minute en minute dans l'émission d'énergie solaire, ainsi que les oscillations solaires révélées par les fluctuations rythmiques de son éclat de surface. L'équipe VIRGO est conduite par Claus Fröhlich, de Davos (Suisse).

“Nos mesures seront directement utiles aux chercheurs qui modélisent le climat de la Terre”, déclare Claus Fröhlich. “Et nous analyserons les données de nombreuses autres façons. Nous pouvons établir une corrélation entre les fluctuations de l'énergie dégagée par le Soleil et son activité visible. Les oscillations nous renseigneront sur les mécanismes cachés sous la surface de l'astre. Lorsque SOHO nous aura aidés à comprendre dans le détail la variabilité solaire, nous serons mieux armés pour aborder les problèmes climatiques à long terme.”



L'héliosismologie: les enseignements de la musique solaire

Les ondes sonores sondent l'intérieur de l'astre solaire. Celles qui pénètrent jusque dans les couches les plus profondes engendrent les oscillations solaires globales qui seront observées par GOLF. Ce sont elles qui fournissent les meilleurs informations sur la structure générale du Soleil. Le MDI analysera les oscillations plus complexes associées aux ondes circulant dans les couches moins profondes ainsi que les turbulences de la zone convective. Le LOI (instrument faisant partie de l'expérience VIRGO) détectera les oscillations de complexité intermédiaire.



“Les oscillations de la surface nous permettent d’entrevoir ce qui se passe au-delà du masque de la face visible du Soleil”, déclare Vicente Domingo, responsable scientifique du projet SOHO à l’ESA. “Notre technique s’apparente à la sismologie, qui se sert des ondes sismiques pour identifier les couches et les structures internes du globe terrestre. C’est pourquoi nous parlons d’héliosismologie. Cette technique est d’une précision étonnante. Elle livre aux spécialistes de la physique solaire les paramètres les plus précis sur lesquels ils puissent travailler. SOHO fournira aux héliosismologues la plate-forme d’observation exceptionnellement stable, sans aucun coucher de Soleil, dont ils ont besoin.”

Les oscillations solaires détectées par les observatoires au sol confirment d’ores et déjà que les couches profondes du Soleil ressemblent beaucoup à ce que les théoriciens ont imaginé. Elles montrent cependant que la couche externe turbulente, dite zone convective, est plus épaisse qu’on ne le pensait. Elles indiquent aussi que les vitesses de rotation de surface, allant diminuant de l’équateur aux pôles, se retrouvent également dans des couches plus profondes de la zone convective. Les vitesses de rotation aux latitudes moyennes varient au cours du cycle des taches solaires.

Les héliosismologues voudraient bien élucider certains mystères, par exemple trouver la dynamo qui, à l’intérieur du Soleil, générerait son champ magnétique externe. Mais aussi déceler un type d’oscillation engendré non par des ondes sonores, mais par un phénomène gravitationnel de montée et de descente, analogue à une onde océanique de fond. Contrairement aux ondes sonores, qui transmettent l’information de façon passive, les ondes de gravité pourraient agir sur le comportement du Soleil, par brassage du noyau. L’instrument GOLF mis au point par une équipe française pour le satellite SOHO enregistrera, à l’échelle de l’astre solaire, les oscillations qui parcourent ses structures profondes en provenance du noyau à haute température. Un instrument américain, le MDI, divisera la face du Soleil en un million de segments en vue d’y déceler des modes oscillatoires plus complexes fournissant des informations sur les couches externes du Soleil, ainsi que sur sa structure profonde. Ces deux instruments détecteront les oscillations grâce aux légers décalages de fréquence de la lumière qui apparaissent lorsque la surface du Soleil s’élève ou s’abaisse. Un troisième détecteur d’oscillations, faisant partie de l’expérience VIRGO conduite par la Suisse, sera à l’affût des changements rythmiques d’éclat du disque complet et de segments du Soleil.

Cluster: des brèches dans l'écran qui protège la Terre

Les flammes du Soleil lèchent les parages de la Terre. Un vent chaud de particules chargées venant de l'atmosphère solaire souffle au large de notre planète. A environ 60 000 kilomètres de la Terre, du côté exposé au Soleil, le vent solaire se heurte à un écran invisible dix fois plus grand que la Terre et doit infléchir sa trajectoire. Cet obstacle empêche la plus grosse part des particules solaires de pénétrer dans la magnétosphère, région de l'espace dans laquelle est confiné le magnétisme terrestre. Un certain nombre de particules parviennent toutefois à s'infiltrer et atteignent la haute atmosphère terrestre, donnant alors naissance au flamboiement des aurores que l'on peut voir danser dans le ciel des régions arctique et antarctique.

CLUSTER

La mission Cluster de l'Agence spatiale européenne rendra compte, avec une richesse de détails sans précédent, de la bataille que se livrent la Terre et les émanations solaires. Fin 1995, le lanceur européen Ariane 5 injectera simultanément quatre satellites identiques sur une orbite elliptique, puis les propulseurs équipant les satellites s'allumeront de façon à étirer cette orbite jusqu'au tiers de la distance de la Terre à la Lune en la faisant passer au-dessus des pôles terrestres.

Au cours de cette mission, la grappe des quatre satellites évoluera à travers la magnétosphère et le vent solaire qui l'enveloppe, pendant que se modifiera l'activité du Soleil. A la date du lancement, les taches apparaissant sur sa surface visible seront rares, signe d'un calme relatif qui servira de référence pour les observations de Cluster. Les années suivantes, les taches se multiplieront et le Soleil connaîtra une activité plus intense.



Quadruplés de l'espace. Les quatre satellites identiques de la mission Cluster se déplaceront en essaim. Ils se rendront jusqu'à 140.000 km de la Terre afin d'étudier la "lutte" permanente que se livrent notre planète et le vent solaire.

Cluster: caractéristiques techniques

Objectif

explorer l'environnement magnétique et électrique de la Terre

Agences responsables

ESA et NASA
(programme STSP commun
SOHO/Cluster;
ESA 70%, NASA 30%)

Nom

Cluster: terme anglais signifiant groupe, amas.
Groupe de 4 satellites évoluant dans l'espace

Maître d'oeuvre

Dornier, Friedrichshafen (Allemagne)

Charge utile scientifique

72 kg, 11 expériences

Diamètre

2,9 mètres

Lancement

Novembre 1995

Lanceur

Ariane 5

Orbite terrestre

quasi-polaire; périgée: 26 000 km,
apogée: 140 000 km; 57 h

Centre de contrôle

ESOC, Darmstadt (Allemagne)

Centre commun d'opérations scientifiques

DRAL, Chilton (Royaume-Uni)

Stations sol

Redu et Odenwald (ESA)
Réseau de l'espace lointain (NASA)

Durée de vie prévue

2 ans

Alimentation en énergie

panneaux solaires

Lorsque de fortes bourrasques de vent solaire butent contre la magnétosphère, des aurores peuvent apparaître dans le sud de l'Europe et aux Etats-Unis. Les orages magnétiques associés à ces phénomènes font dévier les aiguilles des boussoles et peuvent provoquer des pannes générales d'électricité. Ciblée de particules solaires, la haute atmosphère s'échauffe et se dilate; elle peut alors empêcher la progression des satellites sur orbite basse et les détruire.

Certains climatologues se demandent si cet échauffement à haute altitude n'affecte pas la circulation des vents en surface, ce qui établirait un lien entre les variations de l'activité solaire, le temps et le climat sur Terre. Le satellite SAMPX de la NASA a confirmé que les électrons de haute énergie émis par le Soleil peuvent détériorer la couche d'ozone. Et l'on ne sait toujours pas d'où exactement proviennent les particules énergétiques formant dans l'espace les ceintures de radiations qui entourent la Terre au niveau de l'équateur. Autant de raisons qui nous poussent à mieux comprendre l'environnement spatial de notre planète. Chacun des satellites Cluster est un laboratoire électrique doté de nombreux équipements, sensibles aux champs électriques et magnétiques, aux ondes électriques et magnétiques de toutes sortes ainsi qu'aux électrons et aux atomes chargés. Entraînés par la rotation du satellite, des détecteurs électriques virevoltent au bout de câbles longs de 50 mètres. Les faisceaux d'électrons et les impulsions radio émis par le satellite explorent l'espace environnant. Et la projection d'ions métalliques dans l'espace permet d'éviter l'accumulation de charges électriques de nature à nuire aux observations extrêmement délicates des instruments.

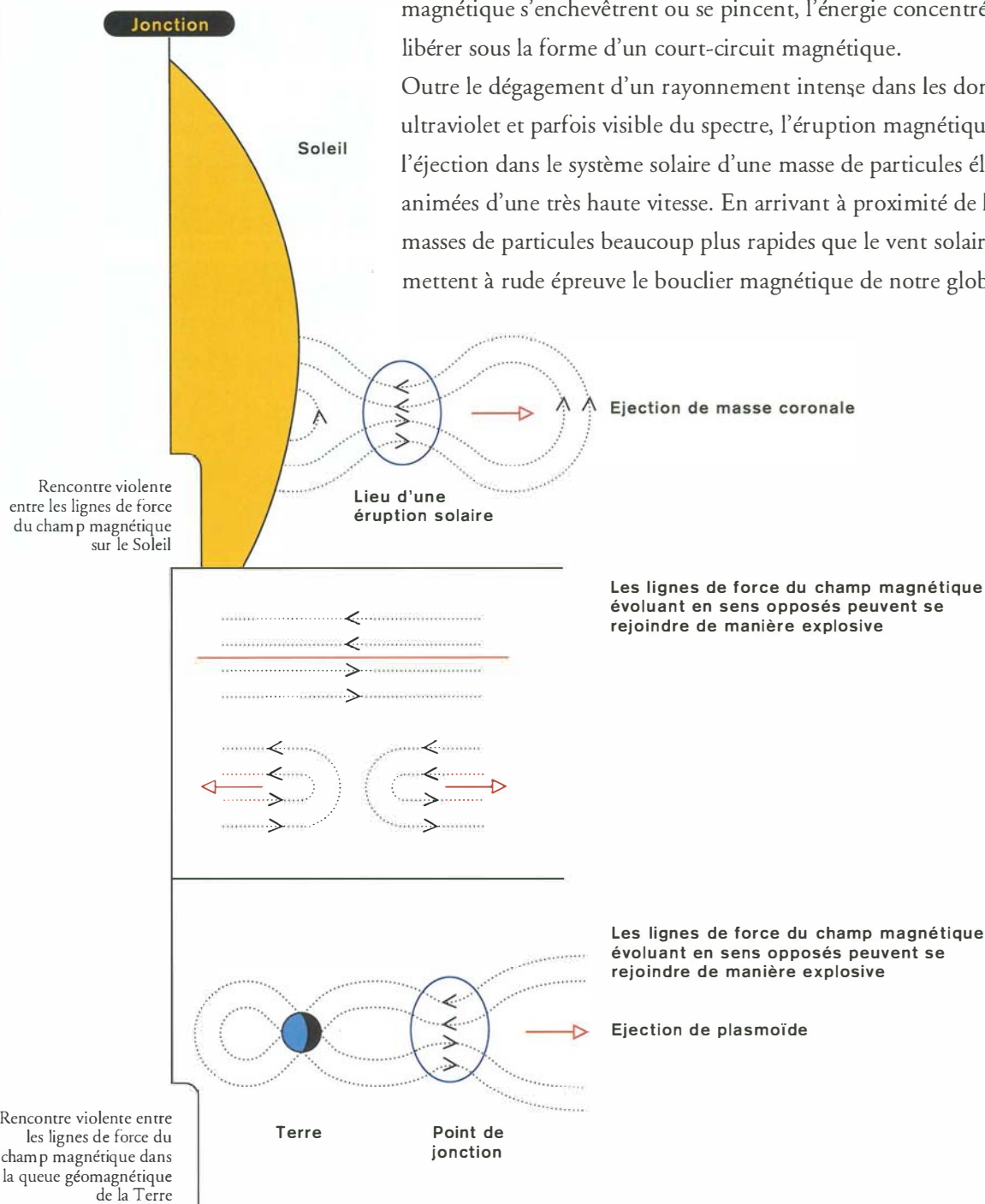
Les quatre véhicules Cluster évolueront dans l'espace en formation tétraédrique. Jusqu'à présent, les satellites chargés d'explorer la magnétosphère évoluaient seuls ou, au mieux, par groupes de deux, et les chercheurs étaient souvent dans l'impossibilité de dire, au vu des signaux transmis sur les essaims de particules fugaces, si un changement indiqué par le satellite correspondait à une évolution dans le temps ou à un déplacement dans l'espace.

"Cluster lèvera les ambiguïtés des missions précédentes", affirme Rudolf Schmidt, responsable du projet Cluster à l'ESA. "A partir des données des quatre satellites, nos ordinateurs réaliseront un film animé en trois dimensions illustrant les processus physiques à l'oeuvre dans l'environnement spatial de la Terre."

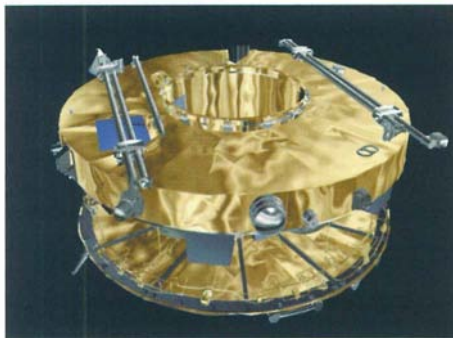
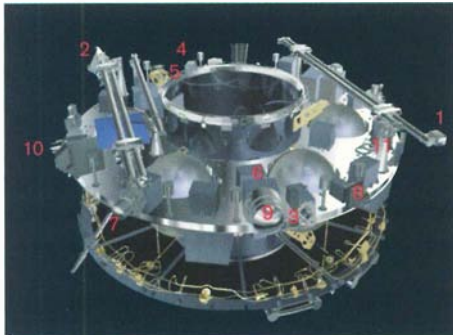
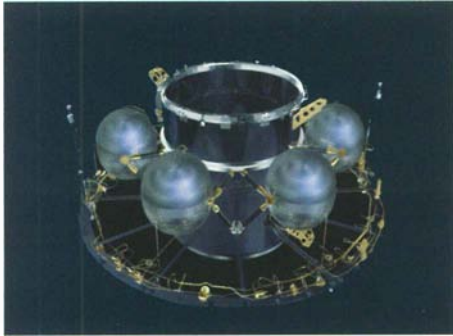
Comment la nature organise-t-elle une explosion magnétique?

Les éruptions solaires sont de gigantesques déflagrations, d'une puissance équivalant à plusieurs milliards de bombes H, enregistrées à la surface visible de l'astre. Ces explosions sont d'origine magnétique, il ne s'agit pas de réactions nucléaires. Une bataille se livre entre le plasma solaire, gaz chaud composé de particules électrisées, et les lignes de force du champ magnétique s'élevant comme des arches loin au-dessus de la surface visible de l'astre. En règle générale, des masses différentes de plasma, possédant chacune son propre champ magnétique, se repoussent mutuellement. Mais lorsque les lignes de force du champ magnétique s'enchevêtrent ou se pincent, l'énergie concentrée peut se libérer sous la forme d'un court-circuit magnétique.

Outre le dégagement d'un rayonnement intense dans les domaines X, ultraviolet et parfois visible du spectre, l'éruption magnétique provoque l'éjection dans le système solaire d'une masse de particules électriques animées d'une très haute vitesse. En arrivant à proximité de la Terre, ces masses de particules beaucoup plus rapides que le vent solaire ordinaire mettent à rude épreuve le bouclier magnétique de notre globe.



Les chercheurs de la mission Cluster s'intéressent pour deux raisons très différentes aux éruptions solaires. En tant que spécialistes de l'environnement spatial, ils veulent savoir comment ces éjections massives influent sur notre planète. Mais en tant qu'experts de la physique des plasmas, ils étudient les processus à l'oeuvre dans les gaz électrisés au voisinage de la Terre, dans l'espoir de mieux comprendre les explosions magnétiques enregistrées à la surface du Soleil. Ce deuxième axe de recherche se retrouve dans la mission SOHO de l'ESA, dont l'objectif est d'examiner directement le Soleil. Le champ magnétique terrestre est étiré et comprimé par le vent solaire au niveau de la queue géomagnétique, de sorte que les lignes de force du champ magnétique finissent par être orientées dans des directions opposées. Il peut en résulter des explosions magnétiques, beaucoup plus faibles que celles du Soleil mais dues éventuellement à la même cause, des courts-circuits ou des "reconnexions" magnétiques. Les explosions qui se produisent dans la queue géomagnétique ne se contentent pas de rejeter des particules solaires dans la magnétosphère terrestre: elles projettent également des masses de particules le long de la queue sous forme de "plasmoïde", moins massif mais de nature peut-être similaire aux masses éjectées par le Soleil. Cluster sera la première mission spatiale à examiner ces événements de façon suffisamment détaillée pour établir les faits avec certitude. Les facéties imprévisibles des plasmas et des champs magnétiques attisent la curiosité des astrophysiciens. Outre les phénomènes magnétiques, encore mystérieux, à l'oeuvre dans le Soleil et le vent solaire, on retrouve des plasmas en action partout dans l'Univers: fragments de queues cométaires, accélérateurs de particules naturels alimentés en énergie par des trous noirs géants nichés au coeur des galaxies, mais aussi le Big Bang lui-même. Sur Terre, les fluctuations du comportement de l'ionosphère - qui a pour propriété de réfléchir les ondes radio - posent un problème qui relève de la physique des plasmas. Sans oublier la question des plasmas thermonucléaires dont les physiciens s'efforcent en vain depuis une cinquantaine d'années de contrôler les réactions de fusion pour la production d'énergie. " Les turbulences observées à proximité de la Terre font apparaître la grande diversité de comportement des plasmas, avec en particulier des reconfigurations spectaculaires du champ magnétique", affirme Alain Roux, de Vélizy (France), qui a coordonné des expériences dans le cadre de la mission Cluster. "Etant donné que les particules électriques n'entrent presque jamais en collision, les turbulences doivent être provoquées par des ondes électriques et magnétiques. Nous connaissons encore mal ces ondes. Leur caractérisation précise par Cluster dans ce laboratoire que nous offre la nature fera considérablement progresser la physique fondamentale des plasmas."



Un satellite sur quatre. Les quatre satellites Cluster sont équipés des mêmes instruments d'étude du milieu électrique et magnétique et des mêmes détecteurs de particules. Les scientifiques chargés de la conception du satellite et des instruments se sont efforcés en particulier de maîtriser les champs magnétiques parasites. L'instrument ASPOC assurera le contrôle actif des charges électriques qui s'exerceront sur le véhicule.

Instruments scientifiques

1 FGM

Magnétomètres

PI: A. Balogh

Imperial College, Londres (Royaume-Uni)

Co-Is: UK, A, D, DK, F, USA

2 STAFF

Fluctuations du champ magnétique

PI: N. Cornilleau-Wehrlin

CNET, Paris (France)

Co-Is: F, DK, ESA, S, UK, USA

3 EFW

Ondes et champs électriques

PI: G. Gustafsson

IRF, Uppsala (Suède)

Co-Is: S, ESA, F, N, Russie, SF, UK, USA

4 DWP

Traitement des ondes

PI: L.J.C. Woolliscroft

Univ. Sheffield (Royaume-Uni)

Co-Is: UK, DK, F, Israël, N, Russie, S, USA

5 WHISPER

Densité des électrons et ondes du plasma

PI: P.M.E. Décréau

CRPE, Orléans (France)

Co-Is: F, DK, S, UK, USA

6 WBD

Formes des ondes enregistrées par

l'instrument EFW

PI: D.A. Gurnett

Univ. Iowa (Etats-Unis)

Co-Is: USA, D, DK, F, S, UK

7 EDI

Emetteurs et détecteurs d'électrons

PI: G. Paschmann

MPI Garching (Allemagne)

Co-Is: D, Canada, ESA, I, J, USA

8 PEACE

Electrons et courants

PI: A.D. Johnstone

MSSL, Holmbury St Mary (Royaume-Uni)

Co-Is: UK, Chine, F, Inde, N, Russie, USA

9 CIS

Composition ionique

PI: H. Rème

CESR, Toulouse (France)

Co-Is: F, Canada, CH, D, ESA, G, I, S, USA

10 RAPID

Détecteurs imageurs de particules

PI: B. Wilken

MPI Lindau (Allemagne)

Co-Is: D, G, H, IRL, N, S, SF, UK, USA

11 ASPOC

Commande et contrôle du potentiel électrique du satellite

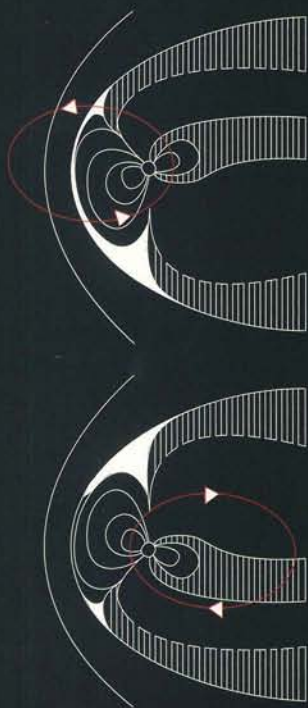
PI: W. Riedler

IWF, Graz (Autriche)

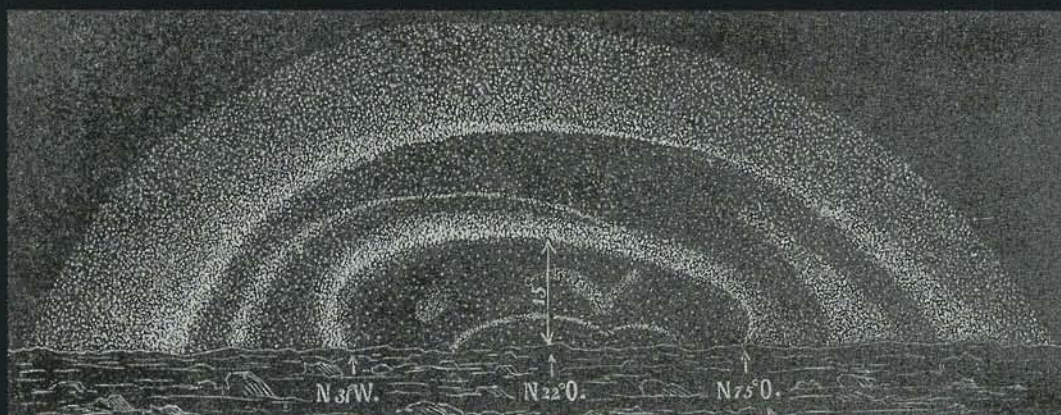
Co-Is: A, ESA, N, USA

PI = chercheur principal

Co-Is = pays des chercheurs associés



L'orbite de Cluster et la magnétosphère. L'orbite passera au-dessus des régions polaires et conduira les satellites à une distance maximale de 140.000 kilomètres, soit onze fois le diamètre de la Terre. Ce point d'éloignement extrême évoluera avec le temps, se trouvant parfois dans le vent solaire, parfois sous le vent solaire, de sorte que Cluster pourra explorer différentes parties de la magnétosphère. L'intervalle entre les quatre satellites variera de quelques centaines de kilomètres à 20.000 kilomètres, selon la tâche qui leur sera assignée.



L'ovale auroral s'étend au-delà de l'horizon. Adolf Erik Nordenskiöld est l'auteur de cette représentation très réaliste d'une aurore boréale, qu'il a dessinée en 1879 alors qu'il se trouvait à bord d'un navire scientifique pris dans les glaces arctiques au large des côtes sibériennes.

Cliché: R. Pellinen (Helsinki) et K. Kaila (Oulu)



Un feu d'artifice naturel. Les aurores polaires se produisent lorsque des faisceaux de particules incidentes atteignent les couches supérieures de l'atmosphère. Les experts ne peuvent toujours pas s'expliquer comment les particules parviennent à rejoindre ainsi l'atmosphère.

Les quatre satellites Cluster, dont deux superposés.



A la recherche des points d'accès

Pour les physiciens, il est plus facile d'expliquer pourquoi le magnétisme terrestre repousse la plupart des particules solaires que de dire comment certaines particules s'infiltrent dans la magnétosphère. Le vent solaire est un gaz magnétique électrisé, ou plasma, et un bon conducteur électrique. Le champ magnétique terrestre donne naissance à des courants qui s'opposent à toute interpénétration entre domaine solaire et domaine terrestre. La magnétopause, écran protecteur de la magnétosphère, marque le point d'équilibre entre la pression exercée par la plasma du vent solaire et la résistance opposée par le magnétisme terrestre. Cet écran repousse le vent solaire et emprisonne le champ magnétique terrestre. Le vent confine le champ magnétique dans la magnétosphère, qui s'arrondit du côté du Soleil et s'étire, telle la queue d'une comète, dans la direction opposée. La magnétosphère présente également des replis, les cornets polaires, au-dessus des pôles magnétiques nord et sud. Pour que ses particules puissent s'infiltrer dans la magnétosphère et former des aurores boréales, le vent solaire doit se frayer un passage à travers la magnétopause. Une fois entrées, les particules solaires trouvent facilement leur chemin jusqu'aux régions aurorales en suivant les lignes de force du champ magnétique, qui convergent aux pôles magnétiques. Les points d'accès peuvent donc se trouver n'importe où. Les théoriciens privilégient à cet égard trois hypothèses. Première hypothèse: les particules peuvent atteindre les zones aurorales en empruntant des raccourcis situés dans les cornets polaires, lesquels seront observés avec un soin particulier par Cluster. Certains pensent qu'un passage s'ouvre aux particules solaires dans chaque cornet polaire, mais il est plus probable que ce passage est fermé.

Dans ce dernier cas, les particules solaires s'y accumulent, telles des passionnés de football venus se presser aux portes d'un stade, attendant qu'une onde électrique ou magnétique les catapulte à travers la barrière magnétique. Deuxième hypothèse: les particules solaires pénètrent par effraction par la porte de derrière. Sous la pression du vent solaire, la queue de la magnétosphère terrestre cède pendant un bref laps de temps. Les particules sont alors catapultées vers la Terre. Les aurores vertes couramment visibles dans le ciel polaire pourraient être alimentées par ce type de particules. Cluster examinera ce scénario d'entrée en détail.

La troisième hypothèse est celle d'une attaque frontale. Sous l'assaut du vent solaire, la magnétopause se déchire de temps à autre du côté exposé au Soleil, laissant entrer des particules solaires. Certains pensent que ce scénario expliquerait la formation des aurores rouges, qui ne sont bien visibles qu'au milieu de l'hiver en raison de leur apparition du côté du Soleil. On peut imaginer qu'une percée frontale se produit lorsque le champ magnétique porté par le vent solaire circule dans le sens opposé au champ magnétique terrestre. Cluster mettra également cette théorie à l'épreuve et inspectera la magnétosphère sous toutes ses coutures, avec pour objectif non seulement de détecter d'éventuelles brèches dans cet écran, mais aussi de mettre en évidence le mécanisme de formation de ces ruptures, de calculer la quantité de particules entrant par chaque point d'accès, et d'évaluer les conséquences de ce phénomène à l'intérieur de la magnétosphère.

Un réseau aux ramifications mondiales

Deux cents chercheurs de dix-sept pays participent directement au projet Cluster. Les responsables des équipes scientifiques recevront les données par liaison informatique et, sans quitter leur laboratoire, ils pourront télécommander leurs instruments via un centre installé au Royaume-Uni pour les opérations scientifiques. Les centres mis en place pour les données dans plusieurs autres pays européens, ainsi qu'aux Etats-Unis et en Chine, recevront les résultats et contribueront à les traiter. Mais le réseau Cluster ne s'arrête pas là.

Cluster s'inscrit dans une campagne de recherches sur le système solaire en cours à l'ESA comprenant également la mission au long cours Ulysse, qui étudie le vent solaire au-dessus des pôles du Soleil, et le projet d'observatoire spatial SOHO. Pendant que Cluster examinera les effets du vent solaire dans les parages de la Terre, SOHO observera les oscillations dont le Soleil est le siège et ses émissions de rayons ultraviolets et de particules énergétiques. Les responsables des missions échangeront leurs résultats et leurs interprétations des phénomènes observés.

La NASA qui participe au côté de l'ESA aux projets Ulysse, Cluster et SOHO, conduit elle aussi des missions analogues qui lui sont propres, parmi lesquelles le satellite de grande longévité IMP-8 et un nouveau véhicule baptisé Wind, qui passe le plus clair de son temps du côté de la Terre exposé au Soleil à observer le vent solaire incident. Du côté opposé, les Japonais ont actuellement en fonctionnement le satellite Geotail, plus éloigné de notre globe que Cluster. Les Russes ont projeté d'envoyer deux paires de satellites étudier la queue et les régions polaires de la magnétosphère dans le cadre de la mission Interball.

Les grandes agences spatiales du globe coordonnent toutes leurs missions dans ce domaine en vue d'un rendement scientifique maximal. Des liaisons ont également été établies avec des réseaux de stations sol, notamment dans l'Arctique et l'Antarctique.

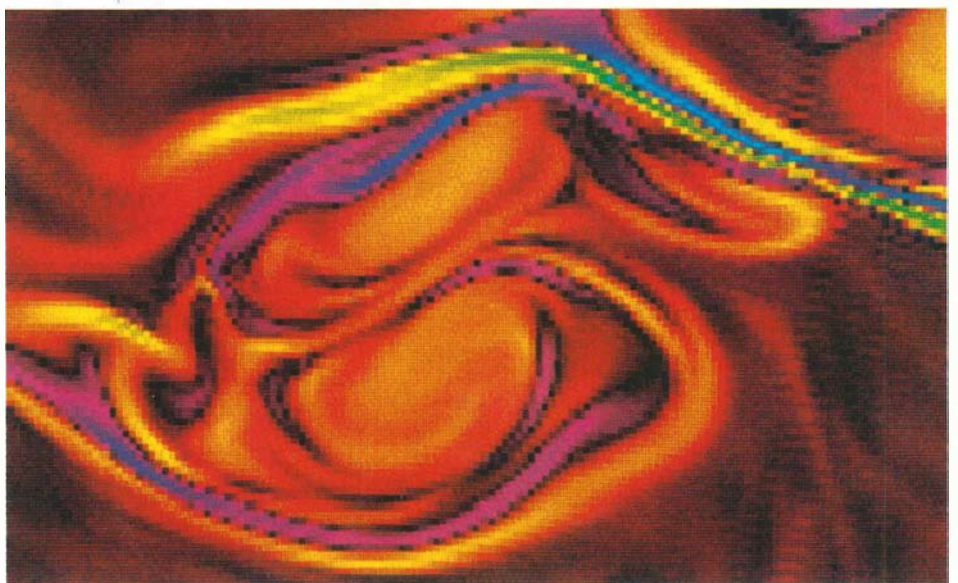
Les chercheurs de Cluster collaboreront avec leurs homologues qui surveillent du sol l'activité magnétique et les phénomènes de la haute atmosphère. Le système EISCAT, par exemple, installé dans le nord de la Scandinavie, observe par radar la haute atmosphère. Bengt Hultqvist, de Kiruna (Suède), nous fait part de son point de vue :

"Ici, en Laponie, nous sommes aux premières loges pour observer les relations Soleil-Terre. Les aurores font partie de notre paysage quotidien. Certains ont cru que nos instruments au sol deviendraient superflus avec l'avènement de l'ère spatiale. Mais nous pouvons observer en continu, alors que les engins spatiaux ne peuvent explorer notre région que par intermittence. Trois fois par semaine dans le cas de Cluster. C'est pourquoi les missions spatiales et les stations sol ont besoin les unes des autres.

"Malgré des années de recherche, avec notamment les satellites Viking et Freja qui ont récemment photographié des aurores depuis l'espace, un certain nombre de questions fondamentales restent encore sans réponse. Nous attendons beaucoup de notre collaboration avec la mission Cluster, dans l'espoir que les données détaillées relevées sous différentes perspectives par une escouade de quatre satellites nous apporteront les réponses dont nous avons besoin."

Circonvolutions du plasma. Voici une simulation par ordinateur de l'environnement électrique auquel Cluster sera exposé à proximité de la Terre. L'ordinateur calcule le tourbillon engendré par les interactions entre un flux de particules électriques et les champs magnétiques qui lui sont associés. Le recours à des super-ordinateurs s'impose pour convertir les données des quatre satellites Cluster en des représentations tridimensionnelles précises et détaillées des événements observés.

Image: M.L. Goldstein
(NASA/GSFC)



Huygens: le plus étrange des mondes

Si vous sautiez en parachute au-dessus de Titan, vous profiteriez d'abord du merveilleux spectacle des anneaux de Saturne, puis vous disparaîtriez dans les brumes orange de ce monde à nul autre pareil. A vos amis curieux de savoir si l'on atterrit sur une piste solide ou si l'on plonge dans un océan d'hydrocarbures, vous enverriez votre dernier message. Car une fois arrivé, vous finiriez soit par mourir de froid, soit - faute d'oxygène - par périr asphyxié dans une atmosphère de raffinerie de pétrole. Mieux vaut faire appel à un robot pour accomplir ce type de mission. Afin d'élucider l'un des derniers grands mystères qui subsistent après l'exploration du système solaire par les engins spatiaux, l'Agence spatiale européenne réalise une sonde automatique qui dévoilera les secrets de Titan, le plus grand satellite de Saturne. Celle-ci fait partie de la mission Cassini/Huygens à destination de Saturne, fruit d'une collaboration entre la NASA et l'ESA.

HUYGENS

Lune énigmatique de Saturne.
L'atmosphère de Titan, photographiée en 1980 par la sonde Voyager 1 de la NASA, est riche en hydrocarbures et bien mystérieuse. La sonde Huygens de l'ESA plongera dans l'atmosphère de Titan et descendra jusqu'à sa surface cachée sous une épaisse couche de brume.
Cliché: NASA/JPL



Huygens: caractéristiques techniques

Objectif

descente dans l'atmosphère de Titan

Agence responsable

ESA; la sonde Huygens fait partie de la mission Cassini de la NASA

Rôle dans le programme Horizon 2000

mission M1 de taille moyenne

Nom

en hommage à l'astronome hollandais Christiaan Huygens, qui découvrit Titan en 1655

Maître d'oeuvre

Aérospatiale, Cannes (France)

Masse

343 kg (+30 kg dans l'orbiteur)

Charge utile scientifique

48 kg, 6 expériences

Diamètre (bouclier)

2,7 mètres

Lancement

6 octobre 1997 (date nominale)

Transport jusqu'à Titan

par l'orbiteur de Saturne de la NASA

Arrivée au-dessus de Titan

27 novembre 2004 (date nominale)

Durée de la descente avec parachute

120-150 minutes

Activité opérationnelle à la surface de Titan

3-30 minutes

Alimentation en énergie

batteries (153 minutes)

Lorsque la sonde Voyager 1 de la NASA survola Titan en 1980, on ne put distinguer sur ses clichés qu'une atmosphère brumeuse orangée et un horizon légèrement bleuté. L'analyse des données recueillies par les instruments permit toutefois de constater la présence d'une atmosphère constituée essentiellement d'azote et riche en composés carbonés. Bien que Titan ne ressemble à aucun autre satellite ou planète du système solaire, peut-être présente-t-il, par certains aspects importants, une analogie avec la Terre avant l'apparition de la vie.

Daniel Gautier, de Paris, qui fit partie de l'équipe de chercheurs de la mission Voyager, se souvient du déclic ressenti au vu des résultats de Voyager 1. "Je me suis tout de suite dit que la prochaine mission devait aller vers Titan. A la suite de discussions approfondies avec des collègues américains et européens, Wing Ip, de Lindau, et moi avons proposé à l'ESA en novembre 1982 de construire la sonde Titan dans le cadre d'une coopération ESA-NASA." Voyager 1 a en outre confirmé la présence de méthane, le plus léger des hydrocarbures. Une véritable énigme pour les chimistes. Le méthane étant en effet transformé en éthane sous l'action impitoyable des rayons du Soleil, Titan doit renouveler son atmosphère. Des théories contradictoires évoquent l'existence d'océans de méthane ou de réservoirs souterrains.

La sonde Huygens de l'ESA devrait permettre de trancher la question. Elle sera embarquée à bord de l'orbiteur de Saturne que fabrique actuellement la NASA avec la participation de l'Italie. Les deux engins réunis dans le cadre de la mission Cassini devraient être lancés en 1997. En 2004, l'orbiteur larguera Huygens au-dessus de Titan et retransmettra à la Terre les données émises par la sonde. Puis, quatre années durant, il observera Saturne, ses anneaux et ses satellites, et survolera Titan une trentaine de fois. Sur l'orbiteur, des scientifiques européens sont responsables à part entière de deux instruments, chargés respectivement de mesurer le magnétisme et d'identifier des poussières, auxquels sont associés des chercheurs américains; des partenaires européens apportent leur concours pour les autres, sous égide américaine. Inversement, deux des expériences de la sonde européenne sont placées sous la responsabilité de chercheurs américains avec la participation de chercheurs européens; toutes les autres, sous égide européenne, font intervenir des chercheurs américains. Il existe également une étroite collaboration en ce qui concerne les opérations scientifiques. C'est ainsi que les informations recueillies in situ par Huygens faciliteront l'interprétation des observations faites à partir de l'orbiteur par cinq instruments de télédétection différents fonctionnant dans le visible, l'ultraviolet et l'infrarouge, et par un instrument radar.

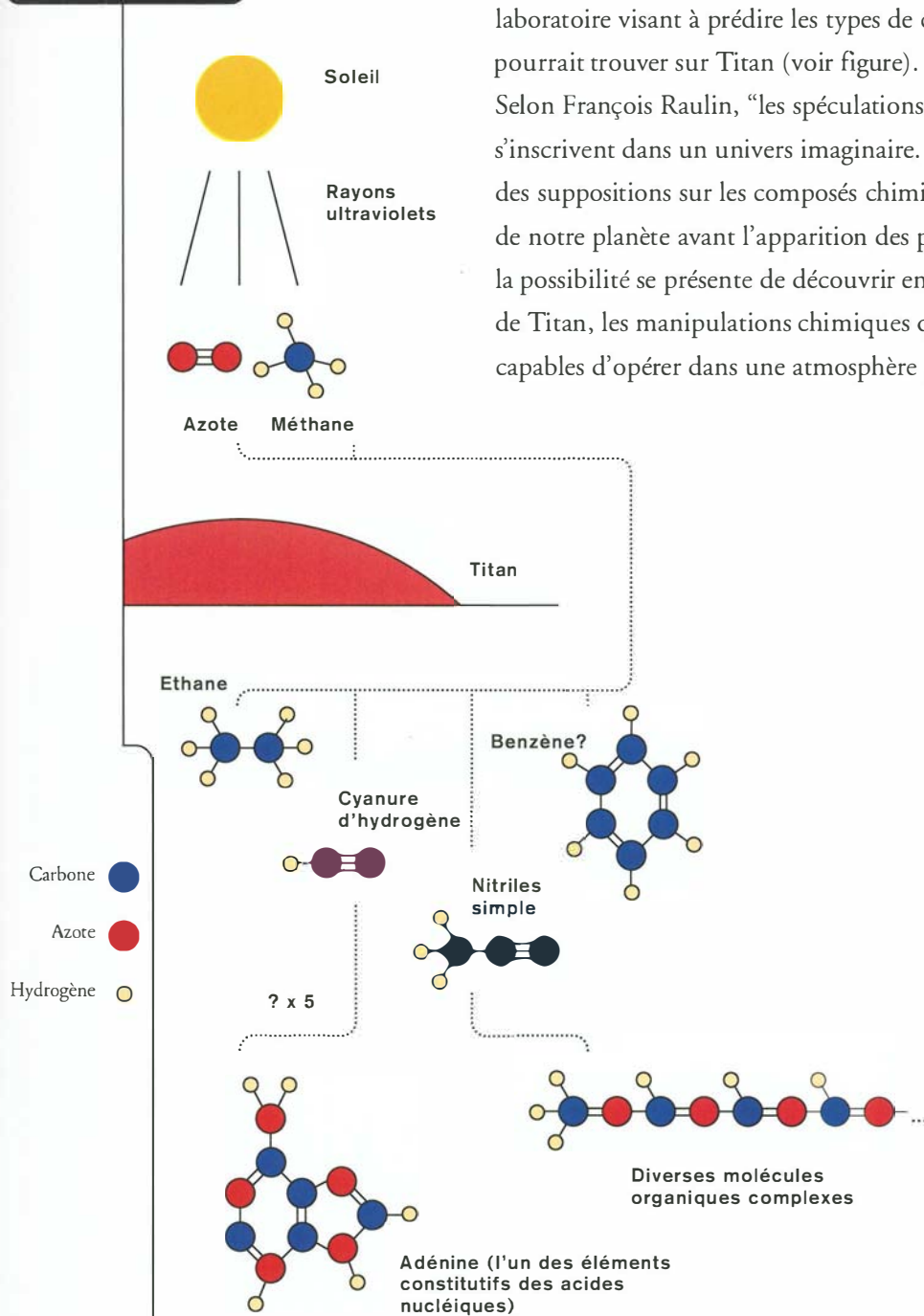
A quoi pouvait bien ressembler la soupe primitive?

L'un des objectifs principaux de la mission Huygens vers Titan est de mettre en évidence les molécules carbonées qui auraient été élaborées par la nature à partir de gaz simples. Titan est bien trop froid pour qu'on y trouve la vie, et l'eau y est rare. Il se pourrait toutefois que l'atmosphère et la surface de ce satellite particulier de Saturne recèlent de nombreuses substances proches de celles qui existaient sur la Terre au début de son histoire, et qu'elles contiennent des résidus de la soupe primitive qui a donné naissance aux premiers organismes vivants.

François Raulin, chercheur parisien chargé de coordonner les études d'exobiologie prévues dans cette mission, a mené des expériences en laboratoire visant à prédire les types de composés carbonés que l'on pourrait trouver sur Titan (voir figure).

Selon François Raulin, "les spéculations sur l'origine de la vie s'inscrivent dans un univers imaginaire. Nous ne pouvons qu'émettre des suppositions sur les composés chimiques qui existaient à la surface de notre planète avant l'apparition des premières bactéries. Aujourd'hui, la possibilité se présente de découvrir enfin dans un univers réel, celui de Titan, les manipulations chimiques que les rayons solaires sont capables d'opérer dans une atmosphère primitive."

La chimie sur Titan



Les queues des comètes pourraient avoir disséminé de telles molécules sur notre planète au moment de sa formation. Mais la lumière ultraviolette du Soleil, les rayons cosmiques et les phénomènes de décharges électriques auraient pu aussi participer à l'élaboration de composés organiques à partir d'éléments simples existant à la surface de la Terre.

La sonde Huygens étudiera les différents aspects de cette "alchimie" sur Titan. Un instrument américain permettra d'identifier les molécules complexes en fonction de leur masse et de leur vitesse de transfert à travers divers filtres, tandis qu'un instrument franco-autrichien prélèvera des particules dans l'atmosphère de Titan et les vaporisera dans un four en vue de leur identification.

Malgré les travaux menés depuis une centaine d'années par d'éminents scientifiques, les théories et les expériences relatives à l'origine de la vie n'ont pas abouti à des conclusions bien solides. Le mystère de la formation d'assemblages auto-suffisants d'acides nucléiques, de protéines et de lipides demeure entier. Les chercheurs sortiront peut-être de cette impasse en identifiant les précurseurs chimiques qui pourraient avoir agrémenté la soupe primitive.

L'étude des comètes (dans le cadre des missions Giotto et Rosetta de l'ESA, par exemple) montre qu'il existe dans l'espace cosmique des molécules carbonées très complexes.

"Les résultats de la mission Huygens relanceront les théories touchant à l'origine de la vie sur Terre", conclut François Raulin. "Peut-être nous conduiront-ils dans des directions inattendues".

Caractéristiques de Titan

Distance Titan-Saturne

1 226 000 km

Période de révolution sidérale (durée d'une journée sur Titan)

15,95 jours

Distance moyenne Titan-Soleil

1 427 000 000 km

(9,54 fois la distance Terre-Soleil)

Diamètre jusqu'à la surface

5150 km (Ganymède 5262 km,

Mercurure 4878 km,

Lune 3476 km)

Diamètre maximal, atmosphère comprise (1 mbar)

5550 km

Masse

1/45ème de la masse terrestre

Densité par rapport à celle de l'eau

1,881

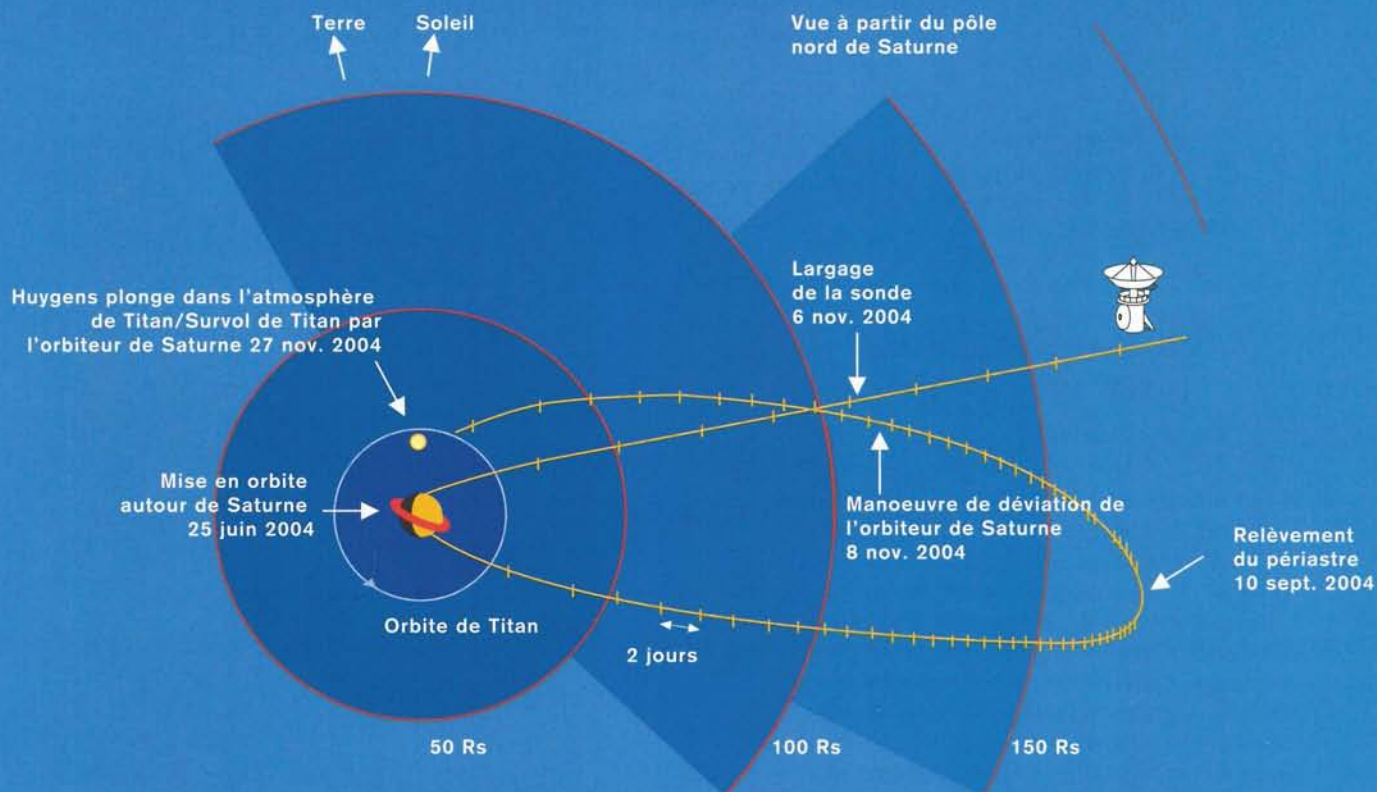
Température à la surface

-179 C (+94K)

Pression atmosphérique à la surface

1500 mbar (1,5 fois la pression

à la surface de la Terre)



Cassini: caractéristiques de la mission et de l'orbiteur

Objectif

explorer le système de Saturne

Agence responsable

NASA

Nom

en hommage à Jean Dominique Cassini, astronome français d'origine italienne qui étudia Saturne entre 1671 et 1685

Masse au lancement de l'ensemble orbiteur de Saturne/Huygens

5,82 tonnes

Charge utile scientifique de l'orbiteur de Saturne

300 kg, 12 expériences

Lanceur

Titan-IV/Centaur (NASA)

Survol de planètes

Vénus, Vénus, Terre, Jupiter

Arrivée dans la banlieue de Saturne

25 juin 2004 (date nominale)

Mission opérationnelle de l'orbiteur autour de Saturne

4 ans

Alimentation en énergie

Générateur à radio-isotope

Cinq mois durant, Cassini - l'orbiteur de Saturne de la NASA - accomplira des manoeuvres délicates à proximité de Saturne en vue de larguer Huygens au-dessus de Titan. L'orbiteur, flanqué de la sonde Huygens comme d'un bouclier, arrivera à destination (à droite) à l'issue d'un périple interplanétaire de sept ans. Il ralentira pour se placer sur une trajectoire de contournement de Saturne, puis changera de cap ("relèvement du périastre") afin d'élargir son orbite et de viser Titan. Après avoir largué Huygens, il changera de direction afin d'éviter Titan et se positionnera de façon à recevoir les données envoyées par la sonde. Une fois la mission Huygens achevée, l'orbiteur explorera pendant quatre ans le système saturnien. Il étudiera Saturne, ses anneaux et ses satellites jusqu'à un degré de détail sans précédent. (L'unité Rs correspond au rayon de Saturne, soit 60 000 km).

Les six expériences embarquées à bord de Huygens sont conçues pour recueillir le plus grand nombre possible de données pendant les 120 à 150 minutes que durera la descente à travers l'atmosphère de Titan et pendant quelques minutes peut-être à la surface.

Les minutes implacables de la phase de pénétration dans l'atmosphère

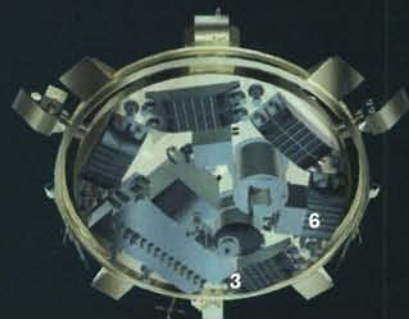
Huygens hibernera durant tout le trajet Terre-Saturne, à l'exception de quelques réveils occasionnels nécessaires pour vérifier ses capacités de fonctionnement. Une fois arrivé dans le voisinage de Saturne, l'orbiteur manœuvrera autour de la planète, larguera Huygens en direction de Titan, puis fera un écart pour recevoir en lieu sûr les signaux de la sonde. Celle-ci continuera à sommeiller pendant un certain temps, puisque son autonomie ne lui permet pas de fonctionner plus de trois heures à plein régime. Un quart d'heure environ avant d'aborder les couches supérieures de l'atmosphère de Titan, la sonde sera réveillée. A partir de là, il lui faudra prendre en main la direction des opérations, la Terre étant trop éloignée pour l'échange de signaux et l'envoi de télécommandes.

Plongeant à l'allure fantastique de 20 000 km à l'heure, la sonde subira un premier ralentissement lorsqu'elle se trouvera encore à plus de 1000 km au-dessus de la surface de Titan. A partir des mesures de décélération enregistrées pendant cette phase d'entrée, les chercheurs calculeront les variations de densité des couches externes de l'atmosphère de Titan. A une altitude d'environ 300 km, lorsque la décélération sera à son maximum (estimé à 16 g), les structures et les articulations de la sonde seront toutes mises à rude épreuve. Avec sa carapace solide et son intérieur délicat, Huygens s'apparente à un coquillage. La coquille freinera l'engin et assurera la protection thermique indispensable pour résister à des gaz dont la température atteindra les 12 000 degrés. En l'espace de trois minutes implacables, Huygens descendra à 180 km d'altitude et verra sa vitesse réduite à 1400 km à l'heure. Les commandes automatiques de la sonde déclencheront ensuite l'ouverture d'un premier parachute auquel il appartiendra de déployer le parachute principal. En l'espace d'une minute, la vitesse de l'engin tombera à moins de 300 km à l'heure. A environ 160 km d'altitude, la coquille se détachera et les instruments scientifiques seront directement exposés à l'atmosphère de Titan dont la température pourrait avoisiner -120°C. Les 300 watts alimentant le cerveau, les détecteurs et les émetteurs de la sonde lui permettront de mieux lutter contre le froid insidieux. Mais il lui faudra atteindre la surface du satellite avant l'épuisement de ses batteries. Le parachute principal ayant servi à ralentir la sonde à haute altitude sera détaché au bout de quinze minutes et remplacé par un plus petit. A ce moment, la sonde se trouvera à 120 km de la surface. Pendant les deux heures, plus ou moins quinze minutes, que durera le reste de la descente, les instruments exécuteront toute une série d'observations, programmées en fonction de l'altitude que mesurera un altimètre radar.

Instruments scientifiques



La sonde vue d'en haut



La sonde vue d'en bas



Coque protectrice. Le bouclier, à l'avant de la sonde Huygens, est revêtu de tuiles de protection thermique. Il assure le freinage de la sonde et protège le module intérieur de l'échauffement pendant la phase d'entrée dans l'atmosphère de Titan. Un peu plus tard, la sonde éjectera ce bouclier ainsi que le capot arrière de façon à exposer directement les instruments à l'atmosphère (sur ce cliché, on peut distinguer le module de descente à l'intérieur de la coque).
Photo: DASA (Allemagne)

1 HASI

Profil physique de l'atmosphère de Titan

PI: M. Fulchignoni

Univ. de Rome, Italie

Co-Is: I, A, D, E, ESA/SSD, F, N, SF, USA, UK

2 GCMS

Profil chimique de l'atmosphère de Titan

PI: H.B. Niemann

NASA/GSFC, Etats-Unis

Co-Is: USA, A, F

3 ACP

Collecteur d'aérosols et four à pyrolyse

PI: G.M. Israel

Service d'aéronomie

Verrières-le-Buisson (France)

Co-Is: F, A

4 DISR

Imagerie et analyse spectrale

PI: M.G. Tomasko

Univ. Arizona, Tucson (Etats-Unis)

Co-Is: USA, D, F

5 DWE

Vents à circulation zonale

(observation à partir de l'orbiteur de Saturne)

PI: M.K. Bird

Univ. de Bonn (Allemagne)

Co-Is: D, I, USA

6 SSP

Etat et composition de la surface de Titan

PI: J.C. Zarnecki

Univ. de Kent

Canterbury, Royaume-Uni

Co-Is: UK, ESA/SSD, I, USA

PI = chercheur principal

Co-Is = pays des chercheurs associés

“Les études de météorologie planétaire reposent, pour la plupart, sur la prise d'images et autres méthodes de télédétection”, nous déclare Marcello Fulchignoni, de Rome. “Huygens nous offre une occasion exceptionnelle d'observer en direct le temps qu'il fait dans un autre monde et nous devons nous attendre à des surprises.” Grâce à des ailettes fixées sur son rebord, la sonde tournera sur elle-même au cours de sa descente, ce qui permettra aux instruments imageurs d'une expérience sous égide américaine d'explorer toute la scène environnante. Ils ne verront peut-être pas grand chose dans un premier temps, lorsque le sonde évoluera dans les brumes orangées qui donnent à Titan son aspect lugubre. En revanche, le Soleil sera clairement visible; la lumière jaune et infrarouge détectée dans son halo livrera des informations sur la taille et l'abondance des particules formant ce brouillard. Les spectromètres travaillant dans le visible et l'infrarouge mesureront les flux thermiques circulant du Soleil vers Titan ou de Titan vers l'espace. Les molécules et atomes seront triés et comptés en fonction de leur masse par un analyseur chimique américain, dans un spectromètre de masse. Ce travail sera complété par des chromatographes en phase gazeuse, qui classeront les molécules en fonction du temps qu'il leur faudra pour traverser des colonnes de matière adsorbante. Les molécules d'azote (masse moléculaire: 28) occuperont la position dominante, le méthane (masse moléculaire: 16) étant, à raison d'un faible pourcentage, le principal composant présent à l'état de vapeur. Mais de nombreuses autres substances pourront aussi être détectées, même à l'état de traces.

Les atomes d'argon primitif, de masse 36 et 38, permettront de remonter à l'origine de l'atmosphère de Titan. Pour l'argon, on devrait obtenir un comptage élevé si cet élément est issu d'objets glacés de type cométaire ayant contribué à la formation du satellite de Saturne. Ce résultat conforterait les théories selon lesquelles l'azote atmosphérique et l'eau auraient fait leur apparition sur notre planète à la suite de collisions avec des comètes. Une faible abondance d'argon s'accorderait avec un autre scénario, selon lequel Titan se serait formé à partir de glaces riches en méthane et en ammoniac provenant d'un nuage dans les parages de Saturne.

Les chimistes s'attendent à trouver des substances beaucoup plus complexes, pouvant atteindre une masse de 146 aux limites des capacités du spectromètre de masse. Les grandes molécules nous diront jusqu'à quel point les éléments chimiques inertes de Titan ont évolué pour donner naissance à des substances qui, dans d'autres conditions, participeraient à l'apparition de la vie. Nombre d'entre elles pourraient être détectées, dérivant dans l'espace depuis les pourtours bleutés de l'atmosphère de Titan, à 200-500 km. On les retrouvera dans les particules d'aérosols recueillies par un instrument de conception franco-autrichienne. A 45 km d'altitude, ce collecteur d'aérosols procèdera au traitement d'une première récolte. Le filtre se rétractera dans un four où les particules seront chauffées par étapes jusqu'à une température de 650° C. Les produits de chaque étape de chauffage seront analysés par un spectromètre de masse et par un chromatographe en phase gazeuse spécial.

Météorologie et chimie dans les brumes de Titan

La sonde devrait dériver sous l'effet de vents soufflant à 250 kilomètres à l'heure. Ces vents faibliront au cours de la descente. Un système radio allemand en calculera la vitesse à partir de la dérive de fréquence des signaux reçus par l'orbiteur, toujours aux aguets. A mesure que la sonde s'approchera, dans sa course oblique, de la surface encore invisible de Titan, l'altimètre radar devrait commencer à indiquer si cette surface est lisse ou rugueuse. Des données météorologiques détaillées seront communiquées par les instruments atmosphériques, réalisés par une équipe internationale sous la responsabilité de l'Italie. Outre les mesures des accéléromètres, la sonde transmettra jusqu'à son atterrissage des relevés de température et de pression. D'autres instruments mesureront les propriétés électriques de l'atmosphère et enregistreront les impulsions radio provenant d'éventuelles décharges électriques. Un microphone restera à l'affût de coups de tonnerre.

Huygens dans l'atmosphère de Titan. Deux autres parachutes (pilote et parachute principal) contribueront à ralentir la sonde au début de la phase de descente. Le parachute illustré ci-contre limitera la vitesse de la sonde pendant la majeure partie de la descente et la stabilisera afin qu'elle puisse procéder aux observations scientifiques.



Plongée dans l'inconnu

La température de l'atmosphère de Titan passera de -120°C à peut-être -200°C , véritable bain glacial pour Huygens. A la limite inférieure de la stratosphère, qui pourrait se situer à 50 kilomètres d'altitude, la température devrait légèrement remonter. Il est alors possible que les brumes se dissipent et que les imageurs aperçoivent pour la première fois la surface de Titan, entre les sommets de nuages cotonneux.

Parallèles et divergences entre le climat de la Terre et celui de Titan seront un sujet d'étude fascinant pour les météorologues, dans un monde où les nuages et les gouttes de pluie sont faits de méthane et d'azote. Profitant de la rotation de la sonde, les imageurs prendront des photos panoramiques des nuages et du paysage qui défileront sous celle-ci.

Imaginons cette plongée dans l'inconnu et l'aventure. La sonde rencontrera-t-elle un océan de méthane et d'éthane d'où émergent peut-être ici et là des icebergs de composition organique aux couleurs étranges? Un paysage aride ponctué de geysers de méthane jaillissant de gisements souterrains? Des volcans crachant de l'eau et de l'ammoniac? Sur les cinq cents derniers mètres de la descente, un phare d'atterrissage s'allumera pour faciliter aux spectrographes la détection de méthane à la surface de Titan. Un sondeur acoustique tendra l'oreille.

Imaginons encore que la sonde - dont la vitesse sera passée à environ 20 kilomètres à l'heure - effectue un atterrissage ou un amerrissage en douceur sur Titan et que ses instruments radar et imageurs ou ses analyseurs chimiques restent opérationnels. Un ensemble d'instruments scientifiques spécialisés, réalisés sous maîtrise d'œuvre britannique, entrera en action pendant les toutes dernières minutes de la mission. Si la sonde se pose sur une surface sèche, un pénétromètre en vérifiera la dureté et un inclinomètre établira si le sol est localement plat ou incliné.

Si la sonde se retrouve en milieu liquide, l'inclinomètre pourra détecter la présence de vagues. Le sondeur acoustique jaugera la profondeur de l'océan ou du lac, tandis que d'autres instruments mesureront sa densité et la vitesse de propagation du son et de la lumière dans le liquide. Le rapport méthane/éthane, déduit de la densité du milieu, donnera une indication approximative de l'époque à laquelle le processus de transformation du méthane en éthane a commencé sur Titan. Peut-être aidera-t-il les chercheurs à élucider la question de savoir si l'océan a vu le jour en même temps que Titan ou s'il s'est formé plus tard.

La sonde survivra-t-elle trois minutes, une demi-heure, ou plus longtemps à la surface de Titan? Cela dépendra de sa résistance au froid et au choc de l'atterrissage. Et, quoi qu'il en soit, elle rendra son dernier soupir dès l'épuisement de ses batteries, premier témoignage d'une activité humaine sur Titan, premier véhicule spatial européen à se poser dans un autre monde.

Depuis son poste de surveillance dans l'espace, l'orbiteur recueillera les derniers signaux émis par Huygens, puis s'éloignera au-delà de l'horizon. Grâce à son antenne pointée vers la Terre, il transmettra les messages qui lui auront été communiqués par l'ensemble des instruments de la sonde. Après une longue attente, les chercheurs pourront enfin voir se dissiper l'épais mystère qui entourait Titan.

Rosetta: valse avec une comète

Pendant des milliers d'années, l'homme observa avec un respect mêlé de crainte l'apparition de ces astres dessinant leur longue traîne de lumière sur le ciel étoilé. Aujourd'hui, on sait que le noyau d'une comète ne dépasse pas quelques kilomètres de largeur et que la féerie du spectacle vient des poussières et des gaz libérés dans l'espace par ce noyau.

Les comètes fascinent les scientifiques parce qu'elles sont le réceptacle de substances qui se trouvaient dans l'espace interstellaire à la naissance du système solaire. Celles que l'on observe aujourd'hui ont servi de matériau de construction dans la formation des planètes et ont participé, sans que l'on puisse dire exactement comment, à l'apparition de la vie sur Terre. Les impacts observés sur Jupiter en 1994 confirment que les collisions cométaires sont toujours une réalité du système solaire. La mission internationale Rosetta, prochaine mission cométaire de l'Agence spatiale européenne, tire son nom de la pierre de Rosette qui permit de déchiffrer les hiéroglyphes de l'Égypte ancienne..

ROSETTA

Apparition fugitive d'un noyau cométaire. Le meilleur cliché que l'on ait obtenu jusqu'à présent d'une comète et de ses jets de gaz et de poussières (vus de près, du côté exposé au Soleil) a été pris par la sonde Giotto de l'ESA, qui traversa à vive allure la chevelure de poussières de la comète de Halley. Rosetta, pour sa part, aura tout le loisir de prendre des clichés plus détaillés d'une autre comète qu'elle accompagnera dans son périple spatial.



Cliché: MPI für Aeronomie (Lindau) et ESA

Grâce au décodage des messages véhiculés par les atomes et les molécules, la sonde Rosetta contribuera à lever le voile du mystère de nos origines cosmiques. Accompagnant dans sa course le noyau d'une comète lorsque celle-ci passera, comme cela lui arrive périodiquement, au voisinage du Soleil, elle dressera une carte détaillée de la surface de la comète, sur laquelle elle larguera des instruments. Pendant les nombreux mois que durera ce pas de valse, Rosetta observera les éruptions de surface déclenchées sous l'effet de la chaleur solaire. Les instruments embarqués à bord de la sonde se chargeront d'analyser les émissions de poussières et de gaz. Malgré la date encore éloignée de cette rencontre, prévue aux alentours de 2013, le compte à rebours a déjà commencé pour la mission internationale Rosetta. L'ESA choisira les instruments scientifiques de la mission en 1996, parmi différentes propositions concurrentes présentées par des équipes multinationales. Les lauréats devront ensuite les perfectionner et les soumettre à des essais rigoureux avant de les incorporer dans la sonde, dont le lancement aura lieu en 2003.

De quoi les planètes sont-elles faites?

Rosetta: caractéristiques techniques

Objectif

rencontrer et observer une comète

Agence responsable

ESA; réalisation des sondes: CNES, NASA et un consortium mené par l'Allemagne

Rôle dans le programme Horizon 2000

3ème pierre angulaire

Nom

de l'anglais "Rosetta Stone" (pierre de Rosette)

Masse

1,3 tonne, plus 1,4 tonne d'ergols

Charge utile scientifique

environ 100 kg, plus deux sondes de 45 kg chacune

Dimensions max. (panneaux solaires exclus)

3 mètres

Lanceur

Ariane 5

Lancement

22 janvier 2003 (date nominale)

Survol de planètes

Mars, Terre, Terre

Rencontre de la comète

28 août 2011 (date nominale)

Clôture de la mission

21 octobre 2013 (date nominale)

Durée des observations actives

18 mois

Alimentation en énergie

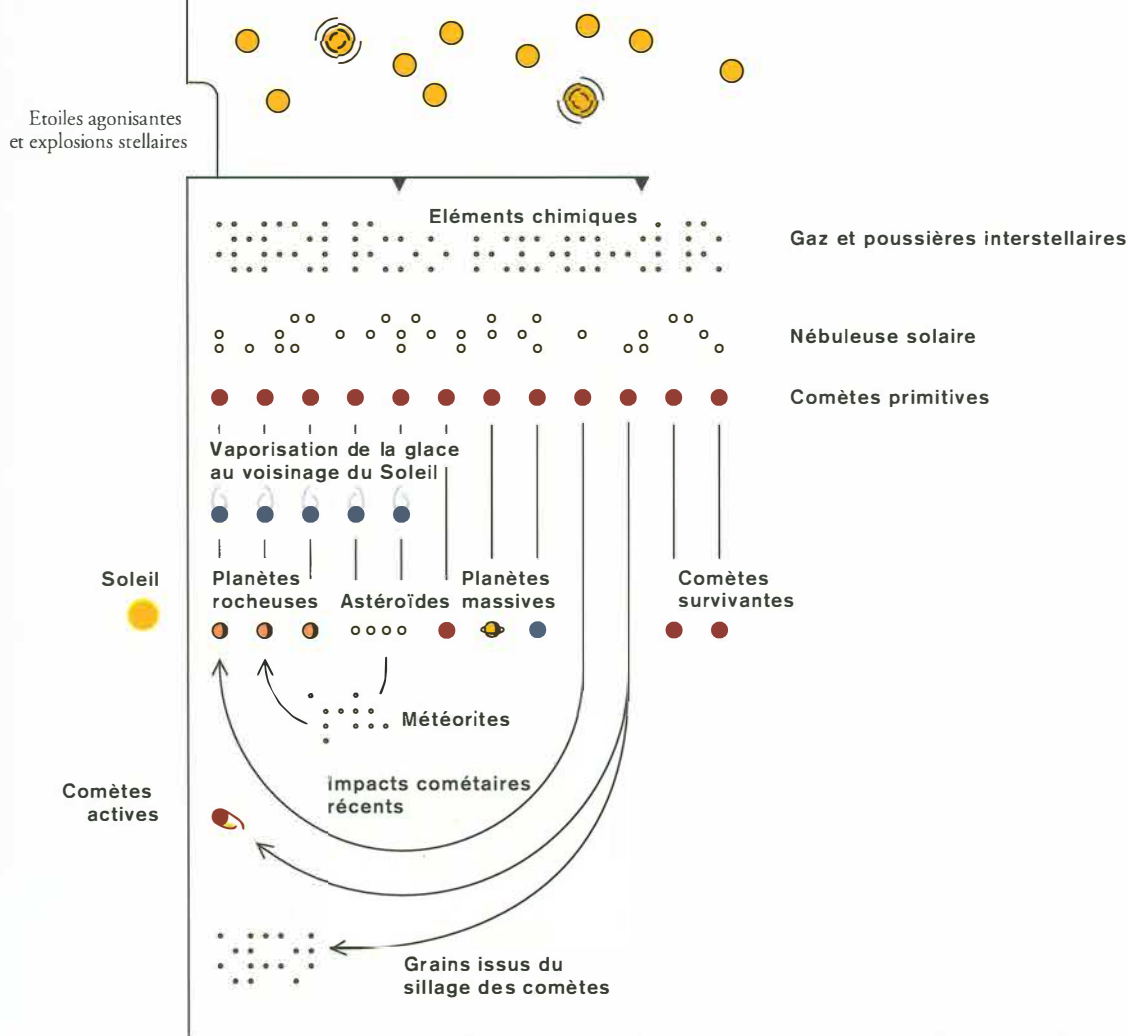
panneaux solaires (et batteries pour les sondes de surface)

La Terre et les autres planètes sont nées, voici 4600 millions d'années, de la nébuleuse dans laquelle baignait le Soleil au moment de sa formation. Aujourd'hui, toutefois, les matériaux de construction d'origine sont méconnaissables. Les ingrédients primitifs ont été broyés par la gravitation, cuits par la chaleur et restructurés sous l'action de processus chimiques, géologiques et biologiques.

Il existe cependant une exception notable: les comètes. Ces petits objets froids ont conservé la matière première sous sa forme quasiment originelle. On suppose qu'elles sont nées de l'effondrement du nuage de gaz et de poussières interstellaires qu'était la nébuleuse solaire. La plupart d'entre elles ont servi de matériau de construction lors de la formation des planètes et ont donc disparu.

Les comètes que l'on peut voir à l'heure actuelle sont des survivantes d'une époque ancienne qui ne se sont aventurées que récemment dans des régions voisines du Soleil où la glace cométaire se sublime en éjectant dans l'espace des poussières de roches et de matière carbonée. Le même phénomène a dû se produire pour les comètes beaucoup plus nombreuses qui foisonnaient autour du Soleil au début de son existence.

Histoire des comètes

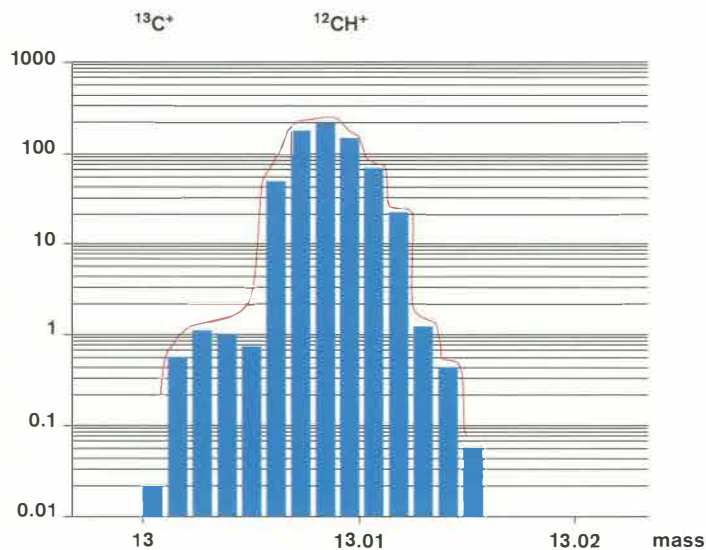


Est-ce la perte de glace qui explique la petite taille et la composition minérale des planètes, des astéroïdes et des météorites proches du Soleil? Les planètes extérieures, beaucoup plus grandes, se sont-elles formées à partir de noyaux de glace? Les océans et l'atmosphère terrestres sont-ils apparus plus tard, après de nouveaux impacts cométaires? Les substances nécessaires à l'apparition de la vie sont-elles venues sous la forme d'une pluie bienfaisante de poussières riches en carbone issues des queues cométaires? Autant de questions auxquelles les chercheurs tenteront de répondre grâce aux analyses que la mission internationale Rosetta leur fournira sur la composition d'une comète, avec une abondance de détails sans précédent.

A bord de Rosetta se trouvera également une microsonde destinée à analyser les grains de poussière les plus petits, à la recherche d'indications sur nos origines cosmiques, au début du processus illustré dans la figure. Certains grains sont restés intacts depuis qu'ils se sont formés à proximité d'étoiles en voie d'extinction, bien avant la naissance du Soleil et des planètes. La microsonde détectera dans ces grains des signatures atomiques, permettant de différencier une étoile ancestrale d'une autre. Peut-être se compteront-elles par centaines.

Analyse des poussières cométaires.
Cet analyseur de matière cométaire (en bas), mis au point en Allemagne pour une mission cométaire américano-allemande qui ne se concrétisa pas, pourrait être adapté à Rosetta. Il servira à identifier, en fonction de leur masse moléculaire, les éléments chimiques constitutifs des grains de poussière de la comète. Comme on peut le voir sur cette simulation (à droite) d'un spectre de masse, un instrument optimisé permettrait de distinguer deux éléments ayant des masses quasiment identiques.

Cliché: J. Kissel (MPK Heidelberg)



L'héritage de Giotto

Aujourd'hui, les chercheurs européens constatent, non sans surprise, qu'ils occupent la première place au niveau mondial dans l'un des domaines les plus passionnants et les plus exigeants de l'exploration de l'espace lointain. Leurs collègues américains avaient cru par deux fois obtenir de la NASA une grande mission cométaire. Par deux fois leur attente fut déçue: L'ESA reprit alors le flambeau pour le compte des scientifiques. Rosetta succède à Giotto, cette vaillante petite sonde automatique de l'ESA qui brava les tempêtes de poussières de la plus célèbre des comètes. C'est en 1986, en compagnie de deux sondes soviétiques et de deux sondes japonaises, que Giotto intercepta en effet la comète de Halley. Guidée par les observations des sondes soviétiques Vega, elle plongea au plus profond des poussières de la chevelure de la comète qu'elle frôla à 600 kilomètres à peine de son noyau. Etant donné la vitesse élevée des masses en présence, Giotto fut endommagée par les grains de poussière. Sa caméra perdit la vue, non sans avoir auparavant photographié le noyau de la comète. Les clichés ont montré que Halley, cette cacahuète sombre de 15 kilomètres de longueur, émet dans l'espace des jets de vapeur et de poussières dont l'origine est localisée à quelques petits sites actifs.

Les analyseurs chimiques de Giotto et des sondes Vega envoyèrent des données sur les gaz et les poussières rencontrés, montrant qu'une comète se compose essentiellement de grains rocheux, de composés carbonés, ainsi que de glaces d'eau et de monoxyde de carbone. Cela donne une structure friable, comparable à celle d'une meringue. Sous l'effet de la chaleur régnant dans les régions internes du système solaire, la glace de surface se sublime en libérant dans l'espace les particules de poussière.

En 1992, grâce à une prouesse de pilotage qui n'était pas prévue à l'origine, Giotto passa à 200 kilomètres du noyau d'une deuxième comète, Grigg-Skjellerup. Ses instruments d'étude du plasma analysèrent en détail l'interaction des particules du vent solaire avec l'atmosphère de la comète et constatèrent des différences avec les turbulences plus marquées décelées à proximité de la comète de Halley. Le nuage de poussières de la comète était visible dans le domaine optique, mais les détecteurs ne décomptèrent qu'un nombre limité d'impacts de particules. La comète Grigg-Skjellerup, plus petite et beaucoup moins active que celle de Halley, est le type de cible qui pourrait être retenue pour la mission Rosetta. Wirtanen et les autres comètes candidates évoluent sur des orbites relativement serrées, qui les conduisent environ tous les six ans dans le voisinage du Soleil. Ces fréquentes expositions à la chaleur solaire ont entraîné la disparition quasi totale de la glace située à proximité de la surface qui est à l'origine des émissions.

En tant que troisième mission "pierre angulaire" du programme Horizon 2000 de l'ESA, Rosetta était conçue à l'origine pour prélever des échantillons de comètes et les rapporter sur Terre en vue de leur analyse. Il s'agissait pour les ingénieurs d'une entreprise risquée, qui nécessitait en outre une contribution majeure de la NASA. L'annulation de la mission germano-américaine CRAF en 1992 vint modifier la scène internationale dans le domaine de la science cométaire. Les conseillers scientifiques de l'ESA repensèrent donc le projet Rosetta pour en faire une mission principalement européenne. Renonçant à rapporter des échantillons sur Terre, ils demandèrent à la place une mission du type CRAF dans laquelle serait mis en oeuvre pendant plusieurs mois un laboratoire d'analyse bien équipé navigant à proximité de la comète. Les expériences conçues pour CRAF fournirent un point de départ pour la planification de Rosetta.

"Les instruments d'étude de la chimie spatiale ne cessent de s'améliorer", déclare Jochen Kissel, de Heidelberg, dont les sondes Giotto et Vega emportèrent des expériences clés en vue de leur rendez-vous de 1986 avec la comète de Halley. "Rosetta observera des molécules cométaires relativement intactes compte tenu de la vitesse réduite du véhicule et de la proximité de la comète. Il faudra néanmoins interpréter les résultats avec prudence et en conduisant parallèlement des expériences en laboratoire."

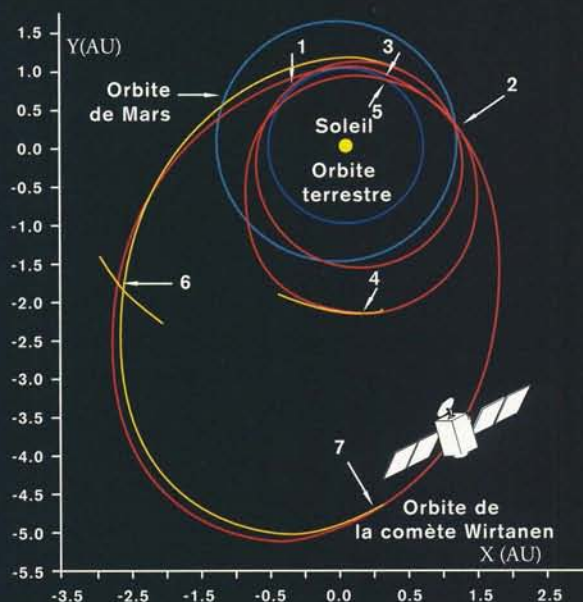
Une longue attente

L'exécution de la mission Rosetta s'annonce éprouvante, non pas tant du fait d'une charge de travail écrasante, que l'on retrouve dans d'autres missions, qu'à cause de la patience dont il faudra faire preuve. Après son lancement par Ariane 5, fixé en janvier 2003, Rosetta survolera des planètes qui lui serviront de tremplin gravitationnel pour se propulser sur une orbite proche de celle de la comète, seule façon pour la sonde de rejoindre celle-ci à vitesse relative réduite. Il faudra ensuite attendre encore neuf ans avant de pouvoir procéder à des observations utiles. Certains chercheurs connaîtront un répit dans cette longue attente lorsque la sonde traversera la ceinture d'astéroïdes située au-delà de la planète Mars. Cette ceinture se compose de fragments, grands et petits, d'une planète avortée qui gravitent autour du Soleil. Rosetta ira probablement examiner de près deux astéroïdes. Ses cibles potentielles s'appellent Mimistrobell et Shipka. L'objectif sera d'élargir les connaissances sur les différents types d'astéroïdes, compte tenu de l'observation antérieure d'objets divers par les Américains.

La campagne d'observation des astéroïdes servira de répétition générale pour les instruments de télédétection de Rosetta. A 1000 kilomètres de distance, une caméra pourra distinguer des détails de 15 mètres à la surface de l'objet. Un spectromètre à balayage diffractera la lumière incidente dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge, cherchant la signature de différents éléments minéraux dont il cartographiera la distribution par zones d'environ 500 mètres.

Après avoir survolé les planètes et rencontré les astéroïdes, Rosetta se trouvera sur une orbite similaire à celle de sa cible et entrera en hibernation pour une durée d'environ trois ans. Elle s'éloignera du Soleil et cessera de communiquer avec la Terre jusqu'à ce que le centre de contrôle de la mission la réveille pour son rendez-vous cométaire.

Lorsqu'elle se trouvera à une centaine de kilomètres de son but, Rosetta subira l'attraction du faible champ gravitationnel de la comète autour de laquelle elle se mettra à graviter. Puis, à mesure que sonde et comète réunies s'approcheront du Soleil, le centre de contrôle de la mission modifiera autant que de besoin l'orbite de cette sonde peu pressée.



- 1 Lancement
- 2 Manoeuvre de gravicélération autour de Mars
- 3 Manoeuvre de gravicélération autour de la Terre
- 4 Survol de l'astéroïde Mimistrobell
- 5 Deuxième manoeuvre de gravicélération autour de la Terre
- 6 Survol de l'astéroïde Shipka
- 7 Rencontre de la comète

Rendez-vous avec la comète Wirtanen. Rosetta (orbite en rouge) fera appel à l'assistance gravitationnelle des planètes pour rejoindre l'orbite de sa cible (en jaune). Comme le montre la figure ci-dessus, Rosetta sera lancé au début de 2003 et rencontrera la comète Wirtanen en 2011, après avoir croisé deux astéroïdes. Rosetta accompagnera pendant deux ans la comète dans son périple cosmique. La mission prendra fin lorsque la comète passera au plus près du Soleil, en octobre 2013, soit presque onze ans après le lancement du satellite.



Ce que pourraient être les grains cométaires. A petite échelle, la matière constitutive des comètes pourrait se présenter comme dans le modèle ci-dessus. Des grains longs d'environ 1 millièmètre de millièmètre seraient faits d'un coeur minéral enrobé de matériau riche en carbone (en orangé). Des grains beaucoup plus petits (en noir) seraient pris dans leur revêtement de glace. Une structure lâche laisserait des interstices entre les grains les plus gros.

Cliché: J.M. Greenberg (Leyde)

Instruments scientifiques

RIS

Système d'imagerie à distance
Aspect et activité de surface,
caméra à champs large et étroit

VIMS

Instrument de cartographie thermique
et de spectrographie
visible et infrarouge
Composition et température de surface

GIMS

Spectromètre de masse pour
l'analyse des gaz et des ions
Composition des gaz neutres et ionisés
de la comète

COMA

Analyseur de matière cométaire
Composition des grains de poussière
de la comète

SEMPA

Microsonde à balayage électronique
et analyseur de particules
Composition chimique et structure
physique des grains de poussière

DA

Instrument permettant d'analyser
le taux de production des poussières
et leur vitesse

PP

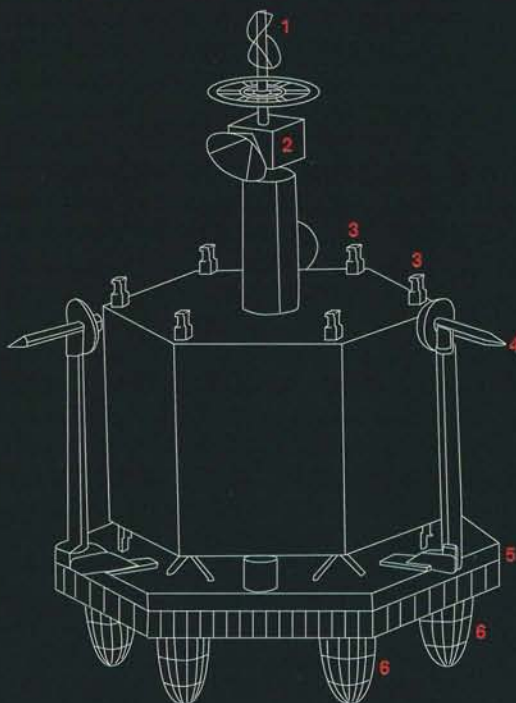
Ensemble d'instruments pour l'étude
du plasma Interactions entre le vent
solaire et la comète
(objectif secondaire)

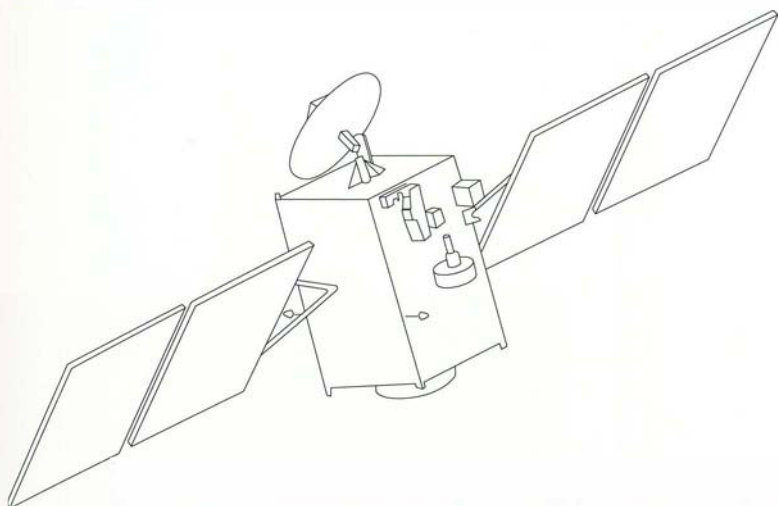
SP

Sondes de surface
Instruments appelés à se poser
à la surface de la comète

- 1 Antenne
- 2 Caméra
- 3 Propulseurs de maintien en place
- 4 Ancrage
- 6 Pieds et structure alvéolée déformables

Concept préliminaire d'un module cométaire de surface. Largué par Rosetta sur la comète, de petits propulseurs l'empêchent de rebondir en raison de la faible gravité et le plaquent au sol, dans lequel le module s'ancre ensuite. Pendant que la caméra balaie la surface, un instrument prélève des échantillons qui sont ensuite analysés. Les opérations pourraient durer jusqu'à 84 heures. Cette contribution possible à la mission Rosetta est proposée par le CNES (France) et le JPL/NASA (Etats-Unis), sous le nom de Champollion, le Français qui déchiffra la pierre de Rosette au début du XIXe siècle.





Le programme des découvertes

Le premier travail de la mission internationale Rosetta sera de dresser une carte de la comète à l'état inactif. Les clichés en plan rapproché, sur lesquels on pourra distinguer des détails de l'ordre du mètre, seront localisés avec précision sur une carte générale de la comète photographiée au grand angulaire. Le spectromètre à balayage pourrait détecter la présence en certains endroits de glaces ou de composés organiques.

L'équipe scientifique recherchera des régions potentiellement actives analogues à celles que Giotto observa sur la comète de Halley et les inspectera de plus près pour vérifier si elles se prêtent à l'atterrissage des deux sondes de surface. Larguées d'une altitude d'environ un kilomètre, ces deux sondes subiront, en raison de la faiblesse du champ de pesanteur, un impact analogue à celui qui résulterait d'une chute de quelques centimètres sur Terre.

"Il est probable que la réalisation des instruments installés sur les modules de surface sera entièrement prise en charge par un institut ou par une agence spatiale", nous signale Gerhard Schwehm, qui s'occupe de ce projet à l'ESA. "Nous ne sommes donc pas trop explicites à ce stade; nous pouvons seulement dire que la masse totale de chaque module ne devra pas dépasser les 45 kg." Cette masse de 45 kg permettrait, selon un projet franco-américain baptisé Champollion, de déposer à la surface de la comète une sorte de perceuse qui irait chercher, à une profondeur de 20 cm environ, de la matière "fraîche" n'ayant pas subi d'exposition au rayonnement solaire. Un dispositif automatisé transférerait les échantillons prélevés dans une série d'analyseurs. Un autre module de surface est proposé par le consortium RoLand sous égide allemande. Bien qu'on puisse concevoir de nombreux instruments pour explorer la nature physique de la comète, la priorité sera très vraisemblablement donnée aux analyses chimiques, aussi bien pour les modules de surface que pour le satellite Rosetta.

Il est possible que la sonde puisse déjà détecter, au moment du largage des modules, de faibles émissions de gaz et de poussières en provenance de la comète. Ses instruments entameront alors le programme d'observation principal, tandis que les émissions iront se multipliant plus d'un milliard de fois sur les mois qui suivront.

Première esquisse de Rosetta. Le véhicule ressemblera peut-être à un satellite de télécommunications.

L'antenne parabolique que l'on peut voir sur ce cliché assure la liaison radio avec la Terre à travers l'espace interplanétaire. Les instruments scientifiques et les sondes de surface pourront être installés de l'autre côté du compartiment central.

La caméra et le spectrographe de télédétection guetteront tout changement susceptible de se produire à la surface de la comète. Les grains de poussière rencontrés par la sonde seront enregistrés par un détecteur lors de leur passage dans des faisceaux lumineux. Pour éviter l'accumulation excessive d'impuretés sur la sonde et ses instruments, le centre de contrôle pourra commander à Rosetta de s'éloigner vers les couches externes de la chevelure de poussières lorsque la comète s'approchera du Soleil en 2013.

Les premières analyses chimiques consisteront à peser les atomes, les molécules et les ions présents dans l'atmosphère cométaire, l'objectif étant de comprendre comment la glace est stockée dans la comète et de vérifier si elle contient d'autres gaz de l'espace interstellaire. Les abondances relatives des atomes communs, mais aussi les rares, donneront aux chercheurs des indices sur le rôle joué par les comètes dans la formation des atmosphères volatiles des planètes. D'autres observations portant sur les particules chargées du vent solaire aideront les chimistes à rendre compte de leur influence sur l'atmosphère de la comète.

Des milliers de grains de poussières seront analysés au moyen d'une source ionique à métal liquide qui fragmente les particules et accélère la matière à analyser. Au vu de la composition minérale des grains, on pourra dire si les comètes contiennent ou non des éléments entrant dans la composition de la Terre et d'autres planètes rocheuses. De même, une connaissance plus approfondie des composés carbonés présents dans les grains - composés auxquels les chercheurs ont porté le plus vif intérêt lors de l'examen des résultats des sondes Giotto et Véga - montrera dans quelle mesure les ingrédients nécessaires à l'apparition de la vie existaient à l'origine du système solaire.

“Je suppose, déclare Jochen Kissel, que Rosetta trouvera de la soupe en poudre formée de toutes les combinaisons possibles d’atomes d’hydrogène, de carbone, d’azote et d’oxygène restant stable à la température et à la pression internes de la comète. Il s’agirait en quelque sorte d’une destruction massive des molécules. Dans ce cas, les chercheurs en apprendront plus sur le milieu physique que sur des caractéristiques chimiques particulières. A mon avis, la matière première de la vie était très répandue dans le système solaire à ses débuts, et c’est l’environnement physique, peut-être à l’échelle microscopique, qui a joué un rôle déterminant dans son devenir.”

Pour nous renseigner sur les sources cosmiques de ces particules, les grains de poussière seront analysés un à un par le microscope électronique à balayage de Rosetta. Ce microscope pourra mettre en évidence les différences de forme et de composition des grains et calculer l’abondance des éléments d’après le rayonnement X émis par l’impact du faisceau d’électrons sur leur surface. L’examen des grains cométaires d’aspect pelucheux, analogues à ceux que l’on peut recueillir aujourd’hui dans la haute atmosphère terrestre, permettra de vérifier la théorie selon laquelle les poussières éjectées dans la queue des comètes ont répandu des composés carbonés sur la Terre au début de son existence.

Partant des résultats de Giotto, les conseillers scientifiques de l’ESA sont en mesure d’établir un programme logique des découvertes de Rosetta et de justifier l’acquisition de données nouvelles. “Nous nous attendons néanmoins à des surprises”, ajoute Gerhard Schwehm. “On ne peut pas tout prévoir dans une mission aussi aventureuse que Rosetta.”



La comète Grigg-Skjellerup. Comme la comète Wirtanen et d’autres petites comètes âgées, elle est sur les rangs pour la mission Rosetta. La sonde Giotto de l’ESA est allée à sa rencontre en juillet 1992, six ans après son rendez-vous avec la comète de Halley. Ce cliché a été pris par un télescope au sol le jour de l’arrivée de Giotto. Le nuage de poussières, la chevelure, avait une largeur de 20 000 kilomètres; une queue de faible intensité s’étend à gauche vers le bas. Cliché: K. Jorkees (MPAe Lindau) et ESO

ISO:

L'observatoire spatial dans l'infrarouge
de l'ESA (1995)



Deuxième partie

2

**L'Univers vu
de l'Espace**

Les télescopes en orbite: Aperçu général

Les étoiles ont des couleurs que nous ne voyons pas. L'œil humain ne perçoit en effet qu'une petite fraction du spectre lumineux atteignant la surface de la Terre, alors qu'il existe aussi d'autres rayonnements qui accomplissent, à notre insu, un long voyage dans l'espace-temps et finissent par mourir dans les couches supérieures de l'atmosphère. C'est donc en envoyant dans l'espace extra-atmosphérique des satellites équipés de télescopes et d'instruments réglés sur les différentes longueurs d'onde que nous pourrions élargir notre champ de vision de l'Univers.

La chose peut sembler simple. Dans la pratique, toutefois, cela suppose que les chercheurs consacrent des années de leur vie à mettre au point des instruments d'astronomie spatiale, rencontrant chemin faisant toutes sortes d'aléas et de déceptions qui ébranleraient la patience d'un saint. Ils ne se découragent pas pour autant, gardant l'espoir de pouvoir un jour découvrir un merveilleux spectacle avec leurs instruments.

Les chercheurs européens ont joué un rôle éminent dans l'aventure de l'astronomie spatiale. En vérité, on ne peut apprécier à sa juste mesure le rôle de l'ESA sans prendre en considération les travaux menés par les équipes scientifiques de ses Etats membres. Celles-ci ont en effet participé à de nombreuses missions d'astronomie américaines, russes et japonaises, mais aussi européennes, en fournissant des télescopes et des détecteurs ou en mettant au point des projets d'observation. L'ESA se fie à leur savoir-faire lorsqu'elle choisit ses futures missions.

Tout commença en fait à l'époque des calèches. Vers 1800, l'astronome anglais d'origine allemande William Herschel entreprit de mesurer le pouvoir calorifique des différentes couleurs constitutives du spectre solaire et constata un dégagement de chaleur au-delà de la bande rouge du spectre. Il avait découvert le rayonnement infrarouge.

Avant même la fin du XIX^e siècle, la liste des formes connues du rayonnement invisible s'était enrichie de la découverte des rayonnements ultraviolet et X et des ondes radio. Dans les années 1860, James Clerk Maxwell formula la théorie de l'origine électromagnétique de la lumière. Cette théorie affirme l'existence d'un grand éventail de rayonnements compris entre des longueurs d'onde très courtes (rayonnement X, par exemple) et très longues (radio), qui se propagent à la vitesse de la lumière. La lumière visible occupe une bande étroite au centre de ce spectre.

Les interrogations soulevées par l'aspect ambivalent des rayonnements de Maxwell, qui se comportent tantôt comme des particules et tantôt comme des ondes, ne trouvèrent d'explication qu'avec la théorie des quanta au XX^e siècle.

Aux yeux des théoriciens, il était évident que les étoiles et autres objets célestes devaient émettre dans une gamme étendue de longueurs d'onde. Les effets de cette théorie tardèrent toutefois à se manifester dans le domaine de l'astronomie. En 1931, l'ingénieur radio américain Karl Jansky détecta des interférences en provenance de la Voie lactée. Mais les astronomes continuèrent leurs travaux dans la lumière visible ainsi que dans une faible fraction de l'ultraviolet et de l'infrarouge proches. A l'exception des irrptions cométaires et des explosions d'étoiles, l'Univers observé dans la lumière visible semblait serein et immuable. Pourtant, un certain nombre d'autres galaxies, gigantesques amas d'étoiles ressemblant à notre Voie lactée, apparaissaient curieusement déformées. Et la théorie singulière de l'astronome belge Georges Lemaître, qui affirmait que l'Univers était né d'une gigantesque explosion, coïncidait apparemment avec les observations de l'astronome américain Edwin Hubble, constatant que les galaxies s'éloignaient les unes des autres. Mais en dehors de cela, rien ou presque ne venait troubler cette impression de profonde quiétude.

L'idée que l'homme se faisait du cosmos subit de profonds bouleversements après 1945. Grâce aux radiotélescopes réalisés par des physiciens britanniques, néerlandais et australiens, on s'apercevait que des phénomènes violents - explosions d'étoiles et de galaxies - étaient à l'oeuvre dans l'Univers. En 1965, des ingénieurs radio américains détectaient par hasard le bruit de fond continu annoncé par la théorie de l'explosion primordiale. Des amas denses de matière nucléaire, les étoiles à neutrons, se manifestaient à l'observation sous forme de pulsars. Parmi les galaxies, les quasars (radiosources d'aspect stellaire) apparaissaient si distants et donc si puissants qu'ils semblaient puiser leur énergie dans des trous noirs géants.

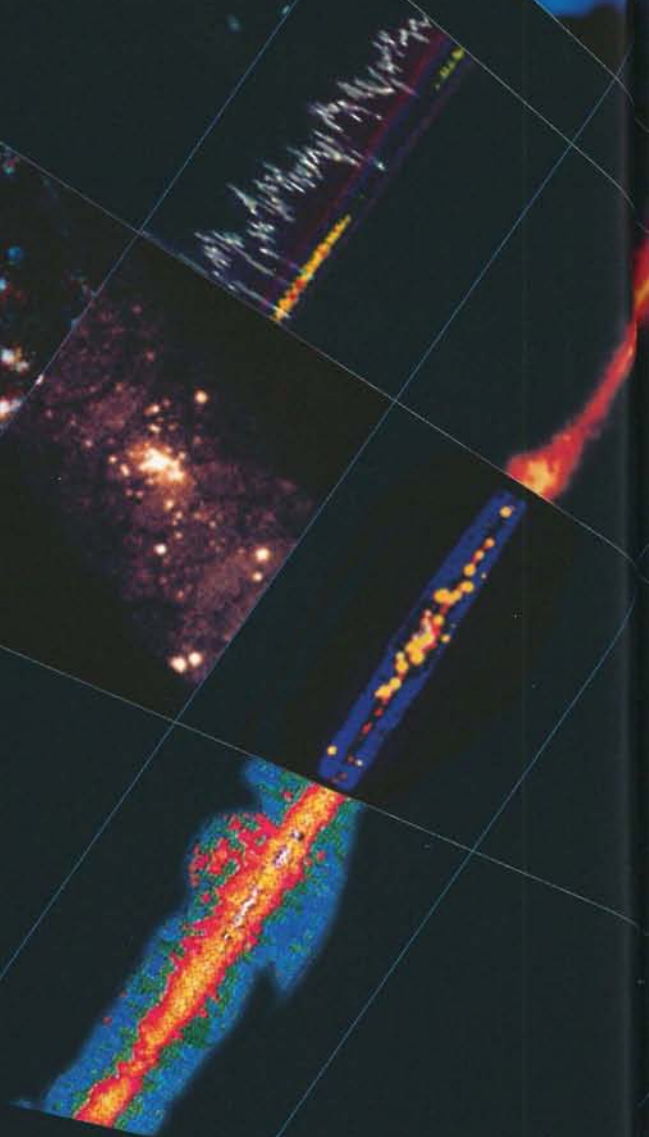
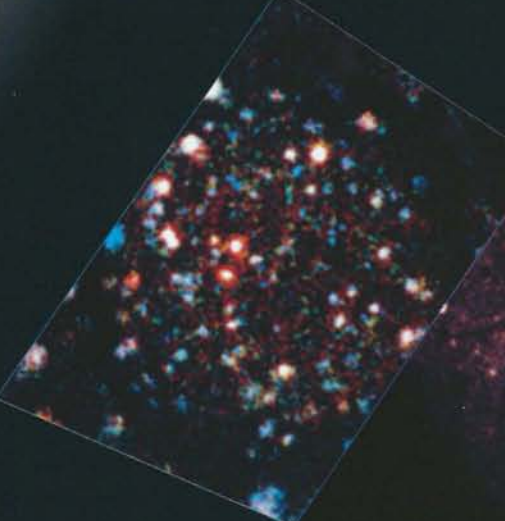
La lumière visible et certaines longueurs d'onde infrarouge et radio sont les seules composantes du spectre de Maxwell à traverser l'atmosphère, donc les seules à pouvoir être détectées par des observatoires au sol. S'il est vrai que les observatoires de haute montagne, les ballons et les avions volant à très haute altitude sont en mesure de capter d'autres rayons invisibles, seuls les télescopes spatiaux ont la vue parfaitement dégagée.

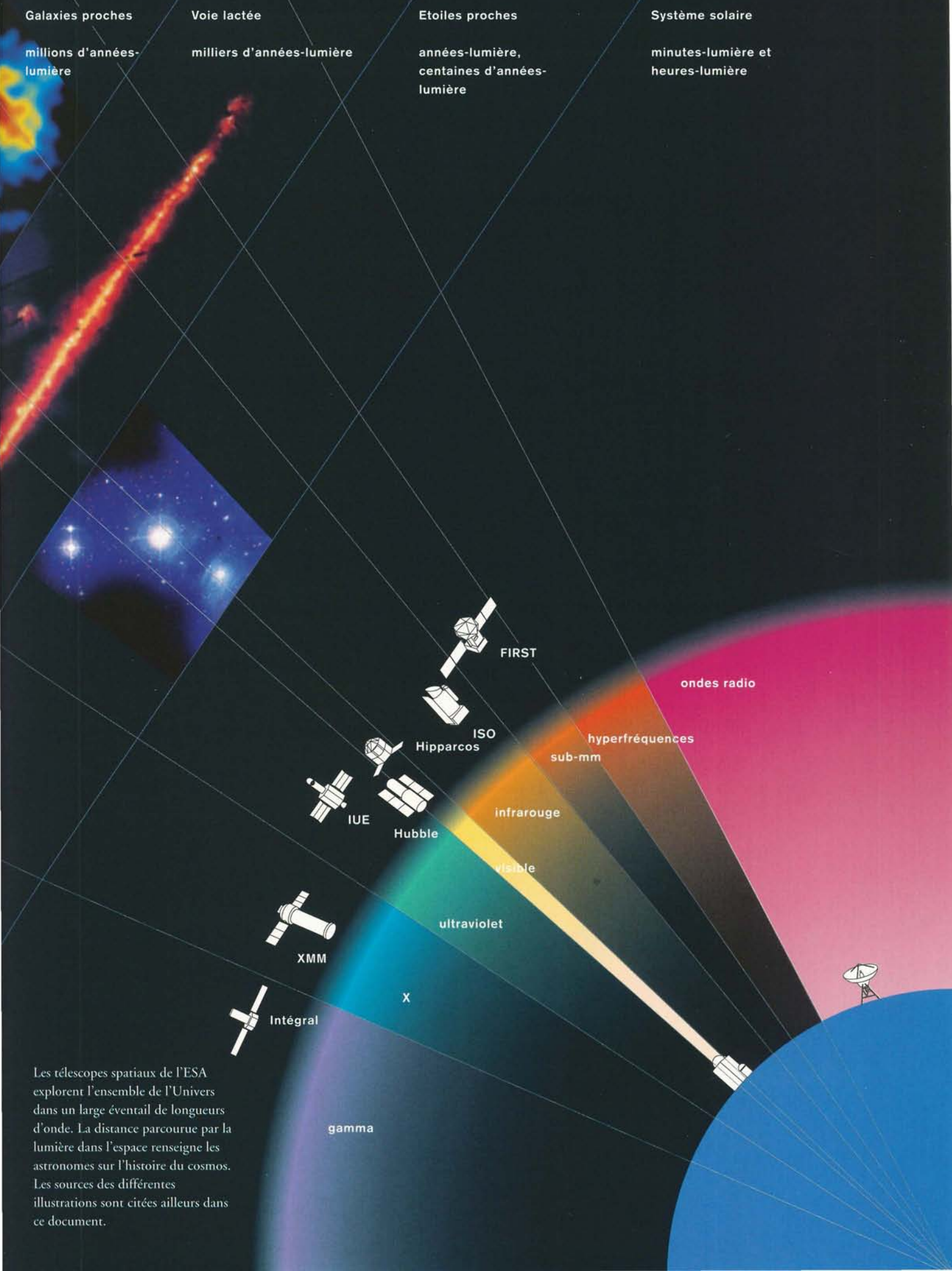
Big Bang?

Rayonnement
cosmologique
hyperfréquences

L'ère obscure de l'Univers
environ 12 milliards
d'années

Galaxies lointaines
milliards d'années-lumière

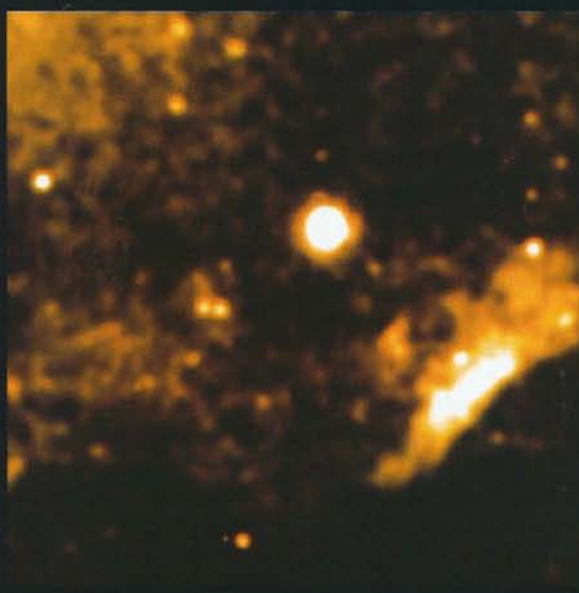




Les télescopes spatiaux de l'ESA explorent l'ensemble de l'Univers dans un large éventail de longueurs d'onde. La distance parcourue par la lumière dans l'espace renseigne les astronomes sur l'histoire du cosmos. Les sources des différentes illustrations sont citées ailleurs dans ce document.

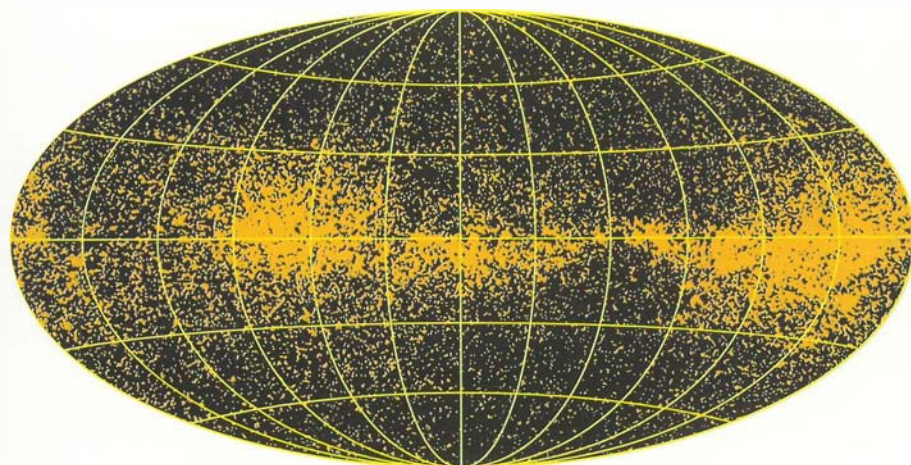
Mais l'Univers recelait encore d'autres surprises. En 1962, une fusée américaine découvrit en effet de façon inattendue dans la constellation du Scorpion une étoile émettant avec intensité dans le rayonnement X, baptisée Sco X-1. Puis quelques années plus tard, une autre découverte majeure eut lieu dans le domaine du rayonnement gamma (similaire au rayonnement X, mais encore plus énergétique). Des satellites militaires américains ayant pour objet de détecter les explosions nucléaires d'origine humaine enregistrèrent en effet des explosions cosmiques, ce qu'on a appelé les sursauts gamma, dont le mystère n'a toujours pas été élucidé. Les premiers satellites d'astronomie spécialisés firent leur apparition à la fin des années 60, mais connurent une série d'échecs, partiels ou totaux. C'est le satellite Uhuru de la NASA, lancé en 1970, qui démontra l'efficacité de l'astronomie spatiale. Ses instruments, certes rudimentaires par rapport aux moyens actuels, permirent de cartographier des centaines de sources de rayonnement X sur l'ensemble du ciel.

Uhuru découvrit que les sources du type Sco X-1 se composaient d'une étoile à neutrons ou d'une naine blanche, petite et dense, ponctionnant comme un vampire le gaz d'une étoile compagnon. Pour une des sources observées, Cyg X-1, l'intensité de l'émission changeait si rapidement que les astronomes soupçonnèrent un trou noir de jouer, dans ce cas, le rôle du vampire. Uhuru détecta en outre des rayons X émanant de quasars, d'autres galaxies, et - ce qui est plus surprenant - de nuages de gaz chauds associés à des amas de galaxies.



Trou noir stellaire? Source de rayonnement X brillante et variable, Cygnus X-1 serait un trou noir ayant dix fois la masse du Soleil. On suppose qu'il aspire et engloutit, sous l'effet de sa puissante force d'attraction gravitationnelle, la matière de son étoile compagnon. Ce trou noir se serait formé à la suite de l'effondrement du noyau d'une étoile en fin de vie, beaucoup plus grande que le Soleil. Cygnus X-1 compte parmi les premières découvertes de l'astronomie X, mais le présent cliché a été pris récemment par le satellite X allemand Rosat.

Cliché: J. Trümper (MPE Garching)



Concentrations d'étoiles ultraviolettes. Voici vingt ans, le satellite TD-1 de l'ESRO a établi un relevé des sources ultraviolettes de l'Univers. Sur cette carte de l'ensemble du ciel, les étoiles chaudes apparaissent regroupées dans la direction des constellations du Cygne et d'Orion.

L'Europe entre en scène

Tout juste quinze mois après le lancement d'Uhuru, l'Organisation européenne de Recherches spatiales (ESRO) fit ses débuts en astronomie spatiale avec une mission restée mémorable en raison des difficultés qu'elle traversa. Il s'agissait du satellite TD-1, du nom de la fusée américaine Thor-Delta qui le mit en orbite en 1972.

L'objectif de cette mission était d'observer l'ensemble du ciel dans les rayonnements gamma, X et ultraviolet. Les détecteurs de rayons cosmiques de TD-1 furent toutefois inondés de particules dans la ceinture de radiations de la Terre et purent seulement capter des émissions en provenance du centre de notre Galaxie. Un compteur de rayons X perturba le système de télémétrie du satellite, dont les résultats furent de toute façon éclipsés par ceux d'Uhuru. La défaillance des enregistreurs sur bande obligea l'ESRO à constituer un réseau de quarante stations sol - dont certaines furent spécialement créées pour la circonstance - dans la zone de couverture de TD-1, y compris dans l'Antarctique et à bord d'un navire ballotté par les flots de l'océan Austral. Malgré cette improvisation hâtive, les instruments de TD-1 travaillant dans l'ultraviolet permirent de dresser le catalogue de 30 000 étoiles chaudes et fournirent la première moisson abondante de spectres analysant des émissions dans ce domaine de longueurs d'onde.

La NASA lança également en 1972 un autre satellite ultraviolet baptisé Copernicus. Ce satellite de 2,2 tonnes - masse considérable pour l'époque - détecta des vents violents provenant d'étoiles chaudes, ce qui conduisit les astronomes à percevoir différemment l'espace interstellaire. En totalisant neuf années de service opérationnel, Copernicus démontra que le télescope spatial pouvait offrir aux astronomes un outil de travail fiable. L'histoire de l'astronomie spatiale soviétique remonte à 1968 avec le lancement du satellite Cosmos 215, équipé d'instruments d'observation dans l'ultraviolet, le rayonnement X et la lumière visible. A l'instar des Américains, les Russes ont également installé des télescopes à bord de leurs véhicules spatiaux habités. Pour leur part, jusqu'aux années 80 où ils purent enfin accéder à leur propre lanceur Ariane, les chercheurs spatiaux européens devaient faire appel aux services des superpuissances du moment pour emporter leurs expériences dans l'espace.

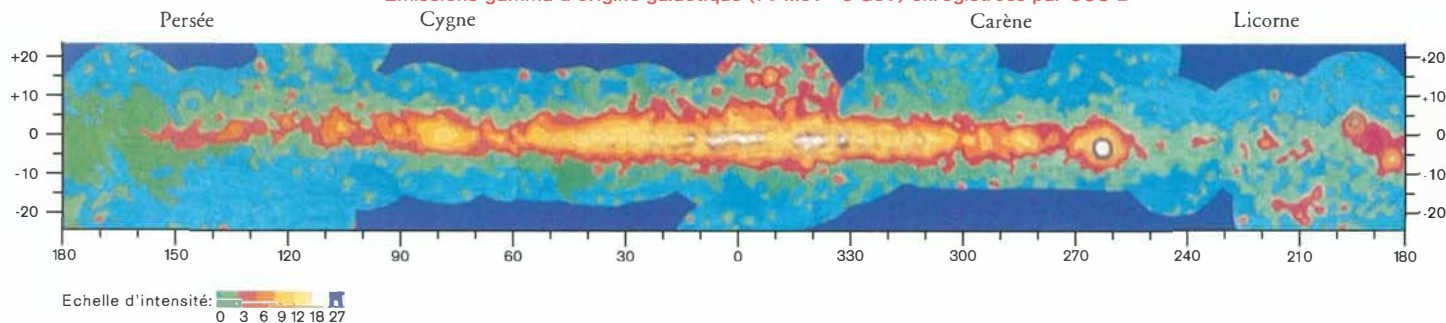
A partir de 1972, les Soviétiques embarquèrent à bord de leurs véhicules spatiaux des instruments réalisés par des Français pour des observations dans les rayonnements gamma et ultraviolet; la France lança son propre satellite ultraviolet en 1975. Les Pays-Bas et le Royaume-Uni construisirent des satellites astronomiques qui furent lancés par la NASA en 1974. Le satellite néerlandais ANS découvrit des sources de rayonnement X dans lesquelles des étoiles vampires déclenchent des explosions nucléaires. Le satellite britannique Ariel-5 enregistra des sursauts plus puissants suggérant la présence de trous noirs.

Les conseillers de l'Agence spatiale européenne (organisation qui succéda à l'ESRO), soucieux d'apporter un contrepoids à ces initiatives nationales et à la participation de l'ESA à des missions de la NASA, préconisèrent alors de construire des instruments et des satellites d'astronomie dans le cadre d'une coopération européenne. L'ESA gagna ses premiers galons dans le domaine de l'astronomie spatiale avec le satellite COS-B, lancé en 1975.

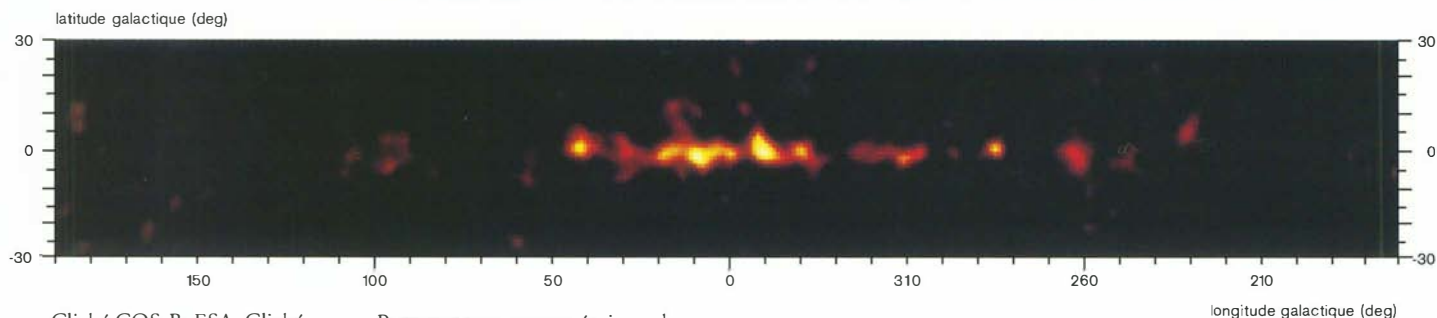
COS-B dressa une carte du ciel dans le rayonnement gamma. Avant lui, un satellite gamma américain du même type, SAS-2, avait découvert des sources ponctuelles correspondant à trois étoiles à neutrons, dont une inconnue, ainsi qu'une source étendue proche du centre de notre Galaxie. En raison toutefois d'une panne d'électricité survenue peu de temps après le début de ses observations, SAS-2 avait cessé de fonctionner, laissant le champ libre à COS-B. Pendant ses cinq années de service, le satellite européen détecta deux douzaines de sources gamma, y compris un quasar lointain, et constata que la source étendue d'émissions de forte intensité se prolongeait de part et d'autre du centre de la Galaxie. En 1977, l'ESA accepta de coopérer avec la NASA à la réalisation d'un grand télescope spatial - baptisé plus tard Hubble - permettant de mener des observations dans le domaine visible et dans l'ultraviolet.

Le télescope Hubble n'étant devenu parfaitement opérationnel qu'en 1994, ce sujet sera abordé plus loin. Cela vaut également pour Hipparcos, projet fort original et intégralement européen d'observation dans le rayonnement visible, dérivé d'une proposition formulée par des astronomes français. La mission Hipparcos fut approuvée par l'ESA en 1980.

Emissions gamma d'origine galactique (70 MeV - 5 GeV) enregistrées par COS-B



Emission gamma à 1,8 MeV, en coordonnées galactiques, observée par l'instrument COMPTEL du CGRO



Cliché COS-B: ESA. Cliché Compton: V. Schönfelder (MPE Garching) et équipe COMPTEL/Obs. Compton-GRO de la NASA; Image créée par J. Knoedlseder et R. Diehl.

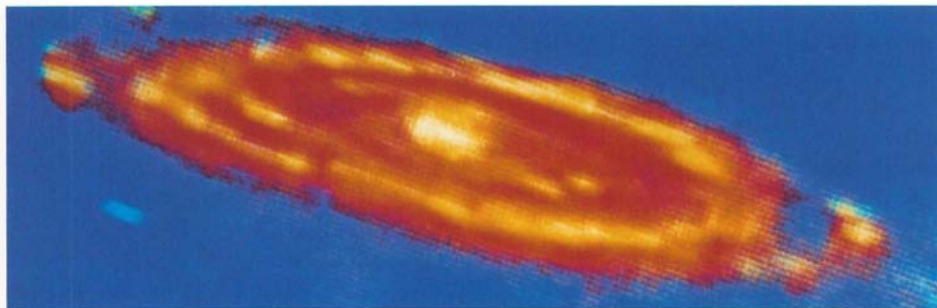
Rayonnement gamma émis par la Voie lactée. Ces représentations aplaties de notre Galaxie correspondent à la Voie lactée, bande claire, riche en étoiles, qui ceinture le ciel. En haut: rayonnement gamma observé par le satellite COS-B de l'ESA (1975-1981), pionnier dans ce domaine d'observation du spectre. En bas: un instrument allemand placé à bord de l'observatoire gamma Compton de la NASA (1991) utilise les émissions de l'aluminium radioactif pour localiser les régions dans lesquelles des explosions stellaires auraient récemment synthétisé des éléments. Volker Schönfelder, de l'Institut Max-Planck de Physique extraterrestre de Garching (Allemagne), est chargé de l'instrument COMPTEL à l'origine de ce cliché. "Nous nous attendions à obtenir une image beaucoup plus homogène", dit-il. "Nous avons été très surpris d'y trouver des taches brillantes."

L'astronomie spatiale arrive à maturité

Observer le ciel dans des longueurs d'onde particulières et localiser les sources célestes de ces ondes est une chose. Interpréter ces objets correctement en est une autre. Il ne suffit pas de photographier et de localiser avec précision, encore faut-il déceler les variations d'énergie aux différentes longueurs d'onde. Les astronomes recherchent des signatures distinctives d'atomes particuliers ainsi que des émissions continues révélatrices des caractéristiques physiques des sources, autant de données qui leur sont fournies par la spectroscopie.

L'astronomie dans l'ultraviolet est arrivée à maturité la première, avec le lancement du satellite IUE (International Ultraviolet Explorer) en 1978. Préconisé à l'origine par des astronomes britanniques en vue d'analyser des spectres de sources ultraviolettes, IUE est devenu un projet commun de la NASA, de l'ESA et du Royaume-Uni. Son succès fut éclatant, et le satellite fonctionne encore de nos jours. Les astronomes aiment beaucoup IUE car ils peuvent utiliser la station sol de l'ESA près de Madrid ou celle de la NASA près de Washington comme s'il s'agissait de grands télescopes terrestres.

IUE fut le premier télescope professionnel à observer le Grand Nuage de Magellan en 1987, lorsqu'une étoile explosa dans cette galaxie proche de la nôtre. L'étoile en question fut identifiée par comparaison avec des données IUE antérieures. En ce qui concerne le rayonnement ultraviolet émis par les quasars, les galaxies, les étoiles, les planètes et les comètes, les astronomes doivent l'essentiel de leurs connaissances actuelles à IUE, dont la maîtrise du ciel dans l'ultraviolet ne fut contestée que très récemment par le télescope Hubble.



La galaxie d'Andromède vue dans l'infrarouge. Il s'agit de la galaxie spirale la plus proche de la Voie lactée. Au lieu de l'amas d'étoiles brillantes détectable en lumière visible, le satellite d'astronomie dans l'infrarouge IRAS (1983) mit en évidence un anneau de poussières entourant la galaxie.

Cliché: IRAS/NASA/JPL

En 1978, année du lancement d'IUE, la NASA embarqua à bord du satellite Einstein un télescope focalisant le rayonnement X. Les missions d'astronomie X précédentes avaient utilisé des collimateurs ("oeillères" placées en avant des détecteurs) pour circonscrire le champ d'observation des rayons X à une région donnée.

D'éminents spécialistes américains de l'astronomie spatiale firent appel à une invention allemande permettant de focaliser les rayons X, qui fut d'abord utilisée dans le télescope solaire X équipant la station spatiale Skylab, puis dans l'observatoire spatial Einstein. A la différence des missions précédentes d'exploration du ciel dans le rayonnement X, Einstein fonctionnait comme un observatoire, choisissant à son gré des objets pour les soumettre à un examen approfondi.

Les restes de ces explosions d'étoiles que sont les supernovae ont formé des enveloppes de gaz émettrices de rayons X. Dans la galaxie d'Andromède, qui s'était manifestée à l'origine comme une source unique, l'observatoire Einstein détecta une centaine d'étoiles différentes émettant dans le domaine X. Einstein observa également de petites sources à variations rapides au coeur de galaxies plus lointaines, susceptibles d'abriter des trous noirs géants. En 1981, date à laquelle cet observatoire cessa de fonctionner, l'Europe avait précipitamment révisé la conception d'une prochaine mission d'astronomie X afin de l'adapter à l'évolution des techniques dans ce domaine.

Malgré sa masse six fois inférieure à celle d'Einstein, le satellite Exosat de l'ESA emporta dans l'espace de petits télescopes à focalisation et des détecteurs de haute technologie. Lancé en 1983, Exosat put reprendre les observations là où Einstein les avait laissées et entreprit notamment d'étudier de près le rayonnement X émis par des étoiles, des restes de supernovae et ce qu'on pensait être des trous noirs géants dans d'autres galaxies. Les astronomes ayant insisté pour obtenir une prolongation de la mission au-delà des deux années prévues à l'origine, Exosat resta opérationnel jusqu'à ce que des problèmes de commande et de contrôle d'orientation mirent fin à la mission en 1986.

En 1983, un satellite construit aux Pays-Bas ouvrit une nouvelle fenêtre sur l'Univers en établissant une carte du ciel dans l'infrarouge. IRAS, fruit d'une coopération entre les Etats-Unis, les Pays-Bas et le Royaume-Uni, compte avec IUE parmi les succès les plus éclatants de l'astronomie spatiale, bien qu'il n'ait pu fonctionner que trois cents jours.

La durée de vie de ce satellite était limitée par des contraintes thermiques. Il fallait en effet maintenir le télescope et ses instruments à très basse température pour éviter qu'ils n'émettent un rayonnement thermique parasite empêchant la détection des faibles niveaux d'énergie infrarouge en provenance du cosmos.

Couvrant quatre longueurs d'onde différentes de l'infrarouge, IRAS détecta des nuages de poussières, des étoiles froides et des galaxies lointaines. Dès l'obtention des premiers résultats, les astronomes découvrirent des poussières en orbite autour de certaines étoiles, d'étranges nuages de poussières - auxquels on donna le nom de cirrus infrarouges - dans la Voie lactée, ainsi que des galaxies infrarouges de très haute énergie et riches en poussières. Plus de dix ans après que le satellite se soit tu, les astronomes continuent d'exploiter les catalogues IRAS dans l'espoir de nouvelles découvertes.

Les objets cosmiques détectés par IRAS méritaient un examen individuel plus approfondi, et un télescope plus sensible pouvait en détecter beaucoup d'autres, trop faibles pour la mission qui avait ouvert ce nouveau domaine. L'ESA approuva donc en 1983 la mise en chantier de l'observatoire spatial dans l'infrarouge ISO (Infrared Space Observatory), dont le lancement est maintenant fixé à 1995.

ISO enverra des images d'une précision dix fois supérieure à celle d'IRAS et détectera des rayonnements cent à mille fois plus faibles. Au lieu de se limiter à quatre longueurs d'onde prédéfinies, il analysera par spectroscopie la gamme complète des longueurs d'onde sur une bande de fréquences plus large. Et il fonctionnera en mode "observatoire". Comme IRAS, ISO sera refroidi par de l'hélium liquide, disponible en quantité limitée, mais il devrait rester en service environ deux fois plus longtemps. Cette mission de l'ESA marque également une étape majeure pour l'astronomie spatiale dans l'infrarouge. ISO observera l'ensemble de l'Univers, des comètes proches jusqu'aux galaxies les plus lointaines. Il fera progresser la recherche dans des domaines aussi passionnants que la formation des planètes et l'évolution des galaxies. Peut-être contribuera-t-il également à élucider un mystère cosmologique. S'il parvient en effet à détecter un nombre suffisant d'étoiles froides du type naine brune au voisinage de la Voie lactée, celles-ci pourraient expliquer la présence de matière noire invisible et, partant, le fait que les étoiles situées aux confins de notre Galaxie se déplacent à une vitesse supérieure à ce qui était prévu.

Vers une politique plus cohérente

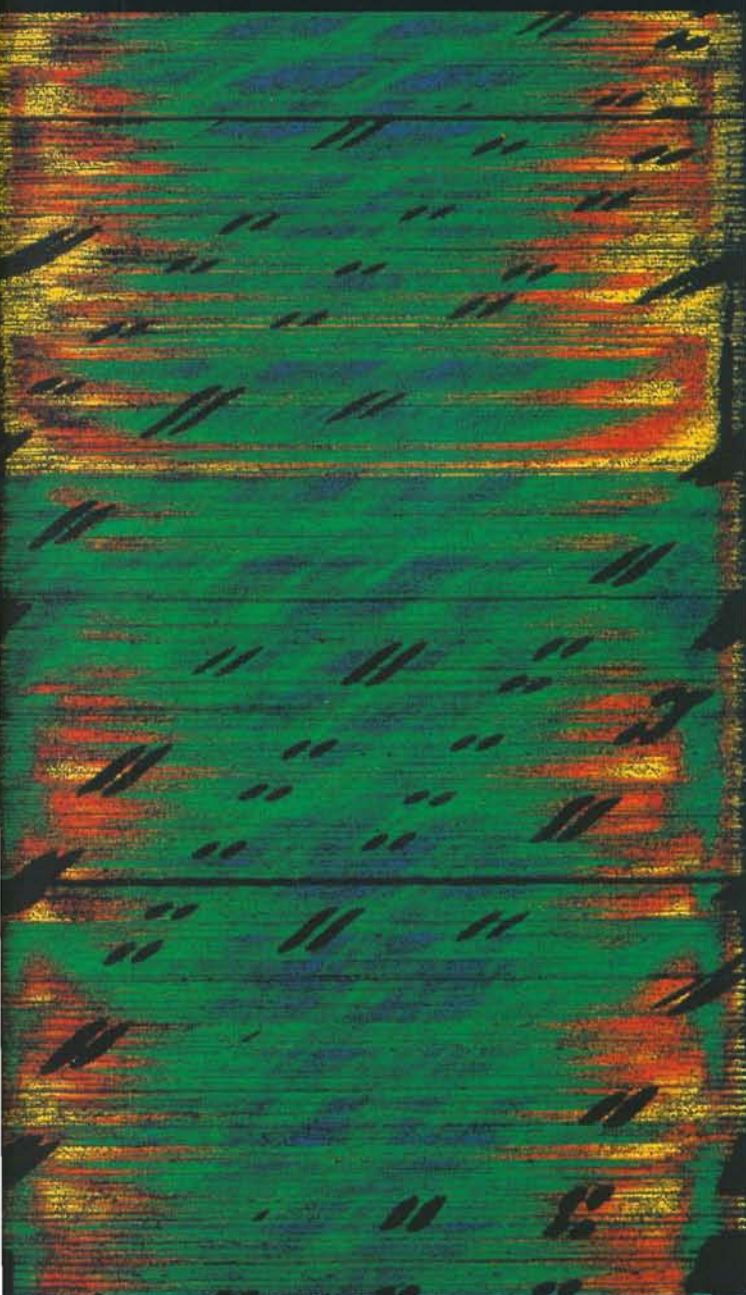
La mission ISO fut approuvée en 1983, alors que l'ESA élaborait son programme Horizon 2000. Ce programme à long terme repose sur un équilibre entre les exigences des chercheurs européens, en concurrence face à des ressources limitées, et les possibilités qui s'offrent à l'ESA de réaliser des missions d'un intérêt particulier.

Lors du lancement d'Horizon 2000, les télescopes spatiaux avaient déjà fait la démonstration de leur utilité pour l'astronomie en général et les scientifiques européens occupaient une position éminente au niveau mondial. IRAS avait connu un triomphe, Exosat gravitait en orbite, et la caméra pour objets faiblement lumineux (FOC) de l'ESA était prête à remplir son office à bord du télescope spatial Hubble. Partout en Europe, les laboratoires s'employaient activement à de nouveaux projets. Les Allemands travaillaient à la réalisation du satellite Rosat, projet important d'astronomie X mené en coopération avec la NASA, et préparaient un télescope destiné à une mission américaine d'observation dans le rayonnement gamma. Les Britanniques fournissaient l'instrument principal d'une mission japonaise d'astronomie X, dont le lancement était alors imminent. Parmi les télescopes testés dans le Spacelab de l'ESA à bord d'une navette spatiale américaine figurait un télescope X britannique à masque codé. Cette technique permet de détecter des sources cosmiques à partir de la trace de leurs rayonnements sur un réseau de détecteurs au travers d'un masque percé de fentes, ces fentes étant disposées selon une configuration mathématique particulière. Ce type de masque devait être utilisé dans un télescope gamma français à bord du satellite soviétique Granat.

Les Danois projetaient de réaliser des instruments pour la détection des sursauts gamma, qui devaient être embarqués à bord de Granat ainsi que de la plate-forme récupérable Eureka de l'ESA (cette dernière étant larguée et récupérée par la navette spatiale américaine). L'Italie envisageait de construire un satellite d'astronomie X, avec une forte participation des Pays-Bas. De plus, toute une panoplie d'instruments d'astronomie réalisés par l'Allemagne, l'ESA, les Pays-Bas et le Royaume-Uni devait être installée à bord de la station orbitale soviétique Mir. Outre ce foisonnement d'activités à conduire dans l'espace, l'Europe poursuivait ses programmes d'astronomie au sol. Les conseillers scientifiques de l'ESA étaient donc tout à fait qualifiés pour formuler des avis pertinents sur les priorités nouvelles.

"Nous voulons que nos télescopes spatiaux soient les meilleurs du monde dans leur catégorie", déclare Martin Huber, chef du département Science spatiale de l'ESA. "Nous faisons partie de la communauté scientifique mondiale et, en tant que tels, nous mettons constamment en balance les avantages respectifs de la coopération et d'une concurrence amicale. C'est pourquoi nous suivons avec une grande attention les projets envisagés par les autres agences spatiales, de même que celles-ci s'intéressent aux nôtres. Sur le conseil des experts européens en astronomie spatiale, nous avons annoncé que le programme Horizon 2000 comprendrait des missions "pierres angulaires" ambitieuses dans le rayonnement X et les longueurs d'onde submillimétriques. Et nous avons déjà complété ces grands projets par une mission gamma de taille moyenne."

Avant de clore cette présentation générale, il sera bon de situer les futures missions d'astronomie de l'ESA dans leur contexte, par rapport aux projets conçus ailleurs et aux possibilités qui s'offrent à la science. Pour plus de commodité, cette mise en perspective se fera à travers un bref aperçu relatif à chacune des composantes du spectre de Maxwell. L'astronomie est néanmoins une discipline scientifique "multispectrale", dans laquelle observer un même objet dans plusieurs longueurs d'onde différentes est la technique qui offre les perspectives de découvertes les plus prometteuses. Puisqu'il est préférable de mener simultanément ces différentes observations, on gagne du temps en embarquant sur un seul satellite toute la panoplie d'instruments voulue. Les satellites multispectraux, dont les nouvelles missions de l'ESA offrent quelques exemples, pourraient ouvrir de nouveaux horizons.



Ceintures de radiations. Chacune des lignes de cet enregistrement représente une orbite du satellite Hipparcos de l'ESA. A chaque orbite, le satellite traversait deux fois les nuées de particules des ceintures de radiations entourant la Terre. L'intensification du bruit de fond, présenté ici en rouge et en jaune, gêne les astronomes.

Cliché: F. van Leeuwen (RGO, Cambridge), consortium NDAC et programme Hipparcos.

Rayonnement gamma

Pendant que le programme Horizon 2000 se mettait en route, les observatoires gamma Granat (russe, 1989) et Compton (américain, 1991) étaient déjà en projet, avec les instruments allemands et français mentionnés plus haut. Le comité d'étude de l'ESA en conclut qu'il n'y avait pas lieu pour l'Europe de construire un satellite supplémentaire couvrant cette plage du spectre. Pourtant, moins de dix ans plus tard, les conseillers scientifiques recommandaient chaudement de programmer un autre observatoire gamma. Ce projet, approuvé en 1993 par l'ESA sous le nom d'Integral, entre dans la catégorie des missions de taille moyenne du programme Horizon 2000, cette classification s'expliquant par le fait qu'Integral partage certaines technologies spatiales avec la prochaine mission d'astronomie X de l'ESA.

Integral constitue un exemple frappant des changements d'opinion qui peuvent survenir à mesure que les technologies évoluent. Le potentiel scientifique de ce projet est confirmé par le succès incontestable des missions récentes, au cours desquelles ont notamment été découverts des blazars gamma parmi les galaxies ainsi que des concentrations inattendues d'éléments lourds dans les poussières de la Voie lactée. Il est permis de penser que la mission Integral de l'ESA, dont le lancement aura lieu en 2001, obtiendra des résultats nettement supérieurs à ceux de Granat et de Compton.

Outre le recours à une forme particulière de germanium dans un détecteur en vue d'éliminer les mesures parasites, Integral utilisera des masques codés pour identifier les sources gamma comme cela a été fait pour la mission Granat. Ce satellite emportera également des instruments d'astronomie X et visible. On espère notamment pouvoir résoudre le problème de l'origine des sursauts gamma, qui tracasse les astronomes depuis un quart de siècle et qui a conservé tout son mystère au lendemain de la mission Compton. Integral observera en particulier le centre de la Voie lactée, où pourrait bien se nicher un trou noir géant.



Rayonnement X de la galaxie d'Andromède. Située à environ 2 millions d'années-lumière, cette galaxie est l'objet le plus lointain que nous puissions voir à l'œil nu. Comme sa soeur la Voie lactée, elle contient de nombreuses étoiles émettrices de rayons X. On compte plusieurs centaines d'étoiles X dans ce cliché pris par le satellite Rosat.

Cliché: J. Trümper (MPE Garching)

Rayonnement X

Rosat a dominé l'astronomie X du début des années 90. Cette mission, fruit d'une coopération entre l'Allemagne, les Etats-Unis et le Royaume-Uni, permit de dresser pour la première fois une carte de l'ensemble du ciel à l'aide d'un télescope à focalisation et de conduire des observations en mode de pointage du type observatoire. Le satellite Rosat connut un énorme succès: il détecta par exemple des dizaines de milliers de galaxies actives dont le noyau était le siège d'événements violents, ainsi qu'une galaxie d'où s'échappaient des vents à très haute température. Sans oublier 400 sources distinctes de rayonnement X dans la galaxie voisine d'Andromède, plus que le satellite X Uhuru n'en avait localisé dans l'ensemble du ciel.

Quels types de télescope les astronomes X souhaitent-ils aujourd'hui utiliser? Les Américains veulent voir des détails fins du ciel X. La NASA prépare actuellement un satellite dénommé AXAF, équipé d'un télescope à focalisation de 1,2 mètre de diamètre et de 10 mètres de longueur. Cet instrument, comparable au télescope spatial Hubble pour ce qui concerne le rayonnement X, sera lancé vers la fin du siècle.

Les Japonais, les Russes et les Européens privilégient quant à eux d'autres objectifs, qui ont pour noms "miroirs multiples" et "spectroscopie à haut rendement". Ce sont des télescopes X perfectionnés d'une grande efficacité pour la collecte et la détection des rayons X, avec lesquels il est possible d'analyser les sources cosmiques en détail sans procéder à des expositions exagérément longues.

Ce qui est ici remis en cause, c'est la faible efficacité des premiers télescopes X à focalisation qui, au mieux, ne collectaient qu'un petit pourcentage des rayons incidents issus du champ de visée. Comparable à un seau sans fond, le miroir X ne focalise que les rayons qui frappent la paroi intérieure du seau. Afin de réduire les pertes, on peut "emboîter" un certain nombre de miroirs les uns dans les autres. L'observatoire Einstein possédait quatre miroirs emboîtés, et AXAF en comptera autant.

En revanche, le satellite japonais Asca (1993) est équipé, pour sa part, de quatre petits télescopes comprenant chacun 120 miroirs emboîtés. Sa vision des détails est médiocre comparée à celle d'AXAF, mais il collecte davantage de rayons X que ce dernier et étend la couverture du rayonnement X à des énergies plus élevées.

Le futur satellite italo-néerlandais SAX sera équipé de quatre télescopes comprenant chacun 30 miroirs. Le satellite russe Spectrum X Gamma emportera deux télescopes russo-danois comprenant chacun 154 miroirs. Ces premiers télescopes à miroirs multiples privilégient la simplicité au détriment de l'acuité de vision, ou pouvoir séparateur, en utilisant des miroirs coniques. Pour obtenir une focalisation correcte, il faudrait des miroirs mixtes paraboliques-hyperboliques comme dans les télescopes classiques. Les télescopes anglo-italiens destinés au satellite Spectrum-X Gamma contiennent tous deux douze miroirs entièrement façonnés. Ils feront également avancer la technologie dans une voie nouvelle: la détection des rayons X au moyen de dispositifs à transfert de charge (DTC) refroidis. Il s'agit de puces spéciales au silicium d'une grande sensibilité permettant de mesurer avec précision l'énergie des rayons X sous une température de -100° C.

Le principe retenu pour la conception du satellite XMM de l'ESA, qui sera lancé en 1999, consiste à emboîter les uns dans les autres le plus grand nombre possible de miroirs à courbure parabolique-hyperbolique de haute précision. Il a été décidé de doter chacun des trois télescopes de 58 miroirs ayant une ouverture maximale de 70 centimètres. XMM alliera donc une grande efficacité de collecte des rayons X à un bon pouvoir séparateur.

En tant que mission "pierre angulaire" du programme Horizon 2000, le projet XMM dispose des ressources nécessaires pour mettre au point des instruments sortant des sentiers battus. Chaque miroir étant une grande coque de métal mince qui ne doit subir aucune déformation, les entreprises allemandes et italiennes chargées de fabriquer les télescopes ont un défi intéressant à relever.

L'astronomie X fera donc son entrée dans le XXI^e siècle avec le satellite AXAF de la NASA, qui analysera les détails les plus fins des sources X, et le satellite XMM de l'ESA, qui collectera les rayons X dix fois plus vite et procédera à leur étude approfondie.



Un pavé dans la mare. L'anneau composé de milliards de jeunes étoiles bleues que l'on peut voir sur ce cliché de la galaxie Cartwheel (littéralement: "roue du chariot"), pris par le télescope spatial Hubble, s'est formé sous l'effet d'une onde de choc issue du centre de la galaxie. La galaxie bleue, d'aspect irrégulier, visible sur la droite pourrait avoir traversé la "roue du chariot" en déclenchant des ondulations dans l'espace telle une pierre jetée dans une mare.

Cliché: K. Borne (STScI), NASA et ESA

L'ultraviolet

Les rayonnements X et ultraviolet sont séparés par un "no man's land" défini comme l'ultraviolet extrême (EUV). Alors que les spécialistes de la physique solaire étudient depuis longtemps cette partie du spectre, les autres astronomes l'ont évitée dans l'idée que les atomes d'hydrogène très répandus dans l'espace interstellaire absorberaient la totalité du rayonnement EUV en deçà de la longueur d'onde des 91 nanomètres. Encouragé toutefois par les "clichés" des télescopes de la mission Apollo- Soyouz de 1975 et de la sonde interplanétaire Voyager de la NASA, un groupe britannique réalisa une caméra EUV qui fut embarquée à bord du satellite allemand d'astronomie X Rosat.

Cette "mission impossible" ne tarda pas à mettre en évidence des centaines d'étoiles EUV très chaudes. Le gaz interstellaire n'a rien d'uniforme, et les étoiles massives, les jeunes naines blanches et les restes de supernovae brillent d'un grand éclat dans ce gaz de faible densité. En 1992, la NASA lança le satellite EUVE (Extreme UltraViolet Explorer), qui découvrit un jet EUV dans une galaxie lointaine.

Le projet Lyman, réalisé par la NASA avec la participation du Canada et du Royaume-Uni, occupera le créneau de longueurs d'onde se situant entre l'EUV et l'ultraviolet "normal" d'IUE et du télescope spatial Hubble. Lyman explorera un domaine du spectre qui devrait livrer des informations importantes sur l'abondance de différents éléments légers issus du Big bang.

Les fervents utilisateurs d'IUE se demandent par quoi sera remplacé ce satellite vieillissant. L'étude menée par la NASA et l'ESA en vue de son remplacement a été abandonnée à la suite de l'accident de la navette Challenger en 1986. En principe, les spectromètres du télescope Hubble pourraient poursuivre le travail d'IUE, mais il déjà très sollicité pour d'autres tâches.

La lumière visible

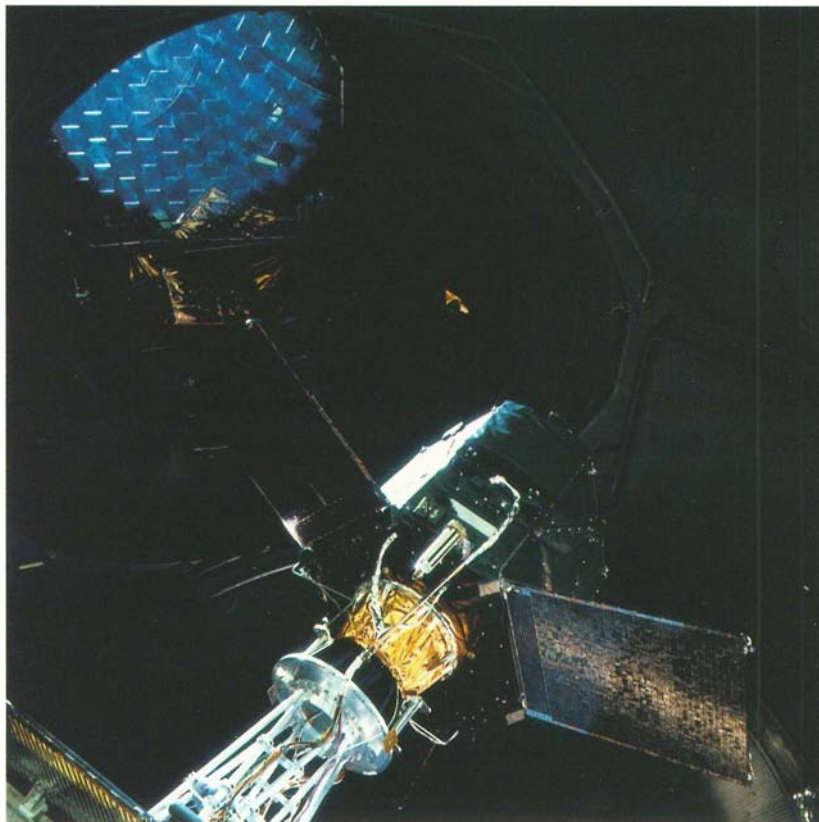
Hubble, le plus célèbre de tous les télescopes spatiaux, est conçu pour observer le ciel dans le domaine visible aussi bien que dans l'ultraviolet. La NASA lança ce télescope en 1990, en retard sur la date initialement prévue, puis constata un défaut de fabrication du miroir principal qui mit en émoi le monde de l'astronomie. Malgré le manque de "piqué" des images transmises, Hubble fit de nombreuses découvertes sur les étoiles et les galaxies. Et les astronomes européens obtinrent un temps d'observation supérieur aux 15% qui leur avaient été alloués en contrepartie de la participation de l'ESA à cette mission.

La caméra pour objets faiblement lumineux (FOC) de l'ESA fonctionnait bien, mais les panneaux solaires que celle-ci avait également fournis rencontrèrent des problèmes de vibrations. L'installation de panneaux de conception nouvelle fut donc inscrite sur la liste déjà impressionnante des interventions prévues pour la mission de maintenance et de remise en état du télescope. Les astronautes embarqués sur la navette spatiale américaine qui exécutèrent cette mission avec succès fin 1993 suscitèrent l'admiration des téléspectateurs et remplirent de gratitude les astronomes. Doté d'une optique correctrice, Hubble répond aujourd'hui à tous les espoirs qui avaient été mis dans cette mission dans les années 70. La première découverte consécutive à la remise en état du télescope eut lieu en janvier 1994: une équipe dirigée par l'ESA détecta la présence d'hélium primitif dans l'Univers au moyen de la caméra pour objets faiblement lumineux. Dès 1995, la littérature scientifique débordait de nouvelles découvertes, tant américaines qu'européennes.

Le télescope Hubble est conçu pour une durée de vie de quinze ans. Entre-temps, les observatoires terrestres construisent des télescopes géants de 8 et 10 mètres, dotés d'une surface collectrice nettement supérieure à celle de Hubble. Bien que les Américains aient évoqué l'hypothèse d'un télescope spatial de 8 mètres, le fait de pouvoir recourir à la technique de l'optique adaptative pour corriger les effets des turbulences atmosphériques terrestres diminue les chances de construction d'un autre télescope spatial polyvalent observant dans le domaine visible.

Hipparcos. Ce satellite de l'ESA a révolutionné les méthodes employées pour déterminer la position, la distance et le mouvement des étoiles.

Sur ce cliché, Hipparcos subit des essais dans un simulateur spatial du Centre européen de recherches et de technologies spatiales (ESTEC) à Noordwijk (Pays-Bas), avant son lancement en 1989.



Les petits télescopes spécialisés pourront continuer à rendre de précieux services. Ainsi, le satellite SOHO de l'ESA (1995) détectera des oscillations à la surface du Soleil grâce à sa position stratégique dans l'espace, alliant une exceptionnelle stabilité à l'absence de zone d'ombre. Ces oscillations livreront des informations sur la structure interne de l'astre. On peut appliquer la même technique à l'étude des étoiles. Ainsi, l'ESA étudie un projet d'observation des oscillations stellaires dénommé STARS, mais n'a pas encore approuvé cette mission. La mission Hipparcos de l'ESA se distingue de tous les autres projets de l'astronomie spatiale par sa profonde originalité. A la différence de tous les projets visant à étudier, dans des longueurs d'onde données, les processus énergétiques à l'oeuvre dans les étoiles et les galaxies, Hipparcos avait en effet pour mission de déterminer avec précision la position et le mouvement des étoiles. De 1989 à 1993, ce satellite européen a calculé la position du million d'étoiles les plus brillantes. Il a également précisé la position de 120 000 autres étoiles, et les ordinateurs s'emploient aujourd'hui à lever les ambiguïtés liées aux distances et aux mouvements différents des étoiles.

C'est là une tâche monumentale, qui devrait aboutir à la publication de résultats tout aussi monumentaux par l'ESA en 1997. Le catalogue Hipparcos offrira non seulement une carte du ciel cohérente nettement plus précise que celle des catalogues précédents, mais aussi une vision animée en trois dimensions des étoiles qui nous entourent. A toutes ces étoiles sont associées des distances et des mouvements spécifiques, que nous connaissions mal jusqu'à ce jour excepté pour quelques dizaines d'étoiles les plus proches.

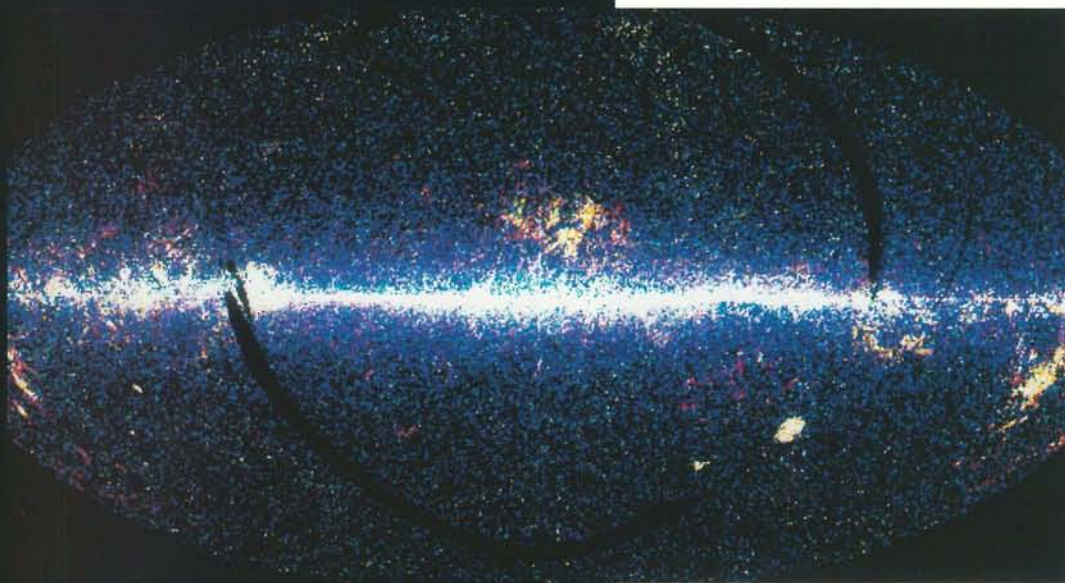
Pour de nombreux calculs allant de l'énergie rayonnée par différents types d'étoiles aux effets de la matière cachée sur les mouvements au sein de la Galaxie, les astrophysiciens s'étaient fondés sur des estimations de distances. Grâce à Hipparcos, tout cela va changer. A lui seul, Hipparcos assurerait à l'ESA une place inoubliable dans l'histoire des sciences.

Fort de son succès, Hipparcos pourrait avoir un successeur. Le comité d'étude scientifique élaborant les grandes lignes du programme Horizon 2000 Plus de l'ESA pour la période 2006-2016 a recommandé qu'un satellite d'astrométrie encore plus précis soit pris en considération pour l'une des grandes missions à venir. Ce satellite utiliserait des interféromètres pour regrouper les faisceaux lumineux provenant de couples de petits télescopes placés à distance les uns des autres et déterminer ainsi la position des objets avec une précision égale à celle d'un télescope beaucoup plus grand et plus lourd.

Infrarouge et longueurs d'onde submillimétriques

Le satellite ISO de l'ESA règnera sur le ciel infrarouge pendant les dix-huit à vingt mois qui suivront son lancement, en 1995. Les astronautes japonais envisagent une petite mission aux alentours de l'an 2000. Au début du XXI^e siècle, la NASA lancera le télescope SIRTf (Shuttle Infrared Telescope Facility), qui étendra l'éventail des observations aux longueurs d'onde submillimétriques (de 0,1 à 1 millimètre) constituant la zone de transition entre l'infrarouge extrême et les ondes radio les plus courtes. Comme ISO, le SIRTf sera refroidi à l'hélium liquide. A l'horizon 2005, l'ESA projette de lancer le télescope spatial FIRST (Far InfraRed and Submillimeter space Telescope) qui travaillera dans l'infrarouge lointain et les longueurs d'ondes submillimétriques. Dernière mission "pierre angulaire" du programme Horizon 2000 de l'ESA, FIRST marquera l'apogée de deux tendances de l'astronomie spatiale: la première tendance réside dans l'accès aux ondes submillimétriques par des techniques de type optique et radio très avancées, permettant l'analyse spectroscopique de ces longueurs d'onde; la deuxième privilégie des systèmes de refroidissement qui, contrairement à l'hélium, ne limitent pas la durée de vie opérationnelle d'une mission. La longévité de FIRST devrait dépasser six ans. Les ondes submillimétriques présentent un intérêt particulier en astronomie. De nombreuses molécules importantes, l'eau par exemple, ont en effet des émissions caractéristiques à ces longueurs d'onde. Les nuages froids de poussières de l'Univers, notamment ceux dans lesquels naissent les étoiles, rayonnent avec l'intensité la plus forte dans ce domaine du spectre. Et aux confins de l'Univers observable, les émissions des galaxies et des protogalaxies aux longueurs d'onde plus courtes sont décalées vers les ondes submillimétriques sous l'effet de l'expansion de l'Univers. Des télescopes anglo-néerlandais et américains, conçus pour les longueurs d'onde submillimétriques, fonctionnent en atmosphère sèche au sommet du Mauna Kea (îles Hawaïi). Leur vision se limite à des fenêtres couvrant certaines longueurs d'onde qui ne sont pas absorbées par l'atmosphère. Les instruments placés à bord de ballons ou d'avions navigant à haute altitude reçoivent, quant à eux, une quantité bien supérieure d'ondes cosmiques submillimétriques, et la NASA projette d'emporter régulièrement à bord d'un gros porteur un télescope infrarouge et submillimétrique de 2,5 mètres.

Le petit satellite SWAS de la NASA observe les émissions aux longueurs d'onde submillimétriques des nuages riches en molécules. La Suède, pour sa part, réalise aujourd'hui un télescope spatial baptisé Odin, appelé à fonctionner dans ces mêmes longueurs d'onde. Avec son télescope spatial de 3 mètres, FIRST aura un rendement supérieur à celui de toutes ces missions. En ce qui concerne les techniques de refroidissement, on peut concevoir et exploiter le télescope de façon qu'il rejette plus de chaleur dans l'espace qu'il n'en reçoit du Soleil et de la Terre. Cette technique passive, autorisant le maintien du télescope à -110° C, peut ensuite être complétée par d'autres méthodes. Dans le cas d'un instrument infrarouge britannique installé à bord du satellite d'observation de la Terre ERS-1 de l'ESA (1991), la température est abaissée à environ -190° C par un système mécanique connu sous le nom de refroidisseur Stirling, fabriqué depuis sous contrat de l'ESA, qui offre la possibilité de refroidir progressivement le matériel jusqu'à une température de -269° C, soit quatre degrés seulement au-dessus du zéro absolu. Pour FIRST, on envisage actuellement d'utiliser plus de huit refroidisseurs Stirling, d'autres systèmes cryogéniques étant chargés de porter les parties vitales des instruments à une température encore plus basse. Les astronomes espèrent que les techniques de refroidissement mises au point pour FIRST pourront ensuite être appliquées à d'autres télescopes spatiaux conçus pour un service de longue durée dans la partie principale de la bande infrarouge. Parmi les instruments candidats pourrait figurer un interféromètre infrarouge, comme c'est le cas dans l'une des options actuellement à l'étude pour Horizon 2000 Plus. Avec un minimum de deux télescopes fonctionnant ensemble, on pourrait obtenir dans l'infrarouge des images d'une netteté inégalée.



Cibles infrarouges. Les sources ponctuelles détectées par le satellite américano-néerlandais britannique IRAS (1983) sont concentrées dans le disque de la Voie lactée. Ce cliché correspond à la Voie lactée observée en lumière visible, dont on peut voir une petite partie ci-dessous. IRAS a procédé à une observation systématique du ciel. Pour sa part, le satellite ISO de l'ESA étudiera des objets présélectionnés, qu'il examinera de façon plus détaillée et avec une sensibilité cent à mille fois supérieure.

Cliché: Infrarouge: données IRAS traitées au centre NASA/IPAC; Visible: ESO



Ondes radio et rayonnement cosmologique dans les hyperfréquences

L'atmosphère terrestre est d'une merveilleuse transparence pour les longueurs d'ondes radio allant de 1 centimètre à 10 mètres. Les radioastronomes ne sont dérangés ni par les nuages ni par la lumière du jour, d'où le degré de priorité moindre qui a souvent été accordé à leurs demandes de missions spatiales. Les premiers engins spatiaux de radioastronomie dans les grandes longueurs d'onde, lancés par la NASA en 1963 et en 1973, ont donné quelques résultats préliminaires.

Depuis lors, les scientifiques se sont surtout intéressés à l'utilisation conjointe de radiotélescopes spatiaux et d'instruments au sol. Cette méthode permet en principe d'effectuer simultanément, à l'aide de télescopes très éloignés les uns des autres, des observations livrant des informations détaillées sur ce qui se passe au cœur d'une radiogalaxie. Les Russes et les Japonais conduisent des missions de ce type en coopération avec des radioastronomes européens. Une étude récente évoquait la possibilité d'un projet euro-russo-américain consistant à envoyer dans l'espace une antenne radio de 25 mètres couvrant les longueurs d'onde millimétriques, mais l'ESA n'a pas pris d'engagement dans le domaine de la radioastronomie spatiale classique.

Le rayonnement cosmologique dans les hyperfréquences, aux longueurs d'onde radar ou micro-ondes, pourrait être un sujet d'étude plus séduisant. Dans le domaine des ondes un tout petit peu plus longues que les ondes submillimétriques de FIRST, le ciel est inondé d'émissions radioélectriques à 1,9 millimètre (160 GHz) venant du fond du ciel, bien au-delà des galaxies les plus éloignées. La théorie prédominante veut que l'Univers soit issu d'une masse compacte et chaude née d'une explosion.

Autres messagers

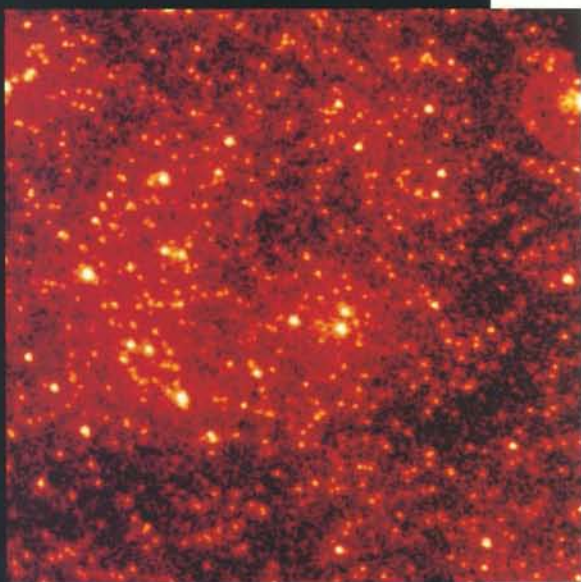
Au fur et à mesure de son expansion, l'Univers se refroidit et l'on suppose que les rayonnements observés aujourd'hui dans les hyperfréquences sont apparus lorsque des particules chargées ont pu s'associer pour former les premiers atomes. Pendant les années 80, les astronomes étaient impatients de détecter dans ce rayonnement fossile des "grumeaux" de matière relativement denses correspondant à des concentrations de gaz qui, en raison de leur force d'attraction gravitationnelle, se révéleraient propices à la formation de galaxies et d'étoiles. Le satellite soviétique Prognoz-9 (1983) emporta un radiotélescope fonctionnant sur 8 millimètres. Ce radiotélescope qui avait pour objectif de détecter des variations du rayonnement cosmologique micro-ondes n'en mit pas en évidence. Les théoriciens commencèrent à s'inquiéter sérieusement. Puis en 1992, le satellite COBE de la NASA décéla, par des méthodes statistiques, des inhomogénéités dans ce rayonnement sans toutefois discerner de façon sûre des "grumeaux". Les premières preuves fiables de l'existence de ces derniers furent apportées en 1994 par des radioastronomes britanniques et espagnols travaillant avec des instruments au sol. L'ESA a dans ses cartons un projet de satellite plus élaboré que le COBE, portant le nom de COBRAS/SAMBA et dont la bande de fréquence chevaucherait le pic du rayonnement cosmologique micro-ondes. Des émissions relativement intenses en provenance de la Voie lactée et d'autres sources et correspondant à la même bande de fréquence gênent la recherche des "grumeaux" de l'Univers primitif émettant dans le domaine des hyperfréquences. L'étude détaillée de ces émissions qui recouvrent les autres permettrait aux chercheurs d'évaluer de façon plus sûre la part qu'elles occupent dans le rayonnement global observé et d'obtenir une image plus nette du rayonnement cosmologique et de ses variations.

Le rayonnement électromagnétique, de type lumineux, du spectre de Maxwell n'est pas notre seule source d'information sur la composition et le comportement de l'Univers. D'autres messages nous sont également délivrés par des particules énergétiques subatomiques qui voyagent sous la forme de rayons cosmiques et qui proviendraient peut-être de l'explosion d'étoiles lointaines. Des échantillons de gaz et de poussières portés par une brise interstellaire pénètrent aussi dans le système solaire.

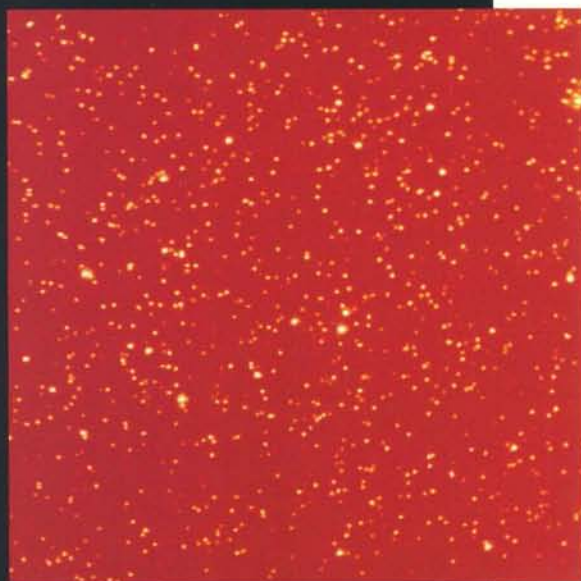
La sonde Ulysse de l'ESA, destinée à l'étude du Soleil, est équipée de détecteurs de rayons cosmiques, de gaz neutres et de poussières. Au cours de son survol des pôles solaires, elle nous renseigne sur la nature de ces messagers interstellaires et sur les effets qu'exercent sur eux le Soleil et le vent solaire. Au vu des résultats de cette mission, les astronomes seront mieux à même d'établir la composition des rayons cosmiques et du milieu interstellaire tels qu'ils se présentent avant d'entrer en contact avec le système solaire et d'être modifiés par ce dernier.

Un autre type de rayonnement baigne l'Univers. C'est du moins ce que croient les théoriciens, alors que les observateurs ne sont pas encore parvenus à le détecter directement. Il existe en effet une théorie selon laquelle les masses accélérées émettraient des ondes gravitationnelles qui se propageraient sous forme d'ondulations dans l'espace. L'ennui, c'est que les instruments au sol ne peuvent détecter que des ondes haute fréquence déclenchées par des événements rares de type cataclysmique, l'explosion d'une étoile par exemple.

Vision améliorée. Installée à bord du télescope spatial Hubble, la caméra pour objets faiblement lumineux de l'ESA pénètre ici au coeur d'un amas globulaire. On peut distinguer sur ce cliché de nombreux objets isolés, alors qu'un télescope terrestre n'aurait obtenu qu'une image floue. En raison du défaut optique dont il souffrait au départ, Hubble diffusait la lumière, notamment autour des objets lumineux. Le cliché ci-dessous montre les progrès accomplis depuis la mise en place du système de correction optique COSTAR. à l'intérieur de la figure: Filtre F220W - avant la mise en place du COSTAR



Avant la mise en place du COSTAR



Après la mise en place du COSTAR

Equipe de la Caméra
pour objets faiblement
lumineux, ESA et NASA

Les chercheurs européens espèrent réaliser un détecteur spatial d'ondes gravitationnelles pendant la deuxième décennie du siècle prochain, dans le cadre du programme Horizon 2000 Plus de l'ESA. Un projet actuellement à l'étude consisterait à utiliser des faisceaux laser pour mesurer de façon très précise la distance séparant des engins spatiaux situés à plusieurs millions de kilomètres l'un de l'autre. Cette technique devrait permettre de détecter de légères distorsions de l'espace engendrées par des ondes gravitationnelles basse fréquence issues de sources de type courant, des étoiles binaires proches par exemple. L'interaction étroite entre des étoiles effondrées très denses devrait également constituer une source importante de signaux détectables. Et tandis que le rayonnement cosmologique micro-ondes témoigne des événements les plus éloignés et les plus anciens accessibles au moyen des ondes électromagnétiques, son équivalent dans le domaine des ondes gravitationnelles pourrait nous permettre de remonter encore plus loin dans l'histoire de l'Univers.

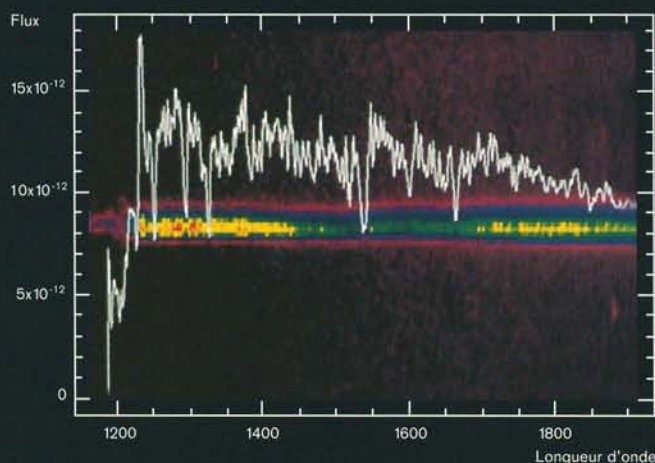
IUE: un vieux routier de l'ultraviolet

Lors du lancement du satellite d'astronomie dans l'ultraviolet IUE (International Ultraviolet Explorer) sur orbite terrestre en janvier 1978, Jimmy Carter était président des Etats-Unis, Léonid Brejnev dirigeait l'Union soviétique et le groupe de rock Abba occupait la première place du "hit-parade". IUE devait fonctionner trois ans. Or dix-sept ans plus tard, il refuse de rendre l'âme, ce qui éviterait aux partenaires de prendre la décision difficile de le mettre hors tension.

Fruit d'une collaboration tripartite entre la NASA, l'ESA et le gouvernement britannique, ce satellite a vu le jour grâce à la ténacité de Robert Wilson, un astrophysicien de Londres. Les astronomes se bousculent encore pour utiliser cet instrument qui n'a jamais cessé de fonctionner depuis son lancement.

IUE

Diagnostic d'une explosion stellaire. En 1993, une supernova fut détectée dans la galaxie M81 (Grande Ourse), relativement proche de la nôtre. 24 heures après sa découverte, le satellite IUE établit un spectre de son rayonnement ultraviolet (bande centrale). Convertissant ces données en énergie (en blanc), les astronomes estimèrent, au vu de la forme générale du spectre, que le gaz entourant la supernova rayonnait à la température de 22.500 degrés. La crête visible à l'extrémité gauche de l'enregistrement correspond à des atomes d'azote chauffés à environ 1 milliard de degrés par une onde de choc venant de la supernova.



IUE: caractéristiques techniques

Objectif

Spectres ultraviolets d'objets cosmiques

Gamme de longueurs d'onde

115 à 320 nanomètres Ouverture du
télescope
0,45 mètre

Agences responsables

NASA, ESA et PPARC (UK, ex-SERC)

Nom

IUE, pour International Ultraviolet
Explorer

Masse

0,7 tonne

Longueur

4,2 mètres

Lancement

26 janvier 1978

Lanceur

Delta (NASA)

Orbite

Périgée: 26 000 km ; apogée: 45 000 km;
inclinaison: 28° par rapport à l'équateur;
période: 23 h 56 mn

Exploitation

24 h par jour (16 h NASA, 8 h ESA)

Durée de vie

17 ans (au 26 janvier 1995)

Alimentation en énergie

Panneaux solaires

Le satellite est télécommandé depuis le centre Goddard de la NASA, près de Washington, et depuis la station de poursuite de Villafranca del Castillo près de Madrid. IUE fait en moyenne une observation d'une heure toutes les 90 minutes, vingt-quatre heures sur vingt-quatre.

Il intercepte le rayonnement ultraviolet qui n'est pas détectable par les télescopes au sol et rien n'échappe à son regard scrutateur, qu'il s'agisse des comètes les plus proches ou des quasars lointains.

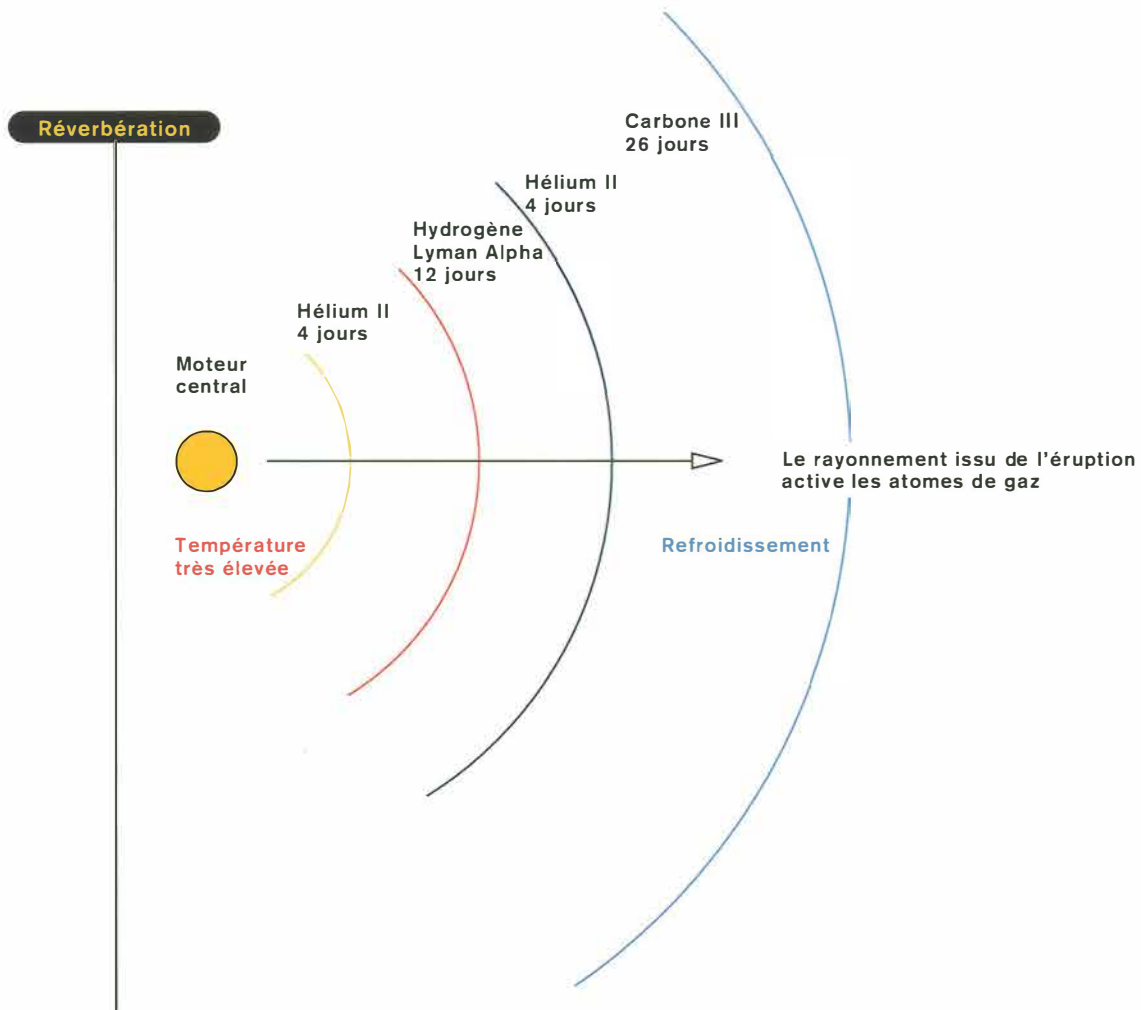
IUE est l'une des plus grandes réussites de la science spatiale à ce jour. Comparant IUE au télescope spatial Hubble, l'astrophysicien américain Freeman J. Dyson a pu parler d'un "petit miroir de 50 centimètres navigant discrètement dans le ciel et déversant des flots de données pendant que son grand frère n'était pas encore sorti d'une période de gestation difficile."

Au lieu de prendre des clichés d'une planète ou d'une galaxie, IUE analyse le spectre de son rayonnement ultraviolet pour identifier les longueurs d'onde de faible et de forte intensité. Un spectre peut sembler ésotérique à un profane. Est-ce pour cela que les résultats extraordinaires d'IUE n'ont pas été reconnus à leur juste valeur en dehors du cercle des astronomes?

Compte tenu d'une longévité cinq fois supérieure aux prévisions, le vénérable satellite connaît certaines faiblesses dues à l'âge. Ainsi, le morceau de ruban qui ballote actuellement dans le tube du télescope aurait pour effet de diriger les rayons solaires parasites vers les capteurs si les programmes d'observation n'étaient pas organisés de façon à orienter le télescope dans une direction bien différente de celle du Soleil.

L'acquisition des cibles se fait maintenant en mode aveugle grâce à la connaissance de leurs positions et à un pointage minutieux du télescope. Cette improvisation se montre efficace et l'on ne perd que quelques minutes d'observation par heure. Malgré la panne de quatre gyromètres sur un total de six, l'acquisition et le pointage sont toujours très précis. Les caméras de secours présentent des anomalies, mais les caméras principales demeurent parfaitement opérationnelles. Il reste suffisamment d'ergols dans les propulseurs pour que le satellite continue de fonctionner pendant encore quinze ans.

Que se passe-t-il au coeur d'une galaxie turbulente ?

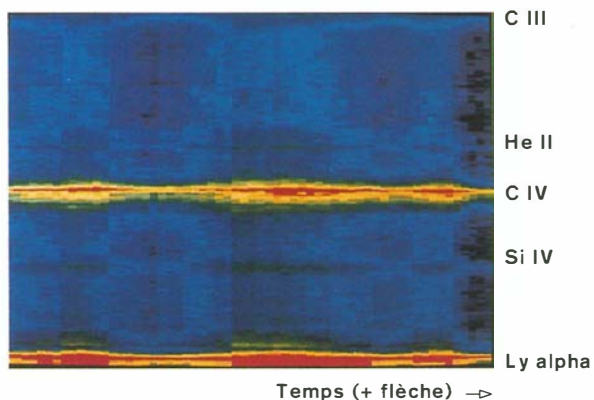


Comme le montre la campagne actuelle d'observation des galaxies actives, IUE continue d'envoyer des données qui se situent à la pointe de la découverte astronomique. Un grand nombre d'amas stellaires peuplant l'Univers lointain sont le siège de phénomènes explosifs et autres chocs. Les astronomes se sont longtemps interrogés sur la diversité des turbulences observées au sein des galaxies, qu'ils expliquent par la présence de trous noirs géants engloutissant le gaz présent dans leur voisinage.

Manifestement, une éruption qui a lieu à proximité d'un trou noir géant, que l'on peut qualifier de moteur central, se propage à travers le gaz environnant, entraînant l'activation de ce dernier dans un périmètre qui va s'élargissant. Comme le montre la figure ci-dessus, le carbone III, par exemple, s'intensifie 26 jours après le déclenchement d'une perturbation. Le rayonnement émis par le moteur central s'est propagé jusque dans une région relativement froide du milieu gazeux située à 26 journées-lumière, soit environ 700 milliards de kilomètres, ce qui est malgré tout très proche du centre si l'on se place à l'échelle de la galaxie.

La figure ci-dessous donne, de bas en haut, la répartition spectrale de l'émission ultraviolette de la galaxie variable NGC 5548, les grandes longueurs d'onde étant situées en haut. Les couleurs représentent l'intensité de l'émission à chaque longueur d'onde. A mesure que le temps s'écoule (de gauche à droite), le spectre change. Dans le cas présent, IUE a observé NGC 5548 à intervalles de quatre jours pendant huit mois. Les astronomes décodent ces messages "cryptés" en vue de reconstituer l'image du noyau turbulent de la galaxie. Ils commencent par identifier les émissions caractéristiques de certains éléments chimiques, qui correspondent également à différentes températures du gaz dans la galaxie. Puis ils constatent qu'il s'écoule plusieurs jours, voire plusieurs semaines, entre l'augmentation de la luminosité du spectre de fond continu et l'accroissement de l'intensité des éléments repérés.

Campagne IUE: variabilité de NGC 5548



L'observation intensive de NGC 5548 marqua, pour IUE, le début d'une campagne d'étude des galaxies actives à laquelle participèrent cinquante-sept astronomes de onze pays différents. Des phénomènes de propagation analogues furent mis en évidence dans d'autres galaxies actives. Les échelles de temps et les dimensions des régions émettrices peuvent varier considérablement, mais des galaxies actives très différentes semblent avoir des sources d'énergie similaires.

"Cette vaste série d'observations dans l'ultraviolet a pratiquement monopolisé IUE", constate Danielle Alloin, de l'Observatoire de Paris-Meudon. "Mais elle nous a permis d'étudier directement les moteurs centraux des galaxies actives. Désormais, nous sommes en mesure de vérifier les théories relatives aux noyaux actifs des galaxies en analysant les relations de cause à effet entre le moteur central et son milieu environnant."

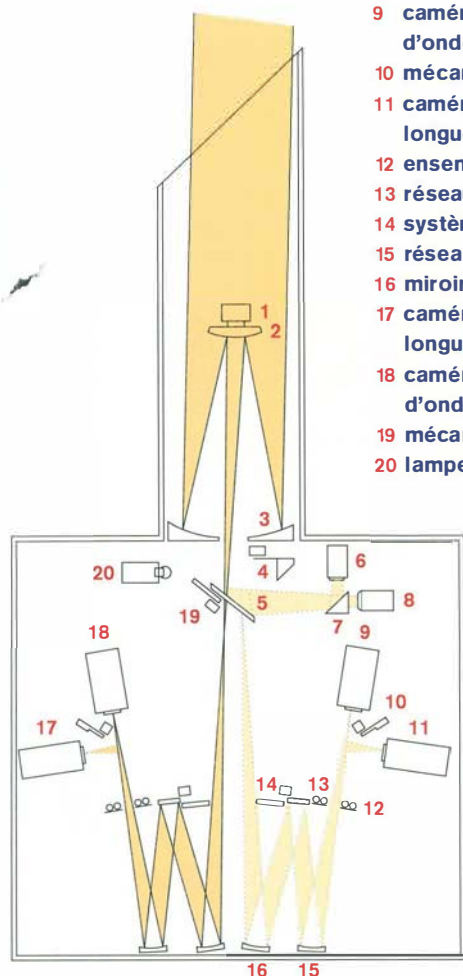
Exploitation "en direct" d'IUE. L'astronome est assis à la console de la station sol de l'ESA, située près de Madrid, et surveille les données transmises par le satellite. Il peut demander un réaménagement du programme d'observation afin d'améliorer les résultats.



Les joies de la spectroscopie ultraviolette

Système optique d'IUE

- 1 système de mise au point
- 2 miroir secondaire
- 3 miroir primaire
- 4 volet solaire avec miroir à 45° à l'arrière
- 5 platine d'ouverture avec lampes incorporées
- 6 détecteur n° 2
- 7 séparateur de faisceau
- 8 détecteur n° 1
- 9 caméra principale à courtes longueurs d'onde
- 10 mécanisme de sélection de la caméra
- 11 caméra supplémentaire à courtes longueurs d'onde
- 12 ensemble de 8 lampes UV au tungstène
- 13 réseau échelle
- 14 système de sélection du mode dispersif
- 15 réseau asphérique
- 16 miroir collimateur
- 17 caméra supplémentaire à grandes longueurs d'onde
- 18 caméra principale à grandes longueurs d'onde
- 19 mécanisme de sélection de l'ouverture
- 20 lampe d'étalonnage en longueur d'onde



L'astrophysique devint une science exacte en 1859, lorsque Gustav Robert Kirchhoff, de Heidelberg, expliqua à quoi correspondaient les raies de la lumière solaire, ces lignes sombres qui apparaissent à des longueurs d'onde bien définies lorsqu'on décompose la lumière du Soleil en un spectre de couleurs. Kirchhoff se rendit compte que ces raies étaient caractéristiques des composants chimiques de l'atmosphère solaire.

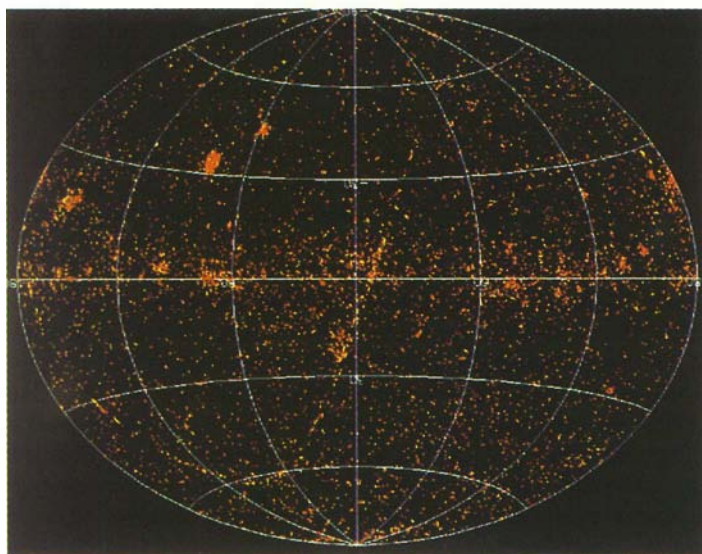
Etant donné que d'autres étoiles ont une composition différente de celle du Soleil, les astronomes apprirent à mesurer le mouvement, la température et le champ magnétique d'objets éloignés en fonction de leur influence sur les raies du spectre. C'est pourquoi la spectroscopie, à savoir la technique de l'analyse des spectres, a largement remplacé l'imagerie dans l'astronomie moderne.

La spectroscopie ultraviolette, spécialité du satellite IUE, ne peut se pratiquer qu'au-dessus de l'atmosphère terrestre, mais elle présente des avantages considérables. Les signatures les plus claires des éléments courants de l'Univers s'observent en effet dans l'ultraviolet. Les atomes d'hydrogène, par exemple, signalent leur présence avec le plus de vigueur dans la longueur d'onde des 121,6 nanomètres, dite raie Lyman alpha, où ils ont la propriété d'émettre ou d'absorber les rayons ultraviolets. Et les pics d'énergie radiative des étoiles et d'autres objets plus chauds que la surface du Soleil se manifestent eux aussi dans l'ultraviolet. IUE a confirmé ce que son prédécesseur, le satellite Copernicus de la NASA, avait découvert: même les petites étoiles froides ont des atmosphères chaudes émettant dans l'ultraviolet.

La NASA prend IUE en main seize heures par jour, et l'ESA huit heures. IUE est tellement sollicité que seul un postulant sur trois ou quatre a la chance de pouvoir l'utiliser. Des astronomes de toutes nationalités peuvent déposer une demande d'observation et deux comités scientifiques, l'un pour la NASA et l'autre pour l'ESA et le Royaume-Uni, sont chargés d'affecter le temps d'observation d'IUE en fonction de l'intérêt scientifique des demandes.

Le cycle d'observation classique est de six fois huit heures. Le candidat retenu prend la qualité d'observateur invité, comme tout astronome accueilli dans un grand observatoire perché au sommet d'une montagne. Assis devant la console de la station ESA de Villafranca aux côtés du spécialiste assurant la télécommande du

Un ciel bien rempli. Les étoiles et autres objets cosmiques observés par IUE au cours des quatorze premières années de sa mission forment un ensemble impressionnant. Les points rouges correspondent aux grandes longueurs d'onde de l'ultraviolet, et les points jaunes à des longueurs d'onde plus courtes. La concentration d'objets le long de la ligne médiane de cette carte panoramique de la voûte céleste correspond à la trace de la Voie lactée dans le ciel.



télescope, l'astronome peut facilement s'imaginer en communion directe avec les étoiles, à bord d'un véhicule spatial, affranchi des contraintes de l'atmosphère terrestre. L'astronome supervise les opérations de télécommande et voit arriver les résultats. Tout en respectant la liste de cibles approuvée préalablement par l'équipe IUE, il peut modifier la durée d'exposition ou la partie du spectre à examiner. IUE est le seul satellite d'astronomie à offrir aujourd'hui ce mode de fonctionnement pratique, de type interactif.

Après avoir regardé fixement sa cible pendant le laps de temps nécessaire pour absorber suffisamment d'énergie ultraviolette, IUE transmet ses résultats à la station sol. Le spectre analysé apparaît soit directement sous la forme d'une image de type "arc-en-ciel", soit sous la forme de courbes dessinées par ordinateur, donnant l'intensité du rayonnement dans chaque longueur d'onde. Le message ainsi transmis à l'astronome par une étoile ou par une galaxie lointaine dit ce qui suit: "Voici ma position, ma température, et ma vitesse de déplacement. Voilà certains de mes ingrédients. Et voilà encore un détail curieux qui ne manquera pas de vous rendre perplexe!"

Les observateurs sont propriétaires de leurs résultats pendant une période de six mois, au cours de laquelle ils s'emploient à les décrypter. Passé ce délai, les données sont emmagasinées dans les archives IUE tenues par chacun des trois partenaires. La consultation de ces archives fabuleuses sur l'Univers ultraviolet est ouverte à tous. En 1994, on dénombrait plus de 90 000 observations.

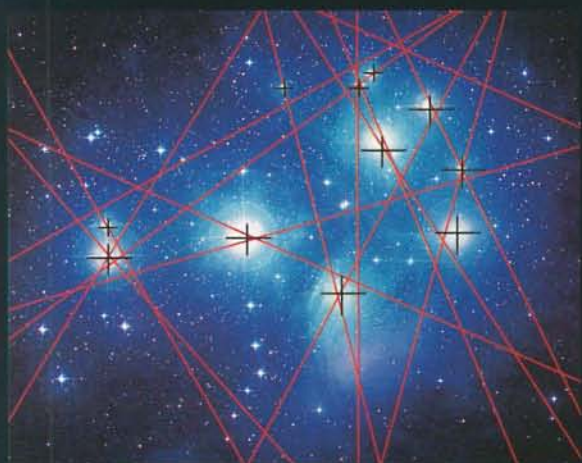
Une carrière riche en événements

L'afflux incessant de demandes d'observation n'empêche pas les responsables de la mission IUE de programmer des campagnes spéciales d'observation ni de réagir à des événements célestes. C'est ainsi qu'IUE fut, en septembre 1985, le premier à observer la comète de Halley dont le retour était attendu depuis si longtemps. Il détecta la signature ultraviolette des produits de décomposition de l'eau. Puis un programme américano-européen utilisa régulièrement IUE jusqu'en juillet 1986. Grâce à IUE, nous avons notamment appris que la comète de Halley avait perdu en 1986, en se rapprochant du Soleil, 300 millions de tonnes d'eau par vaporisation de ses glaces.

Début 1987, l'explosion d'une étoile fut détectée dans une galaxie voisine, le Grand Nuage de Magellan. Jamais les astronomes de l'ère moderne n'avaient observé de supernova aussi proche, et IUE fut - après les télescopes du Chili et de Nouvelle-Zélande responsables de cette découverte - le premier à examiner l'événement. En l'espace de 24 heures, tous les télescopes de l'hémisphère sud et de l'espace adaptés à de telles observations étaient braqués sur la supernova 1987A, nom sous lequel elle a été répertoriée. La comparaison des données d'IUE recueillies avant et après l'événement permit d'identifier exactement l'étoile qui avait explosé. Il s'agissait d'une étoile bleue et chaude qui émettait auparavant dans l'ultraviolet avec un fort éclat, ce qui déconcerta de nombreux astronomes convaincus que le type d'explosion observé se produit normalement dans une géante rouge (étoile froide). IUE détecta également des éléments chimiques éjectés dans l'espace sous l'effet de l'explosion, ainsi qu'un écho lumineux différé issu d'un ancien anneau de poussières entourant l'étoile. En s'appuyant sur l'observation ultérieure de cet anneau par le télescope spatial Hubble, les astronomes calculèrent que la supernova 1987A se trouvait à 169 000 années-lumière. A l'occasion d'un autre événement spectaculaire qui eut lieu sept ans plus tard, en 1994, IUE fit 180 observations de Jupiter en l'espace d'une semaine pour étudier l'impact des fragments de la comète Shoemaker-Lévy 9 sur la planète géante. En prévision de cette collision, IUE avait examiné Jupiter dans son état normal avec la plus grande attention. En analysant les modifications spectrales résultant des impacts, les astronomes purent identifier les atomes et les molécules mélangés et activés par la force et la chaleur des explosions. IUE se montra tout aussi efficace dans le cadre d'autres observations associant des télescopes spatiaux et au sol. Il participa récemment, aux côtés des satellites X Ginga (Japon) et Rosat (Allemagne/Etats-Unis/Royaume-Uni), à une campagne d'observation simultanée de nombreux objets émettant dans l'ultraviolet et le rayonnement X. Deux campagnes ont par ailleurs été menées sur des étoiles froides ordinaires et des galaxies actives. "Nous avons donné du fil à retordre aux théoriciens", déclare Willem Wamsteker, responsable scientifique du projet IUE de l'ESA. "Leurs scénarios devaient rendre compte des observations faites dans le rayonnement X ou dans l'ultraviolet, mais en fait ils ne fonctionnaient pas. Il faut donc qu'ils revoient la question. C'est ainsi que l'astrophysique progresse."

Hipparcos: l'aspect du ciel

L'exploitation du satellite Hipparcos de l'Agence spatiale européenne a pris fin en août 1993, mais la mission se poursuit à un rythme trépidant dans les ordinateurs européens. Hipparcos s'est attaqué à la question la plus rudimentaire, et pourtant la plus épineuse de l'astronomie: quelle est la position des différentes étoiles? Il ne fait pas de doute que les milliards de données déversées par le satellite nous apporteront la réponse, et des calculs d'une envergure sans précédent dans l'histoire de l'astronomie sont en cours pour corréler toutes ces données. Quant ce travail de dentelle aura été vérifié dans ses moindres détails, nous connaîtrons enfin l'aspect exact du ciel.



HIPPARCOS

Les Pléiades passées au peigne fin. Le télescope d'Hipparcos balaya des centaines de fois ce célèbre amas ouvert afin de mesurer le mouvement de ses étoiles qui s'éloignent les unes des autres à partir d'un point d'origine commun. Les astronomes pourront calculer de façon plus précise l'âge des Pléiades ainsi que la direction et la vitesse de déplacement de l'amas par rapport au centre de la Voie lactée.
Cliché: Royal Observatory (Edimbourg) et Anglo Australian Telescope Board

Pour les astronomes, le ciel a la forme d'une sphère céleste imaginaire dans laquelle la position d'une étoile est repérée par deux angles, comme c'est le cas pour la latitude et la longitude géographiques. Mais les étoiles bougent, et la Terre elle-même est comme une toupie qui tourne et qui vibre. De plus, son atmosphère déplace les images des étoiles et les fait trembler; et la pesanteur déforme légèrement les miroirs des télescopes. D'un observatoire donné, on ne peut voir qu'une fraction de la voûte céleste, et lorsqu'on s'efforce d'assembler les différents morceaux du puzzle, il n'est pas possible d'obtenir des raccords parfaits. Ces erreurs s'ajoutent les unes aux autres et déforment la surface de la sphère céleste théorique en y créant des creux et des bosses artificiels. Lorsque les experts dressèrent - avant le lancement d'Hipparcos - le catalogue d'entrée des 120 000 étoiles à observer, ils constatèrent que les astronomes connaissaient leur position avec une précision de 1/7000ème de degré. Hipparcos, lui, atteint une précision supérieure au millionième de degré. Les équipes chargées de la réduction des données recherchent une "solution globale sur la sphère" dans laquelle toutes les positions sont déterminées de façon cohérente avec un très haut degré de précision.

Hipparcos: caractéristiques techniques

Objectif

mesurer la position, la distance et le mouvement des étoiles

Gamme de longueurs d'onde

375-750 nanomètres

Diamètre du télescope

0,29 mètre

Agence responsable

ESA

Nom

acronyme de HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite, qui rappelle aussi le nom de l'astronome grec Hipparque (190-120 av. J.-C.)

Maître d'oeuvre

Matra Marconi Space, France, associé à Aeritalia, Italie

Masse

1,14 tonne

Lancement

8 août 1989

Lanceur

Ariane 4

Orbite

Périgée: 560 km, apogée: 35.900 km; inclinaison: 6,8°; période: 10 h 40 mn

Vitesse de rotation

une rotation en 128 min

Stations sol

Odenwald, Goldstone (NASA), Perth (ESA), Kourou (CNES)

Date de clôture de la mission

24 juin 1993

Hipparcos était un satellite de taille moyenne, tout juste équipé d'un petit télescope observant dans le domaine usuel de la lumière visible. Pourtant, il s'agit de la mission la plus imaginative que l'astronomie spatiale ait conçue depuis ses récents débuts. A l'échelle de la longue histoire de la contemplation des étoiles, elle se compare aux observations du Grec Hipparque, au II^e s. av. J.-C., et du Danois Tycho Brahé, au XVI^e siècle, qui révolutionnèrent tous deux la vision que l'homme avait de l'Univers. Alors que les autres missions spatiales se soldent par l'ajout de quelques chapitres importants dans des livres d'astrophysique de haut niveau, Hipparcos a purement et simplement rendu caducs les manuels scolaires de base.

Cette mission s'est inspirée d'une idée française. En 1966, le Strasbourgeois Pierre Lacroute avait fait remarquer qu'un satellite pouvait trianguler le ciel de la même façon qu'un géomètre mesure des distances avec précision par triangulation entre deux élévations du relief. Un télescope spatial doté en quelque sorte d'un regard divergent devait pouvoir regarder les étoiles dans deux directions à la fois et mesurer leur écart angulaire.

Dans un premier temps, cette proposition suscita peu d'intérêt. Les astrophysiciens, occupés à "chasser le trou noir", laissaient aux techniciens le soin d'arpenter le ciel. Les astrométristes eux-mêmes, qui érigeaient cette activité en discipline scientifique, se sentaient hors du courant de la mode dans les années 60. Les progrès de l'astrométrie n'en préparèrent pas moins le terrain à Hipparcos. Les cercles méridiens - lunettes d'astrométrie spécialisées - furent équipés de compteurs électroniques de photons, et l'on enregistra d'autres innovations comme la cartographie photographique du ciel et les calculateurs numériques. Certains chercheurs se demandèrent si l'idée de Lacroute était suffisamment ambitieuse. Celui-ci projetait en effet de dresser par satellite la carte d'un réseau restreint de 700 étoiles. Grâce aux efforts entrepris par d'autres astrométristes français, le projet en question fut pris en considération par l'ESA au milieu des années 70. Celle-ci invita alors la communauté scientifique à formuler des idées plus audacieuses et à entamer un échange de vues fructueux. Des chercheurs scandinaves firent des propositions intéressantes sur les possibilités d'élargir la portée de la mission.

Ce qui avait commencé comme un exercice élémentaire de géométrie cosmique se transformait en une étude exhaustive de la région locale de la Galaxie. Soutenu avec enthousiasme par les astrométristes européens, le projet Hipparcos sortit vainqueur de la compétition organisée par l'ESA, évinçant d'autres missions d'astrophysique apparemment plus fascinantes.

Comment les étoiles se déplacent-elles?

“Dès la publication de nos résultats définitifs, nous apprendrons beaucoup de choses intéressantes sur la Galaxie, sur sa structure et son évolution”. Tel est le sentiment de Michael Perryman, responsable scientifique du projet Hipparcos à l'ESA.

Tout ce que nous savons de la place de la Terre dans la Voie lactée, nous le devons à l'observation des étoiles qui nous entourent. Parmi les étoiles les plus brillantes, certaines sont de modestes objets relativement proches de nous; d'autres sont d'énormes astres beaucoup plus éloignés. Pour la plupart, ces étoiles accompagnent le Soleil dans sa longue course orbitale autour du centre de la Galaxie.

Elles ne forment pas pour autant un groupe bien discipliné. Certaines se rapprochent furtivement du Soleil, d'autres au contraire s'en éloignent hâtivement. Les mouvements de ces objets vers nous ou en sens opposé se mesurent facilement au décalage vers le rouge ou vers le bleu de raies faciles à reconnaître. Mais les mouvements, dans le plan du ciel, sont plus difficiles à mesurer.

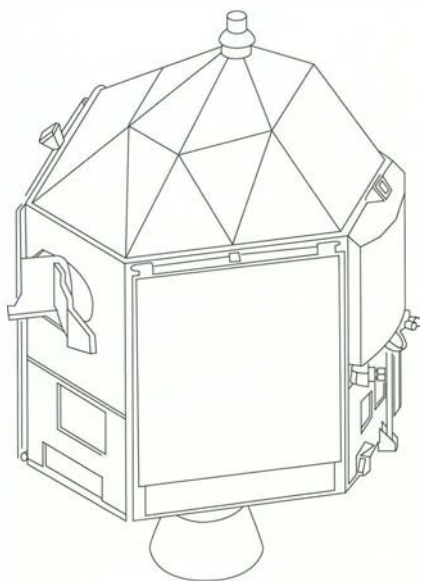
Mouvements stellaires



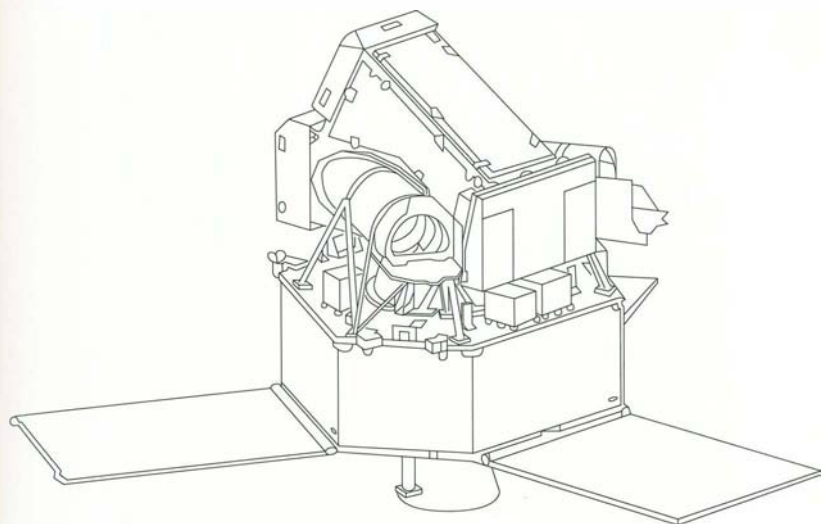
Maintenant qu'Hipparcos a observé une bonne partie des étoiles situées dans un rayon de 250 années-lumière, nous pouvons reconstituer une image vivante de notre environnement stellaire. Les experts essaieront de déterminer si certaines étoiles passent à proximité du Soleil. Si une étoile proche est entourée de planètes de forte masse, il est possible qu'Hipparcos décèle de légères oscillations dans son mouvement du fait des planètes gravitant autour d'elle.

Les étoiles naissent dans des amas, et la trace de leur origine se manifeste par un même mouvement à travers la Galaxie. Peut-être découvrirons-nous une étoile jumelle du Soleil! Hipparcos mettra certainement en évidence un lien de parenté entre certaines étoiles et les étoiles brillantes de la Grande Ourse, qui appartiennent à un groupe en cours de dislocation. Hipparcos a également observé de nombreuses étoiles bleues et chaudes, lumineuses, qui forment une sorte d'anneau autour du ciel, appelé "Ceinture de Gould". Il est possible que ces étoiles bleues se soient formées à partir d'un anneau de gaz rejeté vers l'extérieur d'un amas d'étoiles massives ayant explosé rapidement les unes après les autres.

Dans des amas ouverts tels que les Pléiades, les étoiles apparentées sont restées très proches les unes des autres. Pour des dizaines d'amas ouverts, l'analyse des mouvements permettra de déterminer leur âge, leur vitesse et leur trajectoire à travers la Galaxie. L'âge des amas ouverts variant de quelques millions à plusieurs milliards d'années, on pourra ainsi déterminer si les mouvements à travers la Voie lactée ont changé. En visant vers le centre de la Galaxie et dans la direction opposée, Hipparcos a pu déterminer les vitesses des étoiles sur leurs orbites à différentes distances du centre. Il a également observé les étoiles qui s'aventurent hors du disque aplati de la Voie lactée, et des étoiles appartenant au "halo", dont les orbites sont indépendantes du disque. Ce sont là quelques-uns des moyens employés par Hipparcos pour affiner l'image que nous avons de notre Galaxie.



Mauvaise orbite



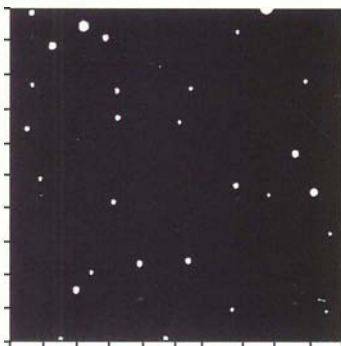
Hipparcos. En haut: le satellite tel qu'il se présentait au moment du lancement. En bas: la disposition du télescope et de ses instruments. Onze pays européens ont participé à sa construction. La maîtrise d'oeuvre et la réalisation des instruments ont été confiées à Matra (France), l'intégration et les essais du satellite à Aeritalia (Italie).

Le lancement d'Hipparcos le 8 août 1989 par une fusée Ariane 4 et son injection sur une orbite de transfert se déroulèrent sans problème. Le satellite fut ensuite pris en mains par le Centre européen d'opérations spatiales de Darmstadt (Allemagne), qui devait allumer son moteur d'apogée afin de le conduire à plus haute altitude, sur une orbite géostationnaire circulaire de 24 heures. Sur cette orbite, le satellite allait rester à poste au-dessus de la même région du globe terrestre, comme les satellites de météorologie Météosat.

Le moteur d'apogée refusa malheureusement de s'allumer. L'ESOC fit alors tout son possible pour sauver la mission, d'abord en empêchant que le satellite ne repasse constamment à 200 kilomètres de la Terre où l'atmosphère, si ténue soit-elle, n'aurait pas tardé à le désintégrer. En allumant les propulseurs à hydrazine du satellite, les ingénieurs réussirent à relever son périégée à 500 kilomètres, distance moins dangereuse. Son apogée était de 36 000 kilomètres et sa période orbitale de 10,7 heures. La station allemande d'Odenwald, unique station sol chargée de suivre Hipparcos en permanence, ne pouvait plus voir le satellite que sept heures par jour. L'ESA fit alors appel à sa station sol de Perth en Australie et à la station NASA de Goldstone en Californie, ce qui multiplia par deux le temps des opérations. Pour d'autres satellites d'astronomie, le passage sur une mauvaise orbite aurait pu entraîner de graves problèmes d'organisation du programme d'observation. Hipparcos, en revanche, conçu pour balayer l'ensemble du ciel, pouvait se contenter de faire ses mesures dans n'importe quelle séquence, de n'importe quelle position et à n'importe quel moment.

Hipparcos traversait deux fois par jour les ceintures de radiation dont les protons énergétiques pouvaient à tout moment endommager un système électrique vital. Ces protons eurent pour effet de détériorer progressivement les panneaux solaires qui alimentaient le satellite en énergie électrique. Les ingénieurs se disaient qu'avec un peu de chance, le satellite pourrait fonctionner trois ans. Le résultat dépassa les espérances. En juin 1993, toutefois, le centre de contrôle de la mission constata qu'il ne pouvait plus communiquer avec l'ordinateur de bord et s'efforça, pendant presque deux mois, de réactiver le cerveau du satellite. La mission fut officiellement arrêtée en août.

Références de position.
Mesures au sol: 28 étoiles



Hipparcos: 71 étoiles
Astrométrie: $\pm 0,002$ seconde d'arc
Photométrie: $\pm 0,003$ mag

Références de luminosité apparente.
Mesures au sol: 15 étoiles



Tycho: 389 étoiles
Astrométrie: $\pm 0,03$ seconde d'arc
Photométrie: $\pm 0,03$ mag (B et V)

Moisson abondante. Grâce aux nouveaux catalogues Hipparcos et Tycho, le nombre d'étoiles de référence utilisables pour leurs positions (astrométrie) et pour leurs luminosités apparentes (photométrie) va être considérablement accru. Les clichés ci-dessus représentent un carré de 5 degrés dans la Grande Ourse. Cliché: E. Hög (Copenhague) et consortium TDAC

Vision panoramique

Quel était le travail d'Hipparcos? Tournant lentement sur lui-même en deux heures, il balayait de grands cercles sur la sphère céleste. Au fil des saisons et des années, ces cercles se recoupèrent les uns les autres en de nombreux points, formant des entrelacs complexes comparables à ceux d'une pelote de laine. Chacune des étoiles visée s'est retrouvée environ 300 fois dans l'un ou l'autre de ces cercles. Les deux tubes de visée du télescope observaient simultanément deux régions du même cercle séparées de 58 degrés. Si vous voulez comprendre pourquoi Hipparcos "voyait double", imaginez la scène suivante: la Terre décrit son orbite autour du Soleil; la direction de visée des étoiles très proches change par suite de l'effet dit "de parallaxe", tandis que la position des étoiles lointaines n'est pas modifiée. Dans la constellation du Lion, par exemple, elles semblent se déplacer vers l'est en décembre et vers l'ouest en juin. Les astronomes se servent de cette parallaxe pour mesurer la distance d'une étoile. Mais les objets célestes situés dans une même région du ciel ont tous un déplacement apparent dans la même direction au cours d'une même saison, de sorte qu'ils ne constituent pas de bons repères les uns pour les autres.



Le coeur du satellite. Un ingénieur procède ici à des essais optiques sur le miroir mélangeur de faisceaux, qui a permis au télescope d'observer simultanément des étoiles dans deux champs du ciel. Les surfaces de ce miroir ont été polies de façon à fournir, en association avec un miroir sphérique, des images d'une grande netteté.

Amas ouvert. Les étoiles de NGC 2516 étant bien distribuées dans le ciel, Hipparcos a pu déterminer leur position relativement facilement.

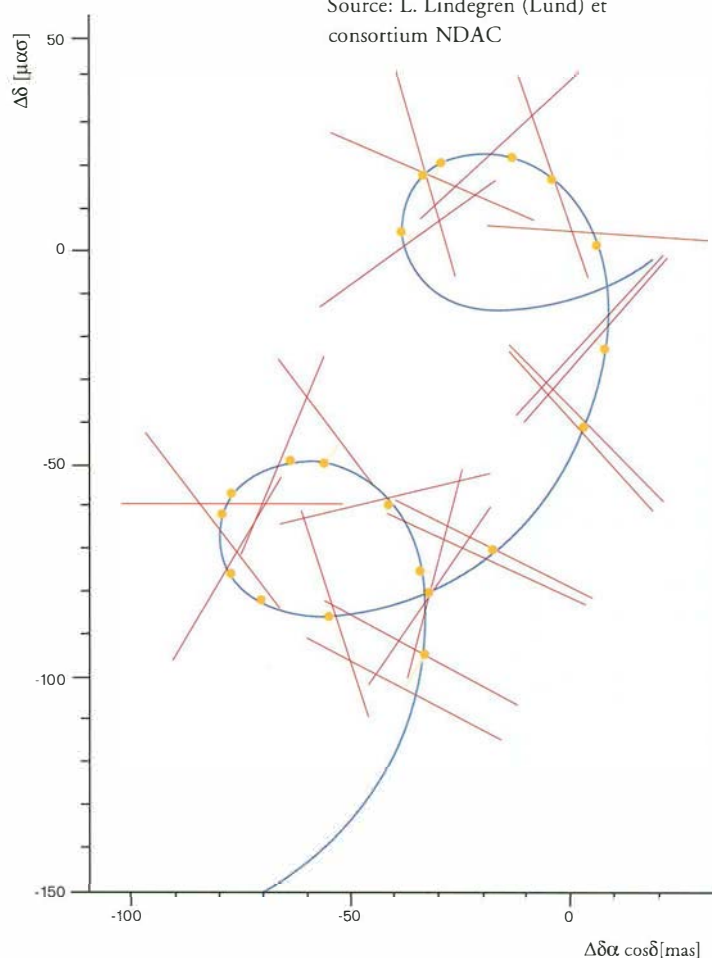


Il vaut mieux effectuer des comparaisons avec des étoiles situées dans des directions tout à fait différentes, par exemple à 60 degrés. Mais comme le choix d'une fraction simple de cercle ($1/6$) peut avoir des conséquences mathématiques fâcheuses, les astronomes ont choisi un angle de 58 degrés pour Hipparcos. Un miroir sphérique unique de 29 centimètres de diamètre recevait la lumière des étoiles renvoyée par deux miroirs faisant un angle constant entre eux. Ces deux miroirs étaient taillés de façon à former, en association avec le miroir sphérique, des images très nettes des champs visés, qui se superposaient sur un détecteur électronique appelé "dissecteur d'image". Chaque image représentait une portion de ciel d'environ 1 degré sur 1 degré, et contenait en permanence trois ou quatre étoiles cibles. Grâce à la rotation du satellite sur lui-même, ces étoiles traversaient lentement le champ de visée. Une "grille" comprenant de nombreuses fentes fines, placée en avant du détecteur, permettait de déterminer la position d'une étoile: l'illumination successive des différentes fentes produisait un effet comparable à un vernier. Le dissecteur d'image observait les étoiles les unes après les autres et fournissait avec une égale précision les positions relatives des étoiles d'un même champ, et celles de l'autre champ séparé de 58 degrés. On mesurait également la brillance de chaque étoile. Tandis que l'instrument principal était occupé à détecter les 120 000 étoiles cibles figurant sur sa liste, un deuxième instrument avait pour mission de relever les coordonnées d'un million d'étoiles. Ce repère d'étoiles, qui utilisait un système de grille plus simple pour établir sans calculs élaborés la position approximative des étoiles, permettait au satellite de déterminer son orientation dans l'espace. Mais après traitement, ses données constituèrent un catalogue distinct, dit "Catalogue Tycho". Les coordonnées de ce dernier sont moins précises que celles du Catalogue fondamental Hipparcos, mais bien meilleures que toutes les mesures faites au sol. "Cela me gêne un peu", déclare Erik Hög, de Copenhague, qui a conçu l'expérience Tycho et participé à l'expérience principale. "Je me suis demandé comment mes amis astrométristes pourraient participer au projet Hipparcos avec leurs cercles méridiens. Cette idée m'est venue lorsque j'ai compris que notre petit repère d'étoiles en orbite pouvait les mettre au chômage, au moins pour les étoiles les plus brillantes."

Calculer la distance et la vitesse d'une étoile. Le graphique ci-dessous montre un exemple du traitement des données d'Hipparcos pour différentes observations d'une étoile sur une période de deux ans.

Chaque observation a conduit à déterminer un ensemble de positions possibles représentées par une ligne rouge. L'ordinateur a ensuite déterminé la trajectoire (en bleu) et les positions réelles (points jaunes) compatibles avec les données et les dates d'observation. Les boucles sont dues au mouvement décrit par Hipparcos - et par la Terre - autour du Soleil, mouvement qui a pour effet de modifier la ligne de visée et, par la suite, la direction apparente de l'étoile. Le diamètre des boucles donne la distance de l'étoile (90 années-lumière). La distance parcourue en diagonale à travers le ciel montre que cette étoile se déplace latéralement à 10 kilomètres par seconde, par rapport au Soleil. Le programme Hipparcos dans son ensemble totalise des centaines d'observations pour chaque étoile présélectionnée.

Source: L. Lindegren (Lund) et consortium NDAC



Résultats

Hipparcos était encore en service lorsque le traitement de ses données commença. La série principale des 120 000 étoiles du Catalogue Hipparcos a été confiée à deux consortiums européens travaillant indépendamment l'un de l'autre. Ils utilisent des méthodes mathématiques différentes et procèdent à la vérification mutuelle de leurs résultats. Un autre consortium prépare actuellement le Catalogue Tycho, réunissant pour sa part un million d'étoiles. Dès la fin de ces travaux, début 1996, les astrométristes étroitement associés à l'élaboration de ces catalogues auront la primeur des découvertes. Un an plus tard, l'ESA ouvrira l'accès de ces catalogues à tous les astronomes, qui disposeront alors d'un système de référence céleste d'une extrême précision, dépourvu de toute erreur d'origine terrestre. Toutes les positions astronomiques ainsi que toutes les mesures terrestres basées sur les étoiles seront alors définies par référence au ciel d'Hipparcos. Ainsi, le télescope spatial Hubble utilisera, pour déterminer les positions des quasars et des galaxies (objets trop faibles pour Hipparcos), les étoiles d'Hipparcos situées juste devant. Il prolongera ainsi l'influence de cette mission d'astrométrie jusque dans l'Univers lointain. Hipparcos aurait identifié des milliers d'étoiles binaires (deux étoiles gravitant l'une autour de l'autre) jusqu'alors inconnues, ainsi que des dizaines de milliers d'étoiles variables (étoiles dont l'éclat varie). En outre, il a mesuré pour la première fois et de façon précise les distances de dizaines de milliers d'objets, faisant ainsi passer de 100 à 1000 années-lumière la distance jusqu'à laquelle on peut utiliser la méthode de la parallaxe trigonométrique. Les astronomes utilisent les étoiles variables appelées céphéides pour mesurer la distance des galaxies. Les mesures conjuguées de variabilité et de distance faites par Hipparcos viendront aussi à l'appui du système de référence aux céphéides utilisé pour estimer l'échelle et l'âge de l'Univers.

La liste d'observations contient entre autres des étoiles émettrices de rayons X, des étoiles géantes éjectant des nuages de gaz ou de poussière, des étoiles en voie d'extinction et d'autres en train de naître. Jusqu'ici, la distance de ces objets, et donc l'énergie qu'ils émettent, relevaient de la pure spéculation. En outre, le mouvement des étoiles détectées par Hipparcos anime le firmament qui nous est si familier. Chacune des étoiles apparemment immobiles du ciel nocturne suit sa propre trajectoire à travers la Voie lactée, trajectoire qui dépend de son lieu de naissance ainsi que de la constitution et de la dynamique de notre Galaxie. Jean Kovalevsky, de Grasse (France), qui fut l'un des moteurs de la conception et de l'exécution de la mission ainsi que du traitement de ses données, se souvient que "certains trouvaient la mission Hipparcos trop difficile pour l'Europe. D'autres la jugeaient terne comparée à d'autres missions d'astrophysique plus séduisantes". "Les premiers détracteurs cités peuvent déjà rougir de ce qu'ils ont avancé", ajoute Kovalevsky, "et je suis convaincu que les autres éprouveront le même embarras lorsqu'ils constateront l'impact de nos résultats sur tous les domaines de l'astrophysique, de la planétologie à la cosmologie."

Consortiums assurant le traitement des données de Hipparcos

INCA (INput Catalogue)

Catalogue d'entrées

Responsable

C. Turon, Meudon

avec la participation de plusieurs instituts
en Allemagne, en Belgique, au Danemark,
en Espagne, aux Etats-Unis, en France, aux
Pays-Bas, au Royaume-Uni et en Suisse

Centre principal de traitement des données

OPM, Meudon

FAST (Fundamental Astronomy by Space Techniques)

Catalogue Hipparcos

Responsable

J. Kovalevsky, Grasse

avec la participation de plusieurs instituts
en Allemagne, aux Etats-Unis,
en France, en Italie et aux Pays-Bas

Principaux centres de traitement des données

CERGA Grasse, CNES Toulouse,
ARI Heidelberg, CSS Turin,
SRON Utrecht, TU Delft

NDAC (Northern Data Analysis Consortium)

Catalogue Hipparcos

Responsable

L. Lindegren, Lund

avec la participation de plusieurs instituts
au Danemark, au Royaume-Uni et
en Suède

Principaux centres de traitement des données

RGO Cambridge, CUO Copenhague, LO Lund

TDAC (Tycho Data Analysis Consortium)

Catalogue Tycho

Responsable

E. Høg, Copenhague

avec la participation de plusieurs instituts
en Allemagne, au Danemark, aux Etats-Unis,
en France, en Italie, au Royaume-Uni, en Suède et
en Suisse

Principaux centres de traitement des données

CDS Strasbourg, AIT Tübingen,
ARI Heidelberg, CUO Copenhague

Hubble: la transparence de l'espace-temps

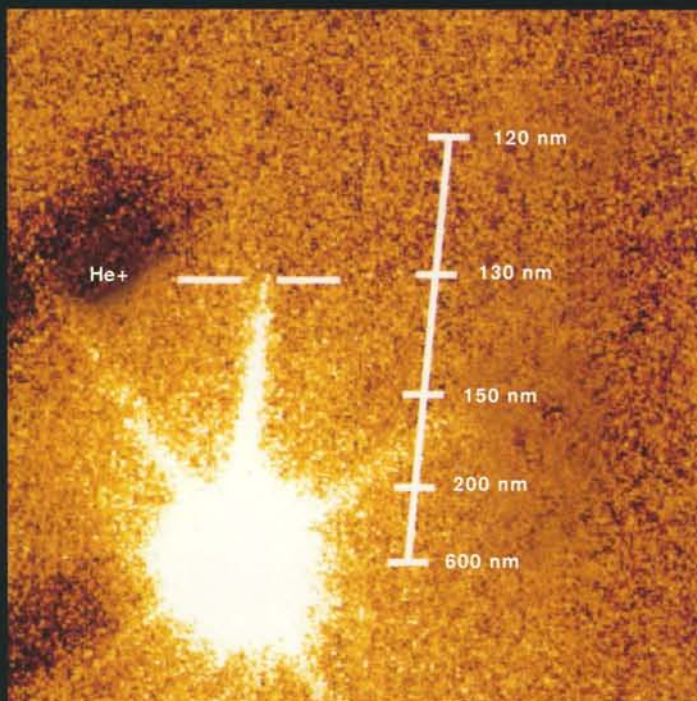
Ce sont les turbulences de l'air qui font scintiller les étoiles. L'Univers est magnifiquement transparent pour la lumière visible, qui accomplit un voyage de plusieurs milliards d'années à travers l'espace-temps. Mais dans les dernières microsecondes qui précèdent son impact sur les miroirs des télescopes au sol, cette lumière doit passer par les méandres de l'atmosphère, ce qui a pour effet d'altérer la qualité de l'image que nous recevons du cosmos.

Le lancement de Hubble eut lieu en avril 1990. Ce grand télescope spatial observant dans le domaine visible fut mis en orbite au-dessus de l'atmosphère pour éviter la difficulté précitée. Mais Hubble est aussi le plus grand instrument ultraviolet jamais envoyé dans l'espace, où il peut capter des longueurs d'onde complètement bloquées par l'atmosphère.

HUBBLE

Découverte de l'hélium primitif. Une équipe de l'ESA a utilisé un prisme de la caméra pour objets faiblement lumineux de Hubble pour obtenir le spectre du rayonnement émis par un quasar lointain (ligne quasi-verticale).

L'extinction abrupte de ce rayonnement dans l'ultraviolet à 130 nanomètres révèle la présence d'atomes d'hélium ionisés dans l'espace intergalactique.



Télescope Hubble: caractéristiques

Objectif

observation détaillée de l'Univers en lumière visible et dans l'ultraviolet

Gamme de longueurs d'onde

110-1000 nanomètres

Agences responsables

NASA (85%) et ESA (15%)

Nom

du nom de l'astronome américain
Edwin Hubble (qui découvrit vers 1930 que
l'Univers était en expansion)

Masse

11,6 tonnes

Lancement

avril 1990

Lanceur

navette spatiale américaine Discovery

Réparation et maintenance

décembre 1993

Véhicule utilisé pour la réparation et la maintenance

navette spatiale américaine Endeavour

Durée de vie prévisionnelle

15 ans

Alimentation en énergie

panneaux solaires

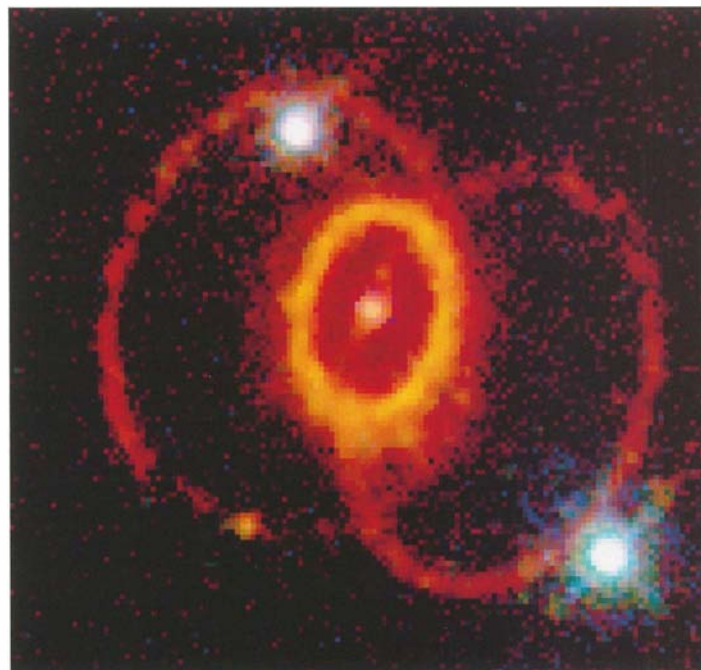
Si tout s'était bien passé pour Hubble, ses premiers exploits scientifiques seraient déjà relatés dans un manuel fièrement intitulé "L'astronomie à l'ère de Hubble". Malheureusement, son miroir principal de 2,4 mètres souffrait d'une malformation. En décembre 1993, les astronautes réussirent à corriger ce défaut d'optique sous le regard fasciné de millions de téléspectateurs.

Depuis cette intervention, les résultats de Hubble sont dévoilés au rythme prudent des publications scientifiques officielles. Il est donc encore temps de rappeler qu'il fallut quarante mois de dur labeur pour tirer le meilleur parti possible de cet instrument handicapé, et de souligner le rôle joué par les astronomes européens pendant cette phase difficile.

En sa qualité de partenaire de la NASA dans le cadre du projet Hubble, l'Agence spatiale européenne (ESA) a fourni la caméra pour objets faiblement lumineux (l'un des deux instruments imageurs), les panneaux solaires assurant l'alimentation électrique du véhicule spatial, ainsi qu'une équipe de chercheurs et d'ingénieurs mis à la disposition du Space Telescope Science Institute de Baltimore (Etats-Unis). La NASA promettait en contrepartie 15 % du temps d'observation aux astronomes des pays membres de l'ESA. En 1993, ce pourcentage a atteint 20 % en raison de la qualité des programmes menés par les Européens. Au Centre européen de coordination du télescope spatial de l'Organisation européenne pour des Recherches astronomiques dans l'Hémisphère austral (ESO) situé à Garching (Allemagne), du personnel de l'ESA et du personnel de l'ESO collaborent à la fourniture de services additionnels aux astronomes européens.

Voici maintenant un aperçu succinct de la mission, exposé du point de vue européen.

Anneaux entourant une supernova.
En 1994, le télescope spatial Hubble
découvrit ce curieux motif dans le
Grand Nuage de Magellan, à
l'endroit où avait explosé, sept ans
plus tôt, une supernova. Ce cliché a
été pris par la caméra planétaire à
grand champ n 2. Le petit anneau se
compose de gaz éjecté par l'étoile.
Les grands anneaux pourraient être
"tracés" sur de grandes bulles de gaz
par des faisceaux de rayonnement
issus d'une étoile compagnon.
Cliché: C. Burrows (ESA/STScI),
NASA et ESA



Des réussites malgré des temps difficiles

Le défaut de polissage du miroir principal de 2,4 mètres passa inaperçu avant le lancement. Hubble se trouvait déjà dans l'espace quand les astronomes se rendirent compte qu'il était impossible d'obtenir une image parfaitement nette. Pendant l'été 1990, il sembla que les clichés du télescope spatial n'étaient pas meilleurs que d'autres. Le problème des perturbations atmosphériques était en fait remplacé par un problème d'aberration sphérique, dû à une erreur humaine, et la situation dérouta de nombreux astronomes américains.

Leurs collègues européens relevèrent le défi. Avec la caméra pour objets faiblement lumineux de l'ESA, ils constatèrent la présence de sources lumineuses ponctuelles beaucoup plus nettes sur des images sous-exposées. Léon Lucy, membre de l'ESO, à Garching (Allemagne), était au fait d'une manipulation mathématique, connue sous le nom de déconvolution, permettant de traiter les images et de corriger en partie l'aberration. Cette méthode fut constamment affinée au fil des mois, jusqu'à la remise en état du télescope. Et il faut dire que malgré son infirmité, le télescope transmet des résultats qui inspirèrent des centaines d'articles scientifiques.

Avec la caméra planétaire à grand champ (WFPC), des astronomes de Leyde (Pays-Bas) découvrirent un grand disque de poussières entourant ce qu'ils supposaient être un trou noir géant. Ils purent également distinguer la forme linéaire, étrange, de la galaxie visible la plus éloignée. D'autres astronomes de Durham (Royaume-Uni) détectèrent la lentille gravitationnelle la plus puissante jamais observée, la masse cachée d'un amas de galaxies ayant pour effet de donner des images amplifiées d'une galaxie plus lointaine.

La caméra pour objets faiblement lumineux (FOC) de l'ESA fut la première à détecter des aurores au-dessus des pôles de Jupiter et permit d'étudier pour la première fois la chimie de Io, le satellite volcanique de Jupiter.

Explorant des amas d'étoiles trop denses pour le pouvoir de résolution des télescopes terrestres, elle détecta des étoiles qui avaient rajeuni à la suite de collisions dans de vieux amas globulaires et identifia dans le Grand Nuage de Magellan la plus grande étoile connue à ce jour, R136a1, deux cent cinquante fois plus massive que le Soleil.

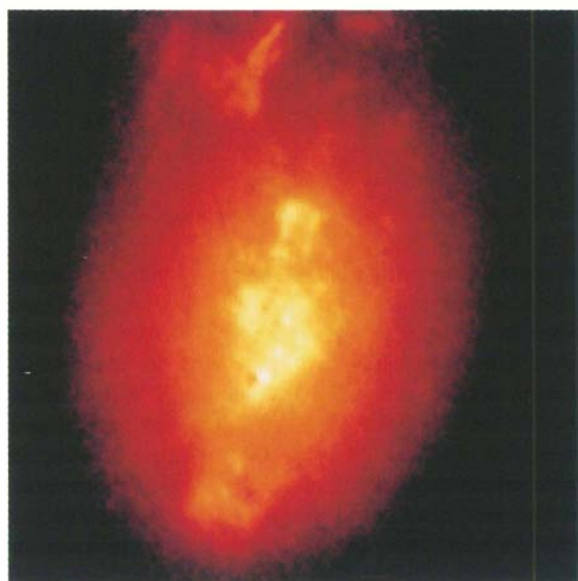
Dans cette même galaxie proche, la FOC mesura le nuage de poussières en expansion sur les lieux de la célèbre supernova 1987A. Explorant des galaxies plus lointaines, elle constata qu'un jet d'électrons émis par la galaxie M87 avait presque le même aspect dans l'ultraviolet que dans le domaine des ondes radio. Et en association avec la WFPC, elle détecta des zones de formation dense d'étoiles résultant de la collision de galaxies.

Rappelons enfin - dernier exemple des prouesses qu'a pu accomplir le télescope avant sa réparation - que des astronomes de Hambourg (Allemagne) se servirent du spectrographe pour objets faiblement lumineux de la NASA pour examiner le rayonnement ultraviolet émis par un quasar lointain. Leurs travaux montrèrent que les éléments chimiques étaient déjà très abondants dans l'Univers à un stade étonnamment précoce de son histoire.

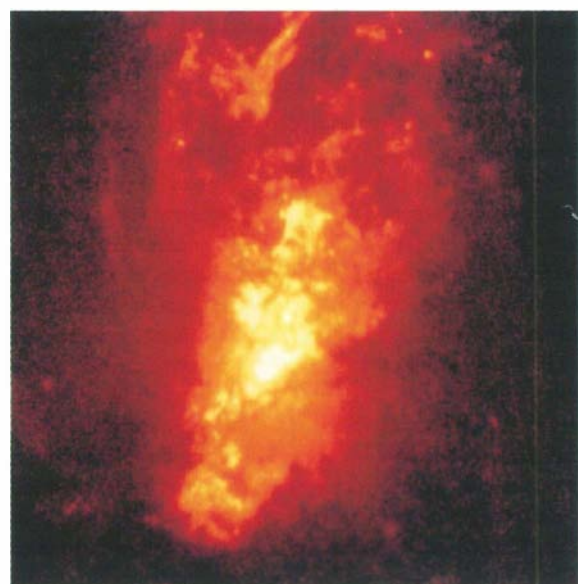
Détails plus nets d'une galaxie active. La caméra pour objets faiblement lumineux de l'ESA a "photographié" le coeur de la galaxie NGC 1068 avant et après la remise en état du télescope Hubble. Commentant cette spectaculaire amélioration, Duccio Macchetto, de l'ESA, déclare qu'il ne s'agit "pas seulement d'une plus belle image. Nous pensons que ce noyau galactique violent abrite un gigantesque trou noir qui échappe à notre regard. On peut voir des nodosités et des filaments dans les nuages de gaz qui l'entourent. A 60 millions d'années-lumière, NGC 1086 est une galaxie relativement proche. En l'observant dans le détail, nous pourrions comprendre ce qui se passe dans des galaxies actives similaires, beaucoup plus éloignées".

Un second départ

Les ingénieurs et les astronomes eurent encore d'autres motifs de préoccupation. Le télescope s'était mis à vibrer en raison d'une déformation inattendue de ses panneaux solaires chaque fois qu'il passait à l'ombre de la Terre. La mise en place d'un nouveau logiciel permit, certes, de limiter au strict minimum l'interruption des observations minutieusement programmées, mais les ingénieurs appréhendèrent une rupture des panneaux. A cela vinrent s'ajouter, au fil du temps, des problèmes mineurs d'ordre électrique, électronique et mécanique. S'il était bien prévu d'envoyer des astronautes dans l'espace pour assurer la maintenance et la remise en état du télescope pendant les quinze années de son exploitation, la liste des interventions à effectuer prit une ampleur alarmante. Une bonne dose de courage physique s'avérait nécessaire pour continuer dans la voie de l'astronomie spatiale. L'équipage de la navette spatiale Endeavour s'entraîna pendant plusieurs mois en piscine, dans des conditions simulées d'apesanteur. Cet équipage se composait de six Américains et d'un astronaute suisse de l'ESA, Claude Nicollier, chargé de manoeuvrer le bras télémanipulateur. Les astronautes, travaillant par groupes de deux à l'extérieur de la navette, mirent trente heures (réparties sur cinq jours) pour mener à bien leur mission. Ils remplacèrent la caméra de la NASA par un autre instrument compatible avec le miroir défectueux et montèrent une optique correctrice dans le faisceau du télescope desservant la caméra pour objets faiblement lumineux et d'autres instruments. Un des panneaux solaires d'origine était gravement déformé et les astronautes durent le larguer dans l'espace. Des panneaux de conception nouvelle fournis par l'ESA mirent fin aux vibrations. Dès sa remise en service en janvier 1994, le télescope envoya d'excellentes images. "Jamais nous n'avons autant fêté le nouvel an", déclare l'astronome italien Duccio Macchetto, qui travaille pour l'ESA à la division des programmes scientifiques du Space Telescope Science Institute. "Nous avons vu des choses étonnantes dans les jours qui ont suivi la remise en service du télescope. Nous avons discerné pour la première fois la planète lointaine Pluton et son satellite Charon sous la forme de disques nettement distincts. Les noyaux des galaxies, dont nous n'avions auparavant que des clichés flous, nous offrent maintenant le spectacle merveilleux de nuages lumineux nets et fort énigmatiques. Et les quasars lointains se sont mis à nous livrer quelques-uns de leurs secrets."



Avant la mise en place du COSTAR



Après la mise en place du COSTAR

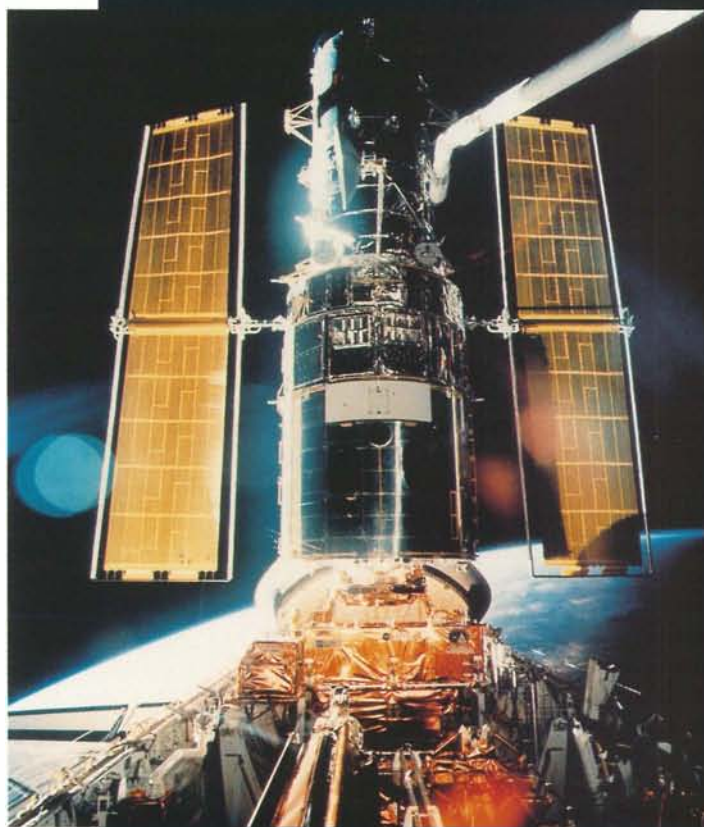
D. Macchetto (ESA/STScI) et al.,
équipe FOC de Hubble, NASA et
ESA

L'hélium de l'Univers primitif

C'est une équipe d'astronomes européens travaillant sous la direction de Peter Jakobsen, du département de science spatiale de l'ESA, qui fit la première découverte importante à l'aide de l'optique correctrice. Et ce ne fut pas par pur hasard. L'équipe de Jakobsen avait utilisé Hubble avant sa réparation pour trouver la bonne cible dans le ciel, puis avait attendu sa remise en état pour observer cette cible correctement. D'après la théorie du Big Bang, une explosion thermonucléaire a fait éclater l'Univers dans les trois minutes qui ont suivi sa formation et transformé un quart de l'hydrogène nouvellement formé en hélium. Une grande partie du mélange gazeux s'est ensuite transformée en étoiles, en galaxies et en nuages de gaz invisibles. Mais on suppose aussi qu'une infime partie de ces gaz s'est répandue à travers l'espace intergalactique.

Jakobsen avait le pressentiment qu'il existe un grand nombre d'atomes d'hélium à l'état ionisé, privés d'un de leurs deux électrons, rendant l'Univers opaque au rayonnement ultraviolet. Il proposa d'identifier l'hélium primitif par son pouvoir de masquer le rayonnement ultraviolet extrême émis par un quasar lointain. Il était possible de calculer la longueur d'onde à laquelle cet effet d'écran devait se produire. La plupart des quasars ne se prêtaient pas à cette expérience car les atomes d'hydrogène des nuages de gaz qui s'interposaient contribuaient déjà à arrêter une grande partie de l'ultraviolet. "C'est un peu comme si l'on essayait d'observer des étoiles par une nuit voilée à travers des interstices dans les nuages", explique Jakobsen, "si ce n'est que, dans notre cas, la couverture nuageuse s'étend sur la quasi-totalité de l'Univers observable". Entre 1990 et 1993, la caméra pour objets faiblement lumineux de l'ESA analysa à l'aide d'un prisme les émissions de vingt-cinq quasars candidats afin d'obtenir un spectre simple de leur rayonnement visible et ultraviolet. Pour l'un d'entre eux, 0302-003, le champ d'observation était relativement dégagé mais Hubble ne parvenait pas à obtenir un bon spectre du fait de son optique défectueuse. Dès la remise en état du télescope, Jakobsen demanda une nouvelle observation de ce quasar. Pendant trois heures d'affilée, la caméra observa l'émission du quasar pour en obtenir le spectre. L'effet de masque produit par l'hélium apparut beaucoup plus accentué que l'équipe n'avait osé l'espérer. Il se manifesta à partir de 130 nanomètres, précisément à la longueur d'onde prévue pour les ions d'hélium dans l'espace intergalactique, et bien de ce côté du quasar.

En réalité, il y eut simultanément trois découvertes: (1) la présence d'hélium primitif, (2) l'existence d'un gaz intergalactique diffus et (3) la confirmation que ce gaz est ionisé, probablement sous l'effet du rayonnement émis par les quasars ou par des objets similaires de grande intensité. Lorsque Jakobsen et son équipe annoncèrent officiellement les résultats de leur étude six mois plus tard, un commentateur spécialisé de la revue *Nature* salua cet événement, qu'il qualifia de découverte capitale pour la cosmologie.



Mieux qu'à l'état neuf. Voici une photo de Hubble prise par l'équipage de la navette spatiale Endeavour en décembre 1993, au terme d'une audacieuse mission de remise en état du télescope spatial. Cliché: NASA

Quel est l'âge de l'Univers?

Si le télescope spatial Hubble parvient à déterminer précisément la constante de Hubble, cela sera bien dans l'ordre des choses. La constante de Hubble, du nom de l'astronome américain Edwin Hubble qui découvrit l'expansion de l'Univers, établit une relation entre la vitesse actuelle des galaxies et leur distance par rapport à la Terre. Les galaxies lointaines ont une plus grande vitesse de fuite que les galaxies proches et l'on peut en déduire, par calcul, l'époque à laquelle la matière galactique était concentrée en un seul point.

La vitesse des galaxies se mesure facilement au décalage vers le rouge des raies de leur spectre. Il est en revanche plus difficile de mesurer leur distance et d'après les calculs les plus récents, la valeur de la constante oscillerait entre 37 et 90 kilomètres par seconde par mégaparsec.

Or la nature nous apporte ici une aide précieuse: les supernovae de type Ia, assimilables à des explosions nucléaires classiques. Dans ce cas, une étoile naine arrache de la matière gazeuse à son étoile compagnon et finit par exploser lorsque sa masse dépasse celle du Soleil d'exactly 44%. La lumière visible émise par ce type de supernova reste stable, à plus de six milliards de fois l'intensité de la lumière solaire. Si l'on parvenait à déterminer avec précision ce pic lumineux, on pourrait mesurer la distance de galaxies situées à plus de 500 millions d'années-lumière, où les astronomes ont découvert des supernovae de type Ia dont ils ont mesuré l'éclat depuis la Terre. En comparant les distances et les décalages vers le rouge, on peut déduire la constante de Hubble.

L'un des programmes d'observation du télescope Hubble vise à déterminer la luminosité exacte des supernovae de type Ia en mesurant par d'autres moyens la distance de certaines galaxies proches dans lesquelles de tels événements se sont produits. Hubble repère des céphéides, étoiles qui, dans un mouvement de respiration, croissent et décroissent suivant une période allant de quelques jours à quelques semaines. Les astronomes peuvent déduire du rythme de leur pulsation leur luminosité intrinsèque et déterminer d'après leur éclat la distance qui les sépare de la Galaxie.

Avant même sa remise en état, Hubble détecta des céphéides dans les galaxies relativement proches que sont IC4182 et NGC 5253, où deux supernovae de type Ia avaient été découvertes en 1937 et 1972 respectivement. Puis en 1994, donc après sa réparation, il observa deux galaxies plus lointaines: NGC 4496 (supernova 1960) et NGC 4536 (supernova 1981). Les premiers résultats obtenus ont conduit à fixer une valeur de l'ordre de 50 à la constante de Hubble.

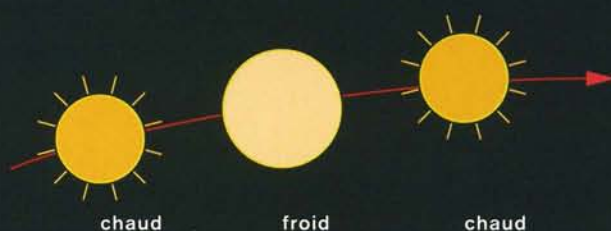
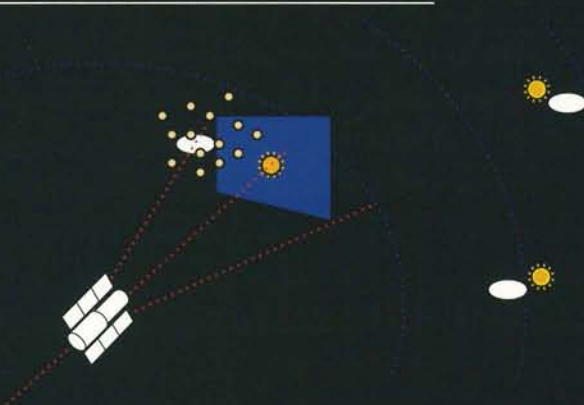
Echelle des distances

Univers
en expansion

Galaxies s'éloignant les unes des autres

Vitesse = distance x
constante de Hubble

La Terre dans la Voie Lactée

Les céphéides: des étoiles de taille
et de luminosité variablesObserver des céphéides dans
une galaxie procheEn déduire la distance
de la galaxieEn déduire l'intensité
d'une supernovaEn déduire, compte tenu de la luminosité,
la distance de supernovae situées
dans des galaxies plus lointaines

Cela voudrait dire qu'il ne s'est pas écoulé plus de 20 milliards d'années depuis l'explosion initiale. Mais comme il est probable que l'expansion des galaxies s'est ralentie sous l'effet des forces gravitationnelles depuis le début de l'expansion de l'Univers, l'âge véritable de l'Univers pourrait se situer aux alentours de 13 ou 14 milliards d'années.

Il est rare que la science avance sans trébucher. En octobre 1994, d'autres utilisateurs du télescope Hubble annoncèrent une valeur très différente de la constante de Hubble. Wendy Freeman, de Pasadena (Californie), et son équipe observèrent des céphéides dans la galaxie M100 dont ils estimèrent la distance à 55,7 millions d'années-lumière. Ils en conclurent que la constante de Hubble devait se situer aux alentours de 80, autrement dit que l'Univers est plus jeune.

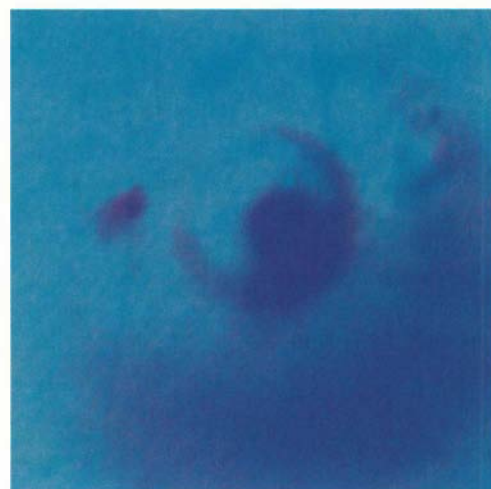


Impact d'une comète sur Jupiter. En juillet 1994, des fragments de la comète Shoemaker-Lévy 9 sont entrés en collision avec la planète géante. Les taches sombres correspondant aux points d'impact de ces fragments sur l'atmosphère dense de Jupiter ont pu être clairement distingués par la nouvelle caméra planétaire à grand champ de la NASA, installée à bord du télescope Hubble. Sur cet agrandissement redressé (ci-dessous) d'une image prise 90 minutes après l'impact, on peut voir "l'onde de choc" se propager vers l'extérieur sous la forme d'un anneau bien visible. Le croissant sombre presque aussi grand que la Terre se compose de matière éjectée par la collision. La petite tache à gauche témoigne d'un impact antérieur.

Clichés: Equipe Hubble chargée d'étudier la comète, NASA et ESA

Beaucoup d'autres découvertes en perspective

En juillet 1994, Hubble prit de splendides clichés de Jupiter montrant les points d'impact des fragments de la comète Shoemaker-Lévy 9. En 1995, d'autres résultats obtenus par les astronomes américains et européens remplissaient la littérature scientifique. Les images affinées de collisions de galaxies et de galaxies très lointaines suscitèrent un vif intérêt. Pour ce qui est des quasars, les nouvelles observations bousculent la théorie selon laquelle ces sources lumineuses intenses se situeraient nécessairement à l'intérieur des galaxies. Nul doute qu'il faudra bientôt redéfinir l'astronomie "à l'ère de Hubble".



ISO: l'astronomie au froid dans l'infrarouge



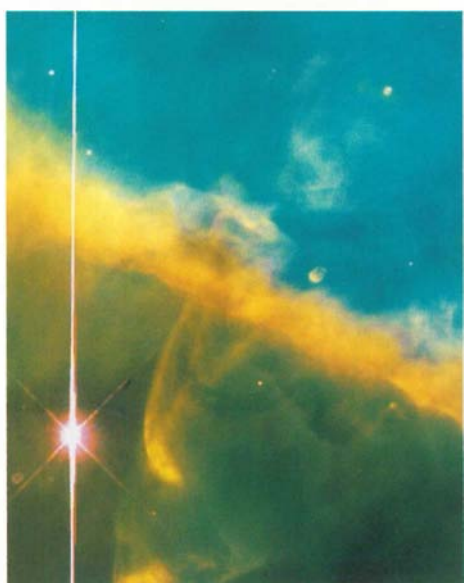
Une jeune étoile timide. Des émissions infrarouges ont dévoilé l'existence d'une nouvelle étoile cachée parmi des nuages de poussière à proximité d'une jeune étoile connue. Les émissions de ce nouvel objet avaient été attribuées à l'objet connu. Il faudra donc réinterpréter les observations. Cette découverte a été faite à l'aide d'une caméra similaire à celle d'ISO par des astronomes européens au sol. Dans l'espace, les objets plus faibles peuvent être discernés dans un domaine plus étendu du rayonnement infrarouge. Cliché: G. Olofsson (Obs. de Stockholm) et P.O. Lagage (CEA SAp Saclay), caméra CAMIRAS, télescope optique nordique.

Vous souhaiteriez observer votre galaxie préférée au moyen du nouveau télescope spatial infrarouge de l'Agence spatiale européenne? Trop tard. L'appel aux propositions diffusé auprès des astronomes du monde entier en avril 1994 a suscité suffisamment de candidatures pour occuper ISO (Infrared Space Observatory) pendant plus de trois ans. Sachant que cet observatoire a une durée de vie prévisionnelle d'une vingtaine de mois, le comité chargé de l'affectation du temps d'observation se trouve placé devant des choix difficiles. Il ne vous reste plus qu'à attendre le lancement d'ISO, fin 1995, pour émettre vos desiderata; mais là encore, vous aurez intérêt à avancer des arguments scientifiques hors du commun pour vous infiltrer dans ce programme.

ISO

Les longueurs d'onde de l'infrarouge se mesurent en microns (ou millièmes de millimètre). Ces ondes sont trop longues pour être perçues par l'œil humain. En revanche, elles provoquent au contact de la peau une sensation de chaleur, comme si ce rayonnement provenait d'un objet chaud. Tous les objets de l'Univers, sauf ceux d'un froid extrême, émettent dans l'infrarouge, qu'il s'agisse de comètes proches ou de galaxies lointaines. La matière froide étant largement répandue dans le cosmos, un artiste peindrait le ciel infrarouge à l'aide d'un pinceau large alors qu'il utiliserait la technique pointilliste pour les étoiles visibles. Le rayonnement infrarouge peut également pénétrer les nébuleuses de poussières qui entourent fréquemment les objets auxquels nous nous intéressons, par exemple les étoiles en cours de formation ou le centre de la Voie lactée.

"ISO explorera l'Univers froid et l'Univers caché", déclare Martin Kessler, responsable scientifique du projet ISO à l'ESA. "La matière froide et en partie cachée comprend notamment les gaz et les poussières interstellaires. C'est la fameuse soupe primitive d'où sont nées les planètes, puis la vie. L'une des tâches principales d'ISO sera d'étudier attentivement ses molécules et ses grains de poussière."



Le panache d'une jeune étoile. Le télescope spatial Hubble observa ce long jet de gaz éjecté dans l'espace par une étoile nouvelle née dans la nébuleuse d'Orion. Dans les tout premiers instants de la formation d'une étoile, on observe des échanges de matière dans les nuages denses. ISO aura une vision encore plus nette de ces événements dans le rayonnement infrarouge.
Cliché: C.R. O'Dell (Rice U.), NASA et ESA

L'atmosphère terrestre rayonne dans l'infrarouge, perturbant les observations des télescopes terrestres. En outre, la vapeur d'eau et le gaz carbonique de l'air absorbent un large éventail de longueurs d'onde, de sorte que les observateurs au sol doivent se contenter de "fenêtres" étroites, n'allant pas au-delà de 40 microns seulement, le rayonnement aux plus grandes longueurs d'onde étant totalement bloqué. Il y a donc de bonnes raisons d'envoyer des instruments dans l'espace.

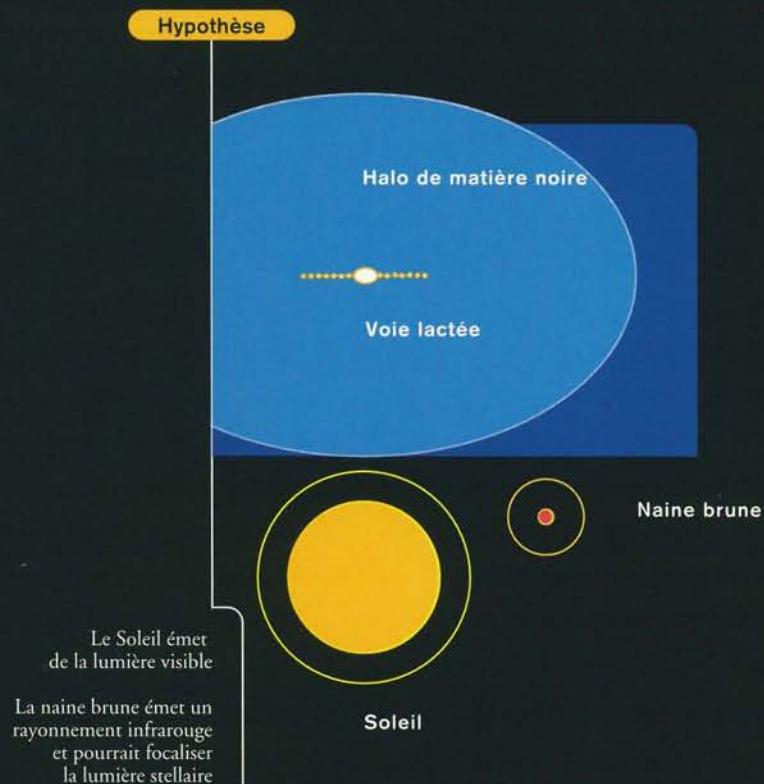
En 1983, le satellite IRAS, fruit d'une coopération entre les Etats- Unis, les Pays-Bas et le Royaume-Uni, inaugura l'astronomie spatiale infrarouge par une étude systématique du ciel. Il cartographia 250 000 sources cosmiques infrarouges ainsi que de grandes étendues d'émissions diffuses. Après dix mois d'activité intense ayant permis de dresser une carte quasi complète du ciel, la réserve d'hélium servant au refroidissement du télescope s'épuisa et il fallut mettre un terme à la mission.

Le refroidissement est bien le problème numéro un des satellites travaillant dans l'infrarouge. Pour observer l'Univers froid, il faut en effet des instruments froids, fonctionnant à des températures proches du zéro absolu, soit -273° C. Seul l'hélium reste fluide à ces températures, et il doit être diffusé lentement pour maintenir une température basse. ISO sera lui aussi limité par sa réserve d'hélium, mais il devrait fonctionner environ deux fois plus longtemps qu'IRAS.

IRAS nous a non seulement transmis des images inhabituelles de notre Univers familier, mais il a aussi détecté des disques froids de poussières autour de certaines étoiles ainsi que des galaxies infrarouges ultra-lumineuses. Ces dernières sont des amas d'étoiles entourés d'une telle quantité de poussières qu'il émettent dix fois plus d'énergie dans l'infrarouge que dans la lumière visible. Dix ans après, les astronomes continuent d'exploiter le catalogue IRAS dans l'espoir d'y faire de nouvelles découvertes, mais ils meurent d'envie d'observer un par un de nombreux autres objets au moyen de détecteurs plus sensibles et plus analytiques. D'où l'afflux des demandes de temps d'observation sur ISO.

L'Univers serait-il régi par les naines brunes?

L'un des objectifs de la mission ISO sera de détecter des objets invisibles qui pourraient se cacher dans le halo entourant la Voie lactée. L'Univers est dominé par la matière sombre, non identifiée, dont la masse dépasse de loin celle des galaxies et des étoiles visibles. Compte tenu de sa force d'attraction gravitationnelle, cette matière invisible agit sur le mouvement des galaxies et imprime aux étoiles de la Voie lactée une vitesse supérieure à celle que l'on imaginait. Le principal élément constitutif de l'Univers échappe aujourd'hui à la connaissance des astronomes. La matière invisible est-elle faite de particules fantômes subatomiques, distincte de la matière ordinaire? de grumeaux de matière ordinaire, non lumineux? de trous noirs sous-alimentés? Ou s'agit-il de naines brunes, masses de gaz de type stellaire, plus petites que le Soleil et trop froides pour se consumer?



En 1993, des équipes française et américano-australienne signalèrent, dans le halo de la Voie lactée, la présence de petits objets traversant la ligne de visée d'étoiles situées dans une galaxie proche. D'après leurs estimations, la masse de ces objets serait compatible avec celle de naines brunes. Cette nouvelle fut accueillie avec scepticisme par de nombreux chercheurs, mais la théorie des naines brunes se trouva confortée en 1994 lorsque des astronomes américains annoncèrent l'existence d'un halo peu lumineux autour d'une galaxie spirale vue de côté. La population de naines brunes pourrait inclure quelques naines rouges, objets un peu plus grands présentant la luminosité d'étoiles très faibles. Le télescope spatial Hubble a observé une naine rouge, 60 000 fois moins lumineuse que le Soleil, à une distance de 25 années-lumière. Les naines brunes devraient se manifester dans l'infrarouge sous la forme de sources ponctuelles. La caméra très sensible d'ISO profitera de la présence de "trouées" - choisies au préalable - dans les nuages interstellaires opaques pour sonder le halo de la Galaxie. Ces "trouées" se situent dans les constellations de la Grande Ourse et de l'Horloge. Des centaines de clichés de petits secteurs du ciel, pris avec des temps d'exposition pouvant atteindre la trentaine de minutes, devraient nous dévoiler des objets jusqu'alors invisibles. Parmi ces objets pourraient figurer des naines brunes, gardiennes de la Voie lactée, ainsi que des galaxies très éloignées. Grâce aux observations complémentaires réalisées par un autre instrument dans des longueurs d'onde supérieures, nous pourrions distinguer ces objets les uns des autres. ISO consacrera également une petite fraction de son temps d'observation à rechercher des naines brunes dans le halo d'autres galaxies. Si ces naines brunes apportent une réponse, ne serait-ce que partielle, à la question de la masse cachée, ISO aura peut-être contribué à résoudre l'une des grandes énigmes actuelles de la cosmologie. La réponse est entre les mains de la Nature.

ISO: caractéristiques techniques**Objectif**

astronomie infrarouge

Gamme de longueurs d'onde

3 - 200 microns

Diamètre du télescope

0,6 mètre

Agence responsable

ESA; coopération avec l'ISAS (Japon) et avec la NASA (Et.-U) par la fourniture d'une 2ème station sol et la participation aux programmes d'observation

Nom

Infrared Space Observatory

Maître d'oeuvre

Aérospatiale, Cannes (France)

Masse

2,4 tonnes

Longueur

5,3 mètres

Lancement

1995

Lanceur

Ariane 44P

Orbite

excentrique de 24 h; périégée 1000 km, apogée 70 000 km ; inclinaison: 5° par rapport à l'équateur

Exploitation

16 h par jour (en dehors des ceintures de radiations)

Stations sol

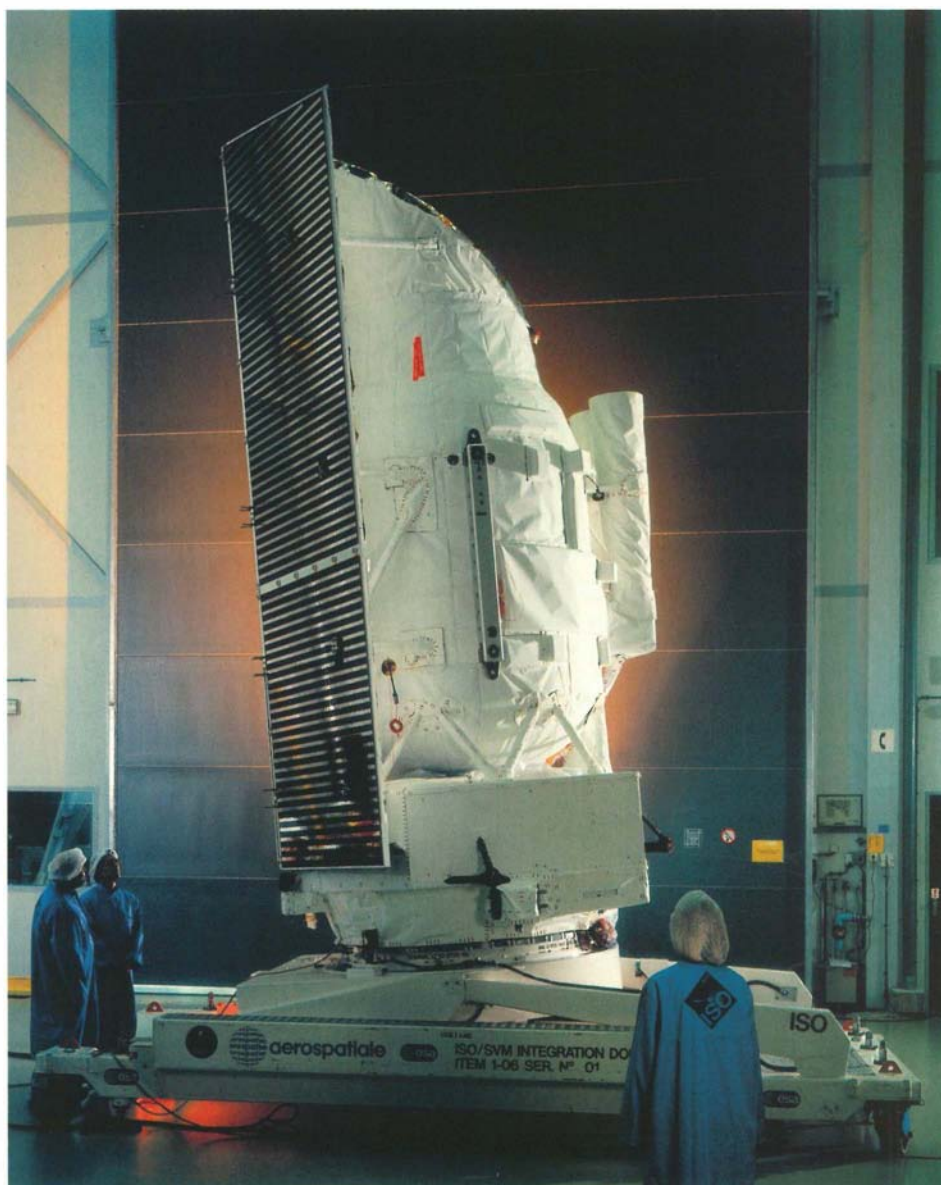
Villafranca (ESA) et Goldstone (NASA)

Durée de vie

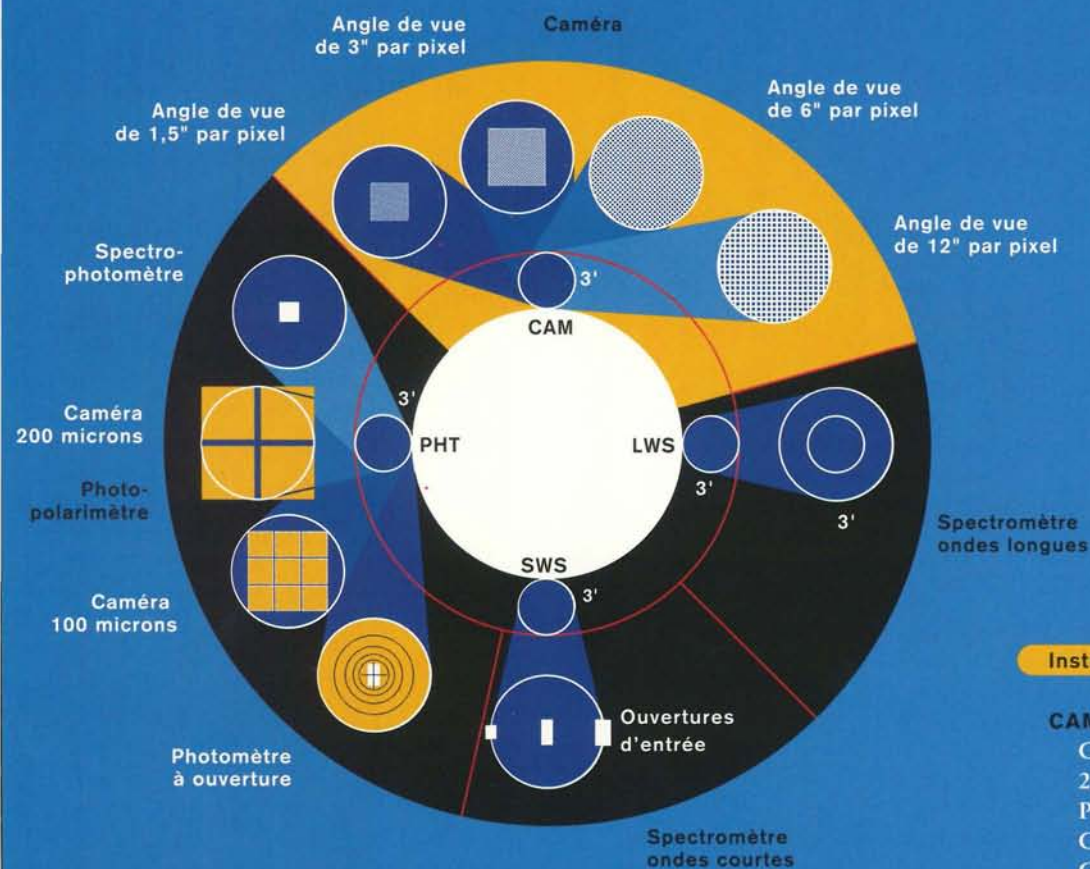
18 mois, voire plus (limitée par la réserve d'hélium)

Alimentation en énergie

Panneaux solaires



Réfrigérateur volant. Les détecteurs infrarouges d'ISO seront maintenus à -271°C par évaporation lente d'hélium dans l'espace. Le réservoir contenant environ 2140 litres d'hélium superfluide se videra peu à peu pendant un peu plus de 18 mois. Le gaz extrêmement froid traversera des échangeurs thermiques de façon à maintenir l'ensemble du télescope à une température de quelques degrés au-dessus du zéro absolu. Le modèle de vol que l'on peut voir ici en salle d'essais est flanqué (à gauche) d'un panneau revêtu de photopiles qui alimentent le satellite en électricité. Ce panneau fait également office d'écran solaire. Noter (en haut, en position oblique) la présence d'un parasoleil empêchant la lumière du Soleil d'entrer dans le télescope.



Détecteurs multiples. Le télescope de 0,6 m d'ISO dirige les faisceaux infrarouges via un miroir pyramidal vers quatre instruments offrant un large éventail de possibilités dans le domaine de la cartographie et de l'analyse spectrale. L'étendue du champ et la longueur d'onde varient en fonction de la nature des objets examinés.

Instruments scientifiques

CAM

Caméra et polarimètre
2,5 à 18 microns
PI: C. Césarsky
CEA, Saclay, France
Co-Is: F, E, I, S, UK, USA

PHT

Photopolarimètre imageur
2,5 à 200 microns
PI: D. Lemke
MPI für Astronomie
Heidelberg, Allemagne
Co-Is: D, DK, E, IRE, SF, UK, USA

SWS

Spectromètre ondes courtes
2,5 à 45 microns
PI: Th. de Graauw
Lab. de recherche spatiale
Groningue, Pays-Bas
Co-Is: NL, B, D, USA

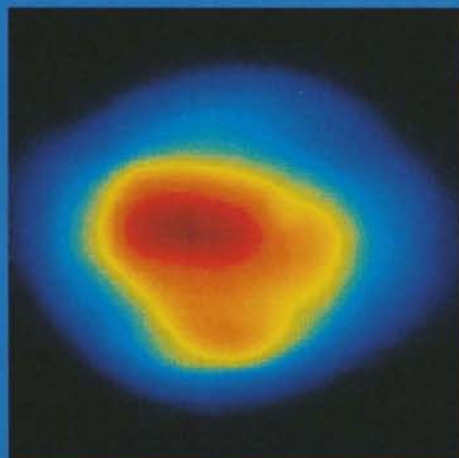
LWS

Spectromètre ondes longues
45 à 180 microns
PI: P. Clegg
Queen Mary & Westfield
College, Londres, Royaume-Uni
Co-Is: UK, F, I, USA

PI: chercheur principal
Co-Is: pays des chercheurs associés

Saturne dans l'infrarouge. Ce curieux cliché de la planète à anneaux, pris à la longueur d'onde de 10 microns, est dominé par des émissions intenses colorées en rouge foncé. Ces émissions proviennent d'une zone de turbulence située en haut à gauche de la face visible de la planète. Les anneaux de Saturne apparaissent plus faibles à cette longueur d'onde, formant des prolongations vers la gauche et vers la droite de la région peu lumineuse colorée en bleu.

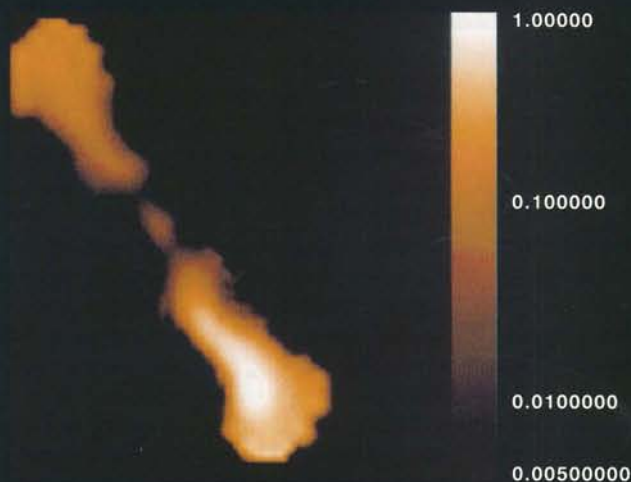
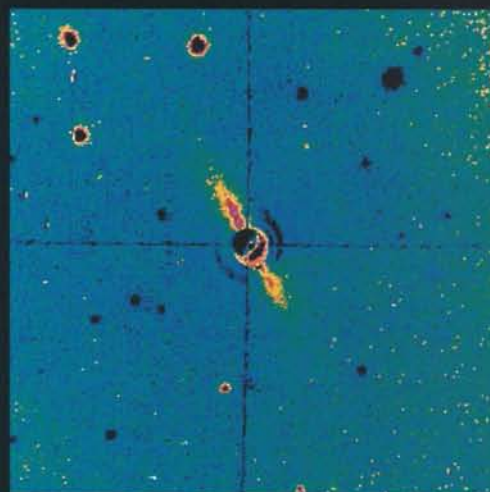
Cliché: P.O. Lagage (Saclay) et F. Sibille (Lyon), caméra CAMIRAS, télescope Canada-France-Hawaii.



Les planètes et leur origine

Le télescope spatial Hubble a démontré que même à l'ère des sondes interplanétaires, l'observation des planètes depuis les environs de la Terre conservait tout son intérêt. L'utilisation des sondes dans l'espace lointain est en effet limitée en termes de durée et de capacité des instruments embarqués. Pour sa part, ISO sera en bonne place sur orbite terrestre pour observer de nombreuses heures durant les planètes, leurs satellites naturels, les astéroïdes et les comètes afin notamment d'identifier leur composition chimique. Il jettera un regard particulièrement attentif sur Titan, le satellite brumeux de Saturne que la sonde Huygens de l'ESA devrait explorer. Les astronomes n'ont pas encore trouvé d'explication au fait que l'abondance atmosphérique des atomes d'hydrogène lourd (deutérium) varie selon les planètes et les satellites. Ces écarts semblent indiquer des origines différentes. Sur Titan, par exemple, la proportion de deutérium par rapport à l'hydrogène ordinaire est environ dix fois plus forte que sur son voisin Saturne. Selon la théorie en vigueur, l'hydrogène de Saturne aurait été prélevé sur le nuage de gaz primitif, tandis que celui de Titan et d'autres petits corps célestes, notamment Mars et la Terre, proviendrait de la glace d'eau de comètes riche en deutérium avec lesquelles il y aurait eu collision.

ISO poursuivra cette étude en mesurant l'abondance du deutérium et d'autres atomes et molécules caractéristiques de leur origine dans les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) ainsi que Titan, Mars et les comètes. Toute recherche sur l'origine cosmique de la vie humaine passe nécessairement par une meilleure compréhension de la formation des planètes. Et toute réflexion sur l'existence d'autres formes de vie ailleurs dans l'Univers suppose au préalable de connaître approximativement le domaine d'extension des planètes. Les astronomes sont nombreux à penser que les étoiles devraient en posséder, mais cela n'a jamais été prouvé. ISO s'attachera à étudier les émissions infrarouges, découvertes par IRAS, des disques de poussière entourant certaines étoiles, notamment la très brillante Véga. Les astronomes pensent en effet que les planètes du système solaire se sont formées à partir d'un disque de ce type et ils sont satisfaits de constater qu'il en existe des exemples ailleurs. Cependant, comme la formation de planètes mobilise la majeure partie de la matière, le système solaire vu de loin ne présenterait pas l'aspect d'un disque de poussière. Selon Harm Habing, de Leyde (Pays-Bas), qui conduira un programme axé sur la recherche de disques similaires à celui de Véga, "la présence d'un disque autour d'une étoile nous indique peut-être que cette étoile n'a pas été capable de créer des planètes. Avec ISO, nous essaierons de détecter des disques dans une centaine d'étoiles d'âges et de masses différents arrivées à maturité, jusqu'à une distance de 100 années-lumière. Nous voulons savoir si ces disques sont rares ou fréquents, et s'ils varient en densité et en épaisseur avec le temps ou en fonction du milieu environnant propre à chaque étoile. Il existe aussi un autre programme, d'envergure similaire, portant sur l'étude d'étoiles jeunes. Celles-ci pourraient être entourées de disques plus épais, éventuellement détectables à une distance de 300 années-lumière. Mais quiconque recherche des planètes par d'autres méthodes serait bien avisé de se concentrer sur les étoiles dépourvues de disque."

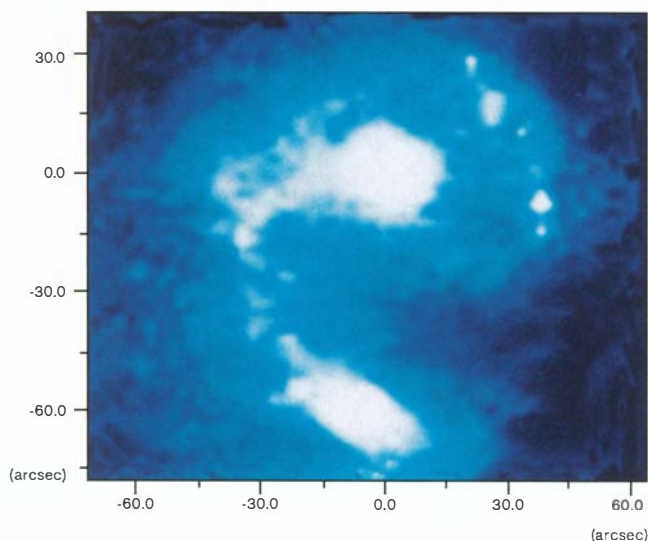


Etoile enveloppée de poussière.

En haut: cliché de Beta Pictoris, sur lequel l'étoile elle-même est invisible. On y distingue un disque de poussière - vu par la tranche - similaire à celui qui, au voisinage du Soleil nouveau-né, aurait donné naissance à la Terre et aux autres planètes. Ce disque a été découvert par le satellite infrarouge IRAS. ISO en détectera et en observera de nombreux autres spécimens.

En bas: observation au sol dans l'infrarouge. La poussière est concentrée dans un anneau externe. La poussière plus proche de l'étoile pourrait avoir servi de 'matériau de construction' lors de la formation des planètes.

Cliché en lumière visible: B. Smith (Arizona) et R. Terrile (JPL); Infrarouge: P.O. Lagage et E. Pantin (CEA SAp, Saclay), caméra TIMMI, télescope ESO de 3,6 m.



Collision entre deux galaxies. Ce cliché des Antennes a été pris par un télescope infrarouge au sol. Les deux galaxies sont en proie à une activité intense aux courtes longueurs d'onde de l'infrarouge. Ce type de collision donne naissance à des galaxies très fécondes en étoiles et présentant une forte luminosité aux grandes longueurs d'onde de l'infrarouge, qui correspondent au domaine d'observation d'ISO.

Source: UK Infrared Telescope, Mauna Kea/Royal Observatory, Edimbourg.

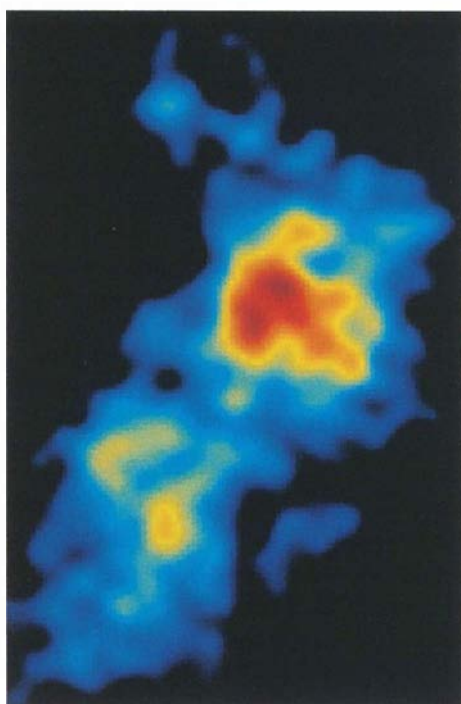
L'évolution des galaxies

Nous sommes les enfants de la Voie lactée. Celle-ci a créé les éléments chimiques dont nous sommes constitués et qui ont servi à la fabrication du Soleil et de la Terre. Un des produits caractéristiques des explosions stellaires est la poussière; dans la Voie lactée et dans d'autres galaxies fertiles, cette poussière interstellaire rayonne dans l'infrarouge. A des distances très lointaines, correspondant à des événements survenus dans les premiers milliards d'années qui ont suivi le Big Bang, le décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers est si important que toute lumière visible se transforme en infrarouge. C'est pourquoi ISO offre une occasion particulière d'étudier l'origine et l'évolution des galaxies.

Les galaxies à formation intense d'étoiles - qui semblent avoir été créées à la suite d'une collision - où les étoiles naissent et explosent à un rythme accéléré, contiennent beaucoup de poussières et émettent avec une intensité exceptionnelle dans l'infrarouge. Les observations d'ISO attireront l'attention des astronomes sur les fusions de galaxies. Sur un laps de temps de plusieurs milliards d'années, les collisions ont réduit le nombre des élégantes galaxies spirales et les ont remplacées par des galaxies elliptiques, de forme ovoïde. ISO sera en mesure de comparer les proportions des différents types de galaxies présents dans des amas lointains, donc anciens, et dans des amas proches, donc récents.

"Les galaxies se trouvent au coeur de l'activité cosmique", explique Catherine Césarsky, de Saclay (France), responsable de la caméra principale du satellite. "C'est pourquoi j'estime que, parmi toutes les possibilités que nous offre ISO, la plus passionnante consiste à reconstituer l'histoire complète des galaxies. Nous tenterons de comprendre comment elles sont nées et comment elles ont évolué sous la pression d'événements internes et externes. Dans les galaxies proches et dans la Voie lactée, nous observerons le résultat de cette évolution et nous tenterons d'en tirer les conséquences pour la formation des étoiles et des planètes."

Galaxie tourmentée. Le rayonnement dans l'infrarouge, coloré ici en rouge, émane des régions d'intense activité de formation d'étoiles dans la galaxie NGC 4536. Ce sont les poussières entourant les étoiles jeunes qui brillent avec le maximum d'intensité dans l'infrarouge. En lumière visible, cette galaxie possède un tout petit centre brillant. Grâce à ISO, les astronomes devraient pouvoir déterminer à quel moment les "moteurs" internes interviennent dans le devenir de la galaxie et à quel moment les collisions externes modifient le comportement de ces grands amas stellaires. Cliché: M. Dennefeld (Paris) et P.O. Lagage (Saclay), caméra CAMIRAS, télescope Canada-France-Hawaï.



XMM: un appétit dévorant pour les rayons X

Les astronomes ont établi une nouvelle carte du ciel sur laquelle figurent les points chauds de l'Univers. Toute région dont la température atteint des millions, voire des milliards de degrés est émettrice de rayons X. Ces émissions étant bloquées par l'atmosphère terrestre, nous ne les recevons pas. Les télescopes spatiaux d'astronomie X, en revanche, peuvent observer ces sources très diverses, qui vont de l'atmosphère particulièrement chaude des étoiles ordinaires aux "fours" à énergie gravitationnelle qui entourent les trous noirs géants dans les galaxies lointaines. D'immenses nuages de gaz chauds occupent les galaxies et les amas de galaxies. Le "bruit de fond" qui envahit le ciel dans le rayonnement X pourrait nous renseigner sur l'origine des galaxies.



Une puissante étoile vampire. Cygnus X-3, à gauche sur ce cliché pris dans le rayonnement X par le télescope germano-américano-britannique Rosat, se trouve à environ 25000 années-lumière et brille d'un éclat trop faible pour être détectée en lumière visible. Le rayonnement X de grande intensité correspond à un transfert de gaz entre une étoile classique et une étoile à neutrons située dans son voisinage. Cette dernière aspire et engloutit le gaz qu'elle accélère jusqu'à près de la vitesse de la lumière. Cygnus X-3 est également une source de rayons cosmiques, ces particules atomiques chargées qui sillonnent la Voie lactée. Cygnus X-1, à droite, serait un trou noir.

Cliché: J. Trümper (MPE Garching)

XMM

L'archétype de l'étoile X est un vampire, naine blanche ou étoile à neutrons, qui ponctionne le gaz d'une étoile compagnon et le chauffe sous l'effet d'une puissante force gravitationnelle. Dans certains cas, ce vampire peut se présenter sous la forme d'un petit trou noir. Les spécialistes de l'astronomie X ont passé un quart de siècle passionnant à faire ces découvertes. Le satellite Uhuru de la NASA, lancé en 1970, offrit à l'astronomie X ses premiers succès en repérant 339 sources cosmiques. Depuis, une longue série de missions américaines, russes, européennes et japonaises a fait de l'observation dans le rayonnement X le rameau le plus vigoureux de l'astronomie spatiale. Le satellite germano-américano-néerlandais Rosat, lancé en 1990, porta à 60 000 le nombre des sources X répertoriées. Le satellite XMM de l'Agence spatiale européenne en recensera, quant à lui, plusieurs millions. Au jour de son lancement, en 1999, ce sera le satellite X le plus sensible jamais construit. Pour sa part, le satellite AXAF de la NASA (1998) s'intéressera aux petites sources difficilement détectables et aura une meilleure acuité visuelle que XMM. La force de XMM, ce sont ses télescopes de conception révolutionnaire qui lui donnent un appétit pantagruélique de rayons X, bien supérieur à celui d'AXAF.

XMM: caractéristiques techniques

Objectif

Spectroscopie X d'objets cosmiques

Gamme de longueurs d'onde

0,1 à 5 nanomètres

Nom

X-ray Multi Mirror (nom officiel: mission de spectroscopie X à haut rendement)

Agence responsable

ESA Rôle dans le programme Horizon 2000
2ème pierre angulaire

Maître d'oeuvre

Dornier (Allemagne)

Masse

plus de 3 tonnes

Télescopes

3 télescopes X de 0,7 m
1 télescope optique

Longueur

10 mètres

Lancement

1999

Lanceur

Ariane 5

Orbite

Orbite excentrique de 48 h autour de la Terre;
périgée: 7000 km - apogée: 120 000 km;
inclinaison: 60° par rapport à l'équateur

Exploitation

40 heures par orbite par l'intermédiaire de la station sol de Redu (Belgique)

Durée de vie

2 à 10 ans.

Alimentation en énergie:

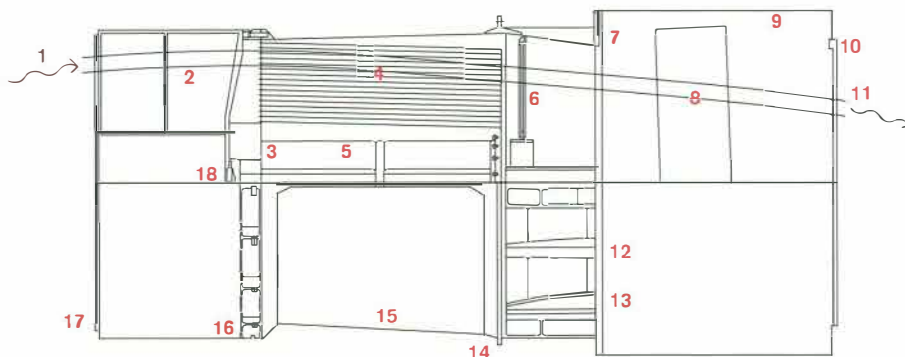
panneaux solaires

C'est le temps de pose nécessaire au télescope pour collecter une quantité suffisante de rayons X émis par une source qui détermine si cette source est ou non observable. Les astronomes mesurent la luminosité X d'une source en millicrabes (1 millicrabe = 1 millième de la luminosité X de la nébuleuse du Crabe, vestige d'une étoile ayant subi une dislocation violente). La source persistante la plus brillante, l'étoile vampire Sco X-1, culmine à 20 000 millicrabes, tandis que le quasar le plus brillant, 3C273, ne dépasse pas les 6 millicrabes. Les télescopes X du satellite XMM détecteront en l'espace d'une seconde ou deux la présence d'une source se mesurant en millicrabes. En l'espace d'une heure, ils pourront facilement repérer des sources se mesurant en microcrabes (1 microcrabe = 1 millionième de la luminosité X de la nébuleuse du Crabe). En une journée, XMM observera plus de sources X dans un secteur donné qu'Uhuru n'en a trouvé en trois ans dans l'ensemble du ciel. Cette faculté de détecter de nombreux objets rejoint l'objectif principal d'XMM, qui est de faire de l'astronomie X une science plus exacte. La spectroscopie joue un rôle clé à cet égard. Les astronomes travaillant dans la lumière visible et l'ultraviolet ont en effet absolument besoin de connaître la distribution spectrale des émissions observées. Réglés sur les longueurs d'onde caractéristiques de certains atomes, les spectroscopes mesurent la composition, la température et le déplacement d'une source, ainsi que d'autres paramètres. Avec XMM, les spécialistes de l'astronomie X disposeront eux aussi en continu d'un outil de spectroscopie, qui leur permettra de passer du stade des théories floues à celui de la description quantitative de chaque source.



Sources X près du centre de la Voie lactée, vues par le satellite Exosat de l'ESA Cliché: X-ray Astronomy Group, U. Leicester (UK)

XMM doit fonctionner pendant au moins deux ans, et certains espèrent que sa longévité atteindra dix ans. Il sera exploité comme un observatoire classique, accessible aux astronomes du monde entier. Avec XMM, ceux-ci pourront examiner des millions d'objets et en établir le spectre d'ensemble, mais aussi obtenir les spectres détaillés de peut-être 30 000 d'entre eux sur une période de dix ans. On comprend donc pourquoi, pour XMM, l'ESA parle officiellement de "mission de spectroscopie X à haut rendement".



Un sur trois. Ce schéma d'un des trois télescopes du satellite XMM témoigne du raffinement technique de l'instrument. Les cinquante-huit miroirs emboîtés assurant la focalisation des rayons X doivent être mis en place avec précision.

Précision x 3 télescopes x 58 miroirs

Les télescopes pour le rayonnement X sont des objets d'art, dont XMM emportera trois exemplaires. Galilée, s'il les voyait, n'y reconnaîtrait pas des télescopes! Les lentilles et même les grands miroirs de l'astronomie moderne utilisés pour le rayonnement visible n'ont pas la capacité de focaliser les rayons X. Pour modifier de façon contrôlée le trajet des rayons X, on fait en sorte qu'ils atteignent une surface métallique sous une incidence rasante. Voici quarante ans, le physicien allemand Hans Wolter inventa un miroir en forme de tonneau, formant un léger angle dans l'axe de sa longueur, qui a pour propriété de focaliser les rayons X pénétrant près de son rebord.

Des chercheurs américains adaptèrent le miroir Wolter au premier télescope X, embarqué en 1978 à bord de l'observatoire Einstein de la NASA. Seul, le miroir Wolter ne peut collecter les rayons X incidents que dans un périmètre restreint. C'est pourquoi l'instrument du satellite Einstein comportait quatre miroirs emboîtés les uns dans les autres comme des poupées russes. Le télescope de 1,2 mètre du satellite AXAF de la NASA contiendra également quatre miroirs emboîtés, mais tous ces miroirs réunis ne focaliseront qu'environ dix pour cent des rayons X issus du champ de visée.

Chacun des trois télescopes de XMM contiendra 58 miroirs emboîtés, et 60% de tous les rayons X incidents rencontreront un miroir correctement orienté qui les dirigera vers le foyer commun. Malgré une ouverture trois fois inférieure à celle du télescope d'AXAF, chaque télescope d'XMM aura un pouvoir collecteur environ trois fois supérieur (le pouvoir collecteur étant multiplié par 10 avec les trois télescopes réunis).

Les astronomes japonais ont abordé la spectroscopie du rayonnement X à miroirs multiples avec leur satellite Asca. Cette technique sera également adoptée par les prochains satellites italo-néerlandais et russe. L'avantage particulier d'XMM réside dans l'utilisation de nombreux miroirs de haute précision, alliant capacité collectrice et pouvoir de résolution.

"Notre problème numéro un est d'empêcher que les miroirs ne se déforment au cours de l'assemblage", déclare Robert Lainé, chef du projet XMM à l'ESA. Lainé dirige aujourd'hui une équipe d'ingénieurs européens chargée de réaliser une véritable prouesse technique.

"Nous avons commandé à l'entreprise allemande Carl Zeiss 58 mandrins, ou moules, composés d'une âme en aluminium revêtue de nickel, qui serviront à fabriquer le miroir final", explique Robert Lainé. "Ces mandrins seront usinés avec une précision de l'ordre du millièmètre de façon à avoir la section longitudinale voulue, parabolique à l'avant et hyperbolique à l'arrière. Ils seront ensuite polis jusqu'à l'obtention d'un degré de rugosité local encore mille fois meilleur.

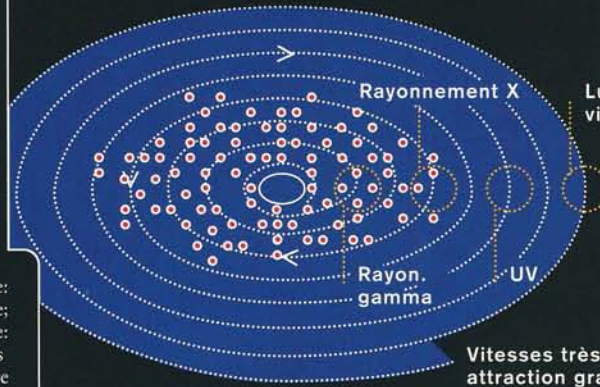
"Ensuite, la société italienne Medialario, associée à l'Allemand Kayser Threde, fabriquera les miroirs par électrodéposition sur les mandrins. Le procédé consiste à revêtir d'abord la surface polie du mandrin d'une couche d'or réfléchissante, puis à renforcer celle-ci par une couche de nickel de moins d'un millimètre, qui doit être très homogène. Le tout est extrait du mandrin et constitue ce qu'on appelle un miroir X. Cette opération, répétée trois fois sur 58 mandrins, permet d'obtenir suffisamment de miroirs de tailles différentes pour les trois télescopes d'XMM. La difficulté tient au fait que ces miroirs, aux contours ultra-précis, sont à la fois grands (longueur: 600 mm, diamètre: jusqu'à 700 mm) et très minces. Ils peuvent facilement s'affaisser sous leur propre poids. Aussi faut-il concevoir un système qui permette, avant l'assemblage, de suspendre les miroirs en réduisant au maximum le risque de déformation."

Pour conclure, Robert Lainé explique que "c'est seulement après avoir été collés sur les rayons de la structure en forme de roue qui les supportera que les miroirs deviendront suffisamment rigides pour résister aux manipulations normales et à l'environnement spatial".

- 1 Rayons X venant de la source
- 2 Baffle d'entrée
- 3 Microbalance à quartz
- 4 Miroir (58 coques)
- 5 Baffle central
- 6 Déflecteur magnétique d'électrons
- 7 Bride de montage du RGA
- 8 Ensemble à réseau de diffraction (RGA)
- 9 Baffle arrière (sortie)
- 10 Porte arrière (sortie)
- 11 Faisceau rayons-X convergeant vers le foyer image
- 12 Renfort de support du RGA
- 13 Renfort de support pour plate-forme porte-miroir
- 14 Bride de montage sur la plate-forme du satellite
- 15 Structure d'interface
- 16 Araignée de montage des miroirs
- 17 Porte d'entrée
- 18 Lentille d'alignement

Hypothèse

Trou noir stellaire:
environ 50 km de diamètre;
Trou noir galactique:
plusieurs millions
de km de diamètre



La matière effondrée forme
un disque d'accrétion

Lumière
visible

Le fond de rayons X
masque les rayons gamma

Vitesses très élevées,
attraction gravitationnelle puissante



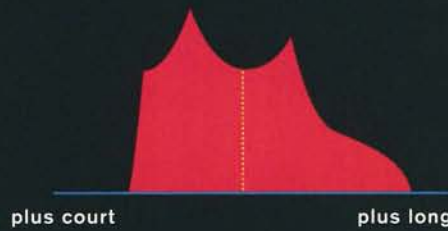
Signatures dans
le rayonnement X

Matière
qui
s'approche Longueur
d'onde
naturelle Matière
qui s'éloigne

Décalage des longueurs
d'onde dû à une vitesse
élevée (effet Doppler)

longueur d'onde
plus courte longueur d'onde
plus grande

Décalage dû à une forte
attraction gravitationnelle
(décalage gravitationnel)



Effet combiné: signature
spectrale hypothétique
d'un trou noir

Les trous noirs: réalité ou fiction?

L'hypothèse la plus vertigineuse de l'astrophysique veut que certaines concentrations de masse créent de véritables pièges gravitationnels d'où rien ne peut s'échapper, pas même la lumière. Aux abords d'un trou noir, le temps lui-même s'arrête. Pendant trente ans, les astrophysiciens ont invoqué l'existence de ces trous noirs pour expliquer des événements violents observés au sein des galaxies. A ce jour, toutefois, personne n'a prouvé de façon irréfutable que la Nature produit de tels phénomènes. Peut-être XMM y parviendra-t-il.

Malgré de fortes présomptions, les chercheurs, y compris ceux qui sont convaincus de l'existence des trous noirs, souhaiteraient en savoir plus sur ce qui se passe dans leur voisinage. Le problème sera résolu lorsque l'on aura détecté, à proximité d'un trou noir actif, des processus qui excluent formellement toute autre explication.

Par définition, les trous noirs n'émettent pas de rayonnement. C'est la matière aspirée qui en émet pendant qu'elle tourbillonne vers son funeste destin sous la forme d'un disque aplati dont la température augmente vers le centre. Ce disque émet de la lumière visible et ultraviolette à sa périphérie ainsi que des rayons gamma juste avant la disparition de la matière dans le trou noir. Mais ces rayons gamma sont noyés par d'autres processus. Les émissions les plus proches que l'on puisse clairement détecter sont des rayons X provenant d'une distance égale à environ trois fois le diamètre du trou noir.

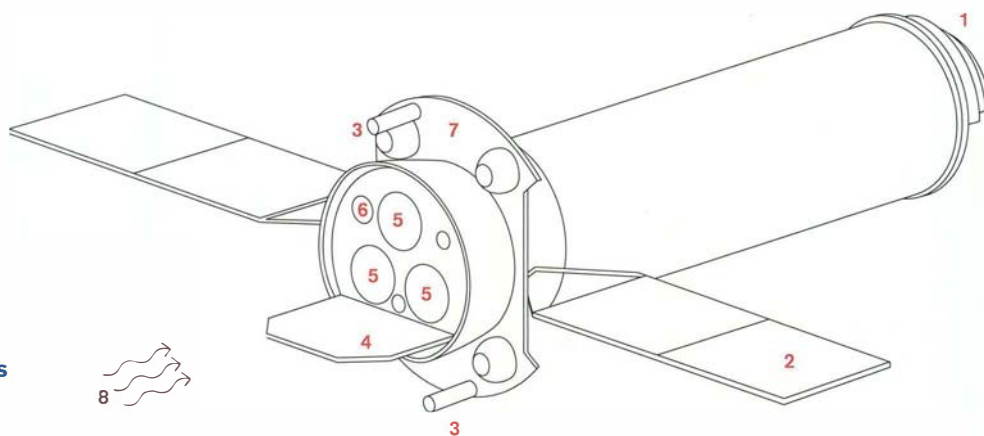
A partir du rayonnement X émis par des éléments précis à des longueurs d'onde connues, XMM identifiera les phénomènes violents à l'oeuvre dans le disque. La vitesse élevée de la matière tourbillonnante se manifestera à une longueur d'onde précise sur une large bande. Sous l'effet d'un champ gravitationnel intense, toutes les longueurs d'onde subiront le décalage gravitationnel vers le rouge bien connu des astrophysiciens. Et la vitesse de variation des émissions déterminera la limite maximale du diamètre de la source.

"Le satellite X japonais Asca nous donne un avant-goût de ce que fera XMM", affirme Andrew Fabian, astrophysicien à Cambridge (Royaume-Uni). "Il détecte des vitesses très élevées dans des gaz émetteurs de rayonnement X à proximité de ce que l'on croit être des trous noirs, et enregistre les premiers indices d'un décalage gravitationnel vers le rouge. XMM, plus sensible et plus précis, devrait nous donner une image plus fine de ce qui se passe."

"Les missions d'astronomie X se succèdent, chacune espérant être celle qui enfin confirmera l'existence des trous noirs", constate Fabian sur un ton d'ironie désabusée, en ajoutant toutefois que "XMM a les meilleures chances d'y parvenir."

Le satellite XMM

- 1 Ensemble plan focal
- 2 Panneaux solaires
- 3 Antenne
- 4 Porte du télescope et pare-soleil
- 5 Miroirs et baffles
- 6 Moniteur optique
- 7 Plate-forme portant les équipements satellite
- 8 Rayons X



Instruments scientifiques

EPIC

Caméra à comptage de photons
(spectromètre-imageur)
PI: G.F. Bignami
IFC, Milan (Italie)
Co-Is: I, D, F, UK

RGS

Spectromètre à réseaux par réflexion
PI: A.C. Brinkman
SRON, Utrecht (Pays-Bas)
Co-Is: NL, CH, UK, USA

OM

Moniteur optique
PI: K.O. Mason
MSSL, Holmbury St Mary, UK
Co-Is: UK, B, I, USA

PI: chercheur principal
Co-Is: pays des chercheurs associés

Les caméras CCD de tous les télescopes d'XMM peuvent distinguer les rayons X de différentes longueurs d'onde d'après l'énergie délivrée par chaque particule du rayonnement X, ou photon, à un élément d'image. Les comptages faibles de l'astronomie X présentent un avantage, car il est peu probable que deux photons arrivent dans le même élément d'image pendant un intervalle de comptage donné. En mesurant la proportion des rayons X de longueurs d'onde différentes, les caméras peuvent donner une idée du spectre d'une source. Cette spectroscopie sommaire a pour nom spectrophotométrie.

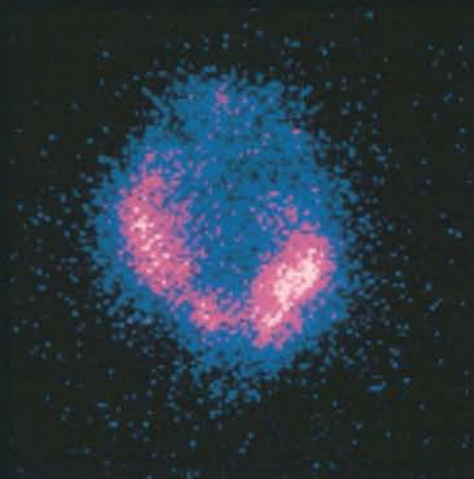
Pour obtenir une analyse plus précise du spectre, deux télescopes détournent une partie du faisceau incident au moyen de séries de grilles qui diffractent les rayons X, ce dispositif ayant pour effet de répartir les différentes longueurs d'onde sur une barrette de CCD dans un plan focal secondaire. Une distribution continue de l'énergie sur toute la bande du spectre révèle la présence de processus thermiques et physiques de grande ampleur dans la source. Des raies caractéristiques de certains éléments chimiques apparaissent à des longueurs d'onde précises.

Les atomes auxquels correspondent ces raies sont presque à nu, après avoir été dépouillés de presque tous leurs électrons par la température élevée qui règne dans la source X. L'oxygène et le fer hautement ionisés sont très aisés à distinguer et particulièrement utiles aux astronomes du fait de leur abondance dans le cosmos. Outre ses télescopes X, le satellite XMM emportera un télescope de facture classique, de haute sensibilité, qui observera la même région du ciel dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge. Les astronomes sauront ainsi exactement ce que les télescopes X regardent et pourront immédiatement analyser les objets intéressants, sur un large éventail de longueurs d'onde.

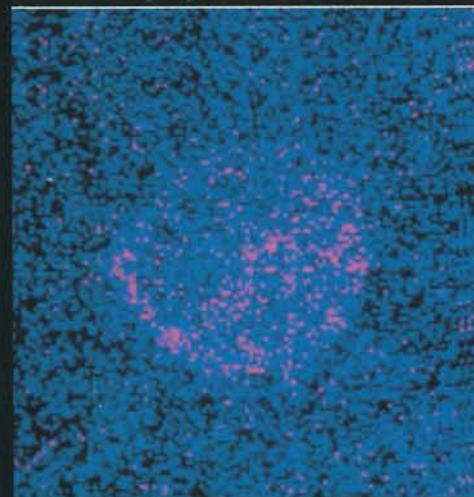
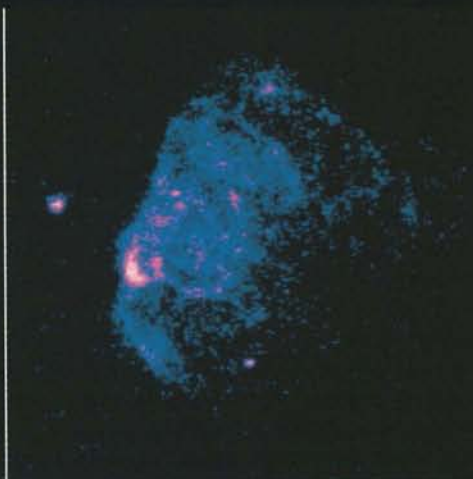
Détection des rayons X

XMM est tenu d'avoir une certaine longueur en raison de la focale de ses télescopes X (7,5 mètres). Les images formées au plan focal sont projetées sur des puces au silicium très sensibles aux rayonnements, appelées dispositifs de transfert de charge (communément connus sous le nom de CCD). Le satellite japonais Asca est le premier satellite X à avoir démontré les avantages des CCD, nettement supérieurs aux détecteurs traditionnels utilisés dans les missions précédentes. L'un des télescopes de XMM est relié à une caméra CCD de haute technologie, capable de détecter des variations rapides d'intensité dans un intervalle de temps avoisinant le millième de seconde, voire moins, ce qui est important pour la recherche des trous noirs.

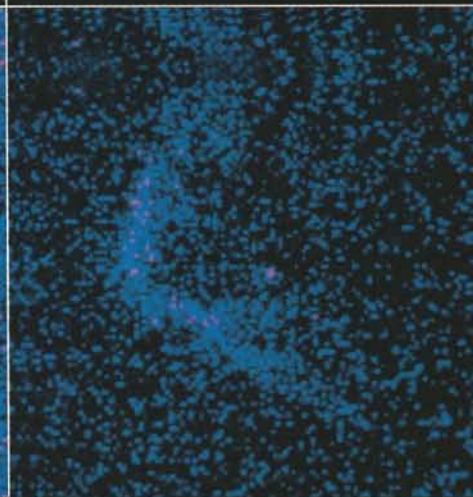
Exosat CMA
Reste de la supernova Cas-A



Exosat CMA (Lexan)
Reste de la supernova Puppis-A



Exosat CMA
Reste de la supernova SN 1006



Exosat CMA
Reste de la supernova RC W86

Restes de supernovae. Le satellite d'astronomie X Exosat de l'ESA (lancé en 1983) a enregistré les rayonnements émis par les nuages de matière éjectée à l'occasion de ces phénomènes explosifs. XMM découvrira des restes de supernovae dans notre Galaxie ainsi que dans des galaxies voisines et analysera les processus à l'origine de ce rayonnement X.

Univers à explorer. Lorsque le satellite allemand d'astronomie X Rosat observa pendant 42 heures d'affilée une petite portion du ciel dans la Grande Ourse, il y découvrit des dizaines de sources faibles. La densité y est estimée à 400 sources X par degré carré, soit plus de 10 millions dans l'ensemble du ciel. "Le ciel observé dans le rayonnement X contient de nombreux objets intéressants", déclare Joachim Trümper (Garching), doyen des spécialistes allemands de l'astronomie X. "Ces recherches approfondies de Rosat justifient pleinement la réalisation d'instruments plus puissants comme XMM."



Cliché: J. Trümper (MPE Garching)

Une machine à découvertes

Les astronomes ont établi une longue liste de cibles pour XMM. Ils souhaitent passer en revue et consolider les acquis de l'astronomie X, mais aussi faire de nouvelles découvertes dont seul XMM sera capable.

L'émission de rayons X par l'atmosphère, ou couronne, des étoiles ordinaires a été mise en évidence pour la première fois dans le cas du Soleil. L'échauffement des couronnes jusqu'à des températures propices à l'émission dans le rayonnement X est un mystère que XMM cherchera à élucider en comparant des étoiles de tailles et de natures très différentes. Le satellite détectera des variations temporelles et fera appel à la spectroscopie pour établir une corrélation entre les émissions X et le déplacement et la température des gaz.

Les 'vampires' que sont les étoiles X binaires résultent de la mort de l'une des composantes d'un couple d'étoiles formant un système binaire. La matière est extrêmement dense dans les naines blanches, les étoiles à neutrons ou les trous noirs, qui se 'nourrissent' du gaz de leur compagnon. XMM distinguera clairement ces étoiles X binaires, même dans des galaxies voisines. Grâce à son spectromètre, il décrira en détail ces objets denses et nous montrera comment les gaz tourbillonnent autour d'eux avant d'y être engloutis.

Le haut intérêt de ce puissant observatoire tient en partie au fait que, en examinant une source X prise comme objectif, il recueillera automatiquement des informations détaillées sur des centaines d'autres sources se trouvant dans le même champ de visée. Cette moisson, fruit du hasard, pourrait d'ailleurs réserver quelques surprises. XMM glanera également une multitude de données statistiques sur des sources de toutes sortes, qui pourraient éclairer les cosmologues sur la nature et l'histoire de l'Univers.

Parmi les sources X ainsi découvertes au gré du hasard par XMM, beaucoup seront des galaxies actives lointaines. Imaginons la présence, au cœur d'une galaxie, d'un trou noir géant engloutissant étoiles et gaz. Dans ce cas, la zone avoisinant ce trou noir émettra des rayons X. Le rayonnement X est donc idéal pour l'observation spectroscopique des conditions extraordinaires régnant dans cette région. Les astrophysiciens ne parviennent pas à expliquer les grandes différences d'aspect des galaxies en proie à des perturbations. En échantillonnant plusieurs milliers d'entre elles, XMM montrera que ces différences sont plus apparentes que réelles, ou il définira les processus physiques qui les expliquent.

En localisant de puissantes galaxies X jusqu'à l'extrême limite de l'Univers visuellement observable, XMM remontera le temps jusqu'à la formation des galaxies, qui pourraient être à l'origine du rayonnement X cosmique inondant l'ensemble du ciel. Selon une des théories proposées, ce rayonnement proviendrait des nombreuses galaxies qui existaient à l'état actif au tout début de l'Univers et qui émettaient dans ces longueurs d'onde alors que d'autres émissions étaient occultées.

"XMM marquera un tournant dans l'astronomie du XXI^e siècle", précise Tone Peacock, responsable scientifique du projet à l'ESA. "Ses découvertes seront approfondies par d'autres observatoires travaillant dans d'autres longueurs d'onde."

Intégral: le rayonnement gamma d'une nature déchaînée

Alors qu'il a fallu des siècles pour perfectionner les télescopes terrestres, quelques dizaines d'années auront suffi pour faire progresser l'astronomie spatiale, chaque satellite apportant son lot de découvertes. Il est difficile de justifier le coût d'une nouvelle mission spatiale si elle ne contribue pas à élargir considérablement le champ des connaissances. Comparés au satellite COS-B de l'Agence spatiale européenne, qui a fait oeuvre de pionnier de l'astronomie gamma voici une vingtaine d'années, les satellites des années 90 que sont l'Observatoire Compton de la NASA et le Granat russe marquent de grands progrès. Intégral, le futur observatoire gamma de l'ESA dont le lancement est prévu en 2001, aura une efficacité encore dix fois supérieure.

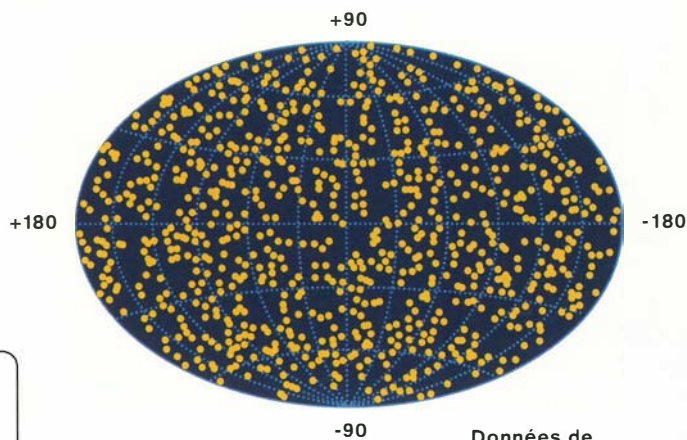
Masque codé et observation du ciel dans le rayonnement gamma. Ce masque sera installé au-dessus de l'imageur à bord du nouveau satellite Intégral de l'ESA. Les ombres portées du masque sur le réseau de détecteurs permettront d'estimer avec précision la direction des sources gamma. Le spectromètre sera équipé de détecteurs au germanium qui mesureront, avec une précision et une sensibilité inégalées, l'énergie des photons gamma.

INTEGRAL



Sur Terre, les rayons gamma sont connus sous la forme de radiations pénétrantes émises par les corps radioactifs. Les émissions gamma venant de l'Univers lointain sont, quant à elles, bloquées par l'atmosphère. Ce sont les télescopes spatiaux gamma qui peuvent détecter la matière radioactive de l'Univers et mettre en évidence des événements associés à un dégagement d'énergie intense, généralement d'origine gravitationnelle et non nucléaire. Le rayonnement gamma nous révèle les processus les plus violents à l'oeuvre dans la Nature.

Sursauts gamma



Cette carte de l'ensemble du ciel obtenue par Compton indique une répartition isotrope des directions des sursauts gamma

Données de l'observatoire Compton GRO, BATSE/NASA

Intégral: caractéristiques techniques

Objectif

observer et analyser les sources cosmiques de rayonnement gamma

Gamme de longueurs d'onde

10 MeV à 15 keV (0,0008 à 0,2 nanomètre)

Agence responsable du projet

ESA, avec la participation de la Russie et de la NASA; Rôle dans le programme Horizon 2000: mission M2 de taille moyenne

Nom

INTErnational Gamma Ray Astrophysical Laboratory

Masse

3,6 tonnes

Longueur

6 mètres

Lancement

2001

Lanceur

Proton (Russie)

Orbite

excentrique de 72 h; périégée: 48 000 km, apogée: 115 000 km; inclinaison: 51,6° par rapport à l'équateur

Stations sol

Villafranca (ESA), associée à Goldstone et éventuellement à Canberra (NASA)

Exploitation

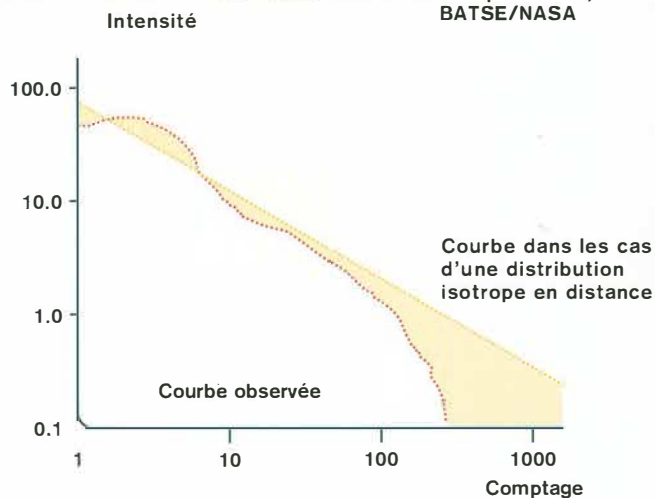
24 h par jour avec trois stations

Durée de vie

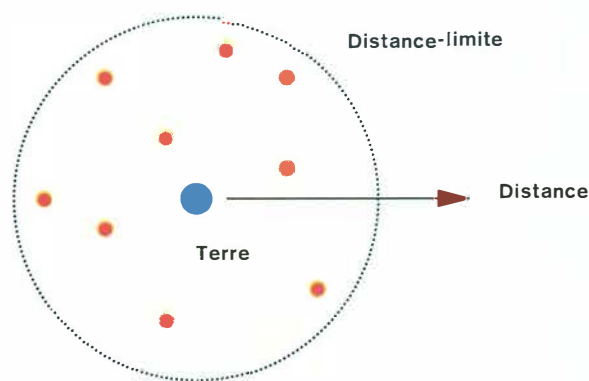
2 à 5 ans

Alimentation en énergie

panneaux solaires



Les comptages à différentes intensités indiquent l'absence de sursauts gamma très faibles (les plus éloignés)



Les sursauts gamma sont donc répartis de façon isotrope dans l'espace cosmique, mais seulement jusqu'à une certaine distance (inconnue)

Que sont les mystérieux sursauts gamma?

Environ deux fois par jour, il se produit quelque part dans l'Univers un événement violent déclenchant une éruption de rayons gamma, qui peut durer d'un centième de seconde à quatre-vingt-dix minutes. Certains de ces cataclysmes constituent, pendant un bref laps de temps, les objets les plus brillants du ciel gamma, tandis que d'autres ont un éclat plus faible.

Ce type d'explosion fut découvert à la fin des années 60 par des satellites américains qui avaient en fait pour mission de surveiller les émissions gamma associées aux essais nucléaires soviétiques. Les astronomes furent informés de leur existence vers 1973 et, pendant plus de vingt ans, donnèrent libre cours à leur imagination sans toutefois parvenir à une conclusion qui fasse l'unanimité. Les explications suggérées vont de collisions cométaires dans le voisinage du système solaire (hypothèse peu plausible), à des collisions entre étoiles à neutrons très denses dans des galaxies lointaines (hypothèse hardie mais séduisante).

L'observatoire Compton de la NASA a constaté que ces sursauts sont uniformément répartis en coquille autour de nous. Il est donc exclu de les associer purement et simplement à la Voie lactée qui forme un anneau bien marqué sur la sphère céleste. De plus, la différence d'éclat entre les sources les plus faibles et les plus brillantes ne dépasse pas le centuple. Cela signifie que la coquille en cause possède une limite extérieure. La seule limite logique, selon certains astrophysiciens, se situerait aux confins de l'empire des galaxies, dans des temps si reculés qu'il n'existait pas encore de galaxies. S'il en allait ainsi, les sursauts gamma jalonnent l'Univers dans sa quasi-totalité.

Avec Intégral, l'ESA a adopté une stratégie particulière pour lever le voile sur ce mystère. Au lieu de balayer le ciel de façon à observer ce qui s'y passe au jour le jour, comme l'a fait Compton, les astronomes d'Intégral attendront les quelques événements susceptibles de se manifester chaque année dans son champ de visée pendant que leurs instruments observeront des cibles gamma plus normales. Ensuite, ils analyseront automatiquement et plus attentivement que jamais les émissions gamma de ces sursauts. Et comme Intégral observera la même région du ciel pendant plusieurs jours d'affilée, ils pourront explorer le site d'un sursaut dans l'espoir d'y trouver les indices, si faibles soient-ils, d'une élévation de température ou d'une suite quelconque de cet événement.

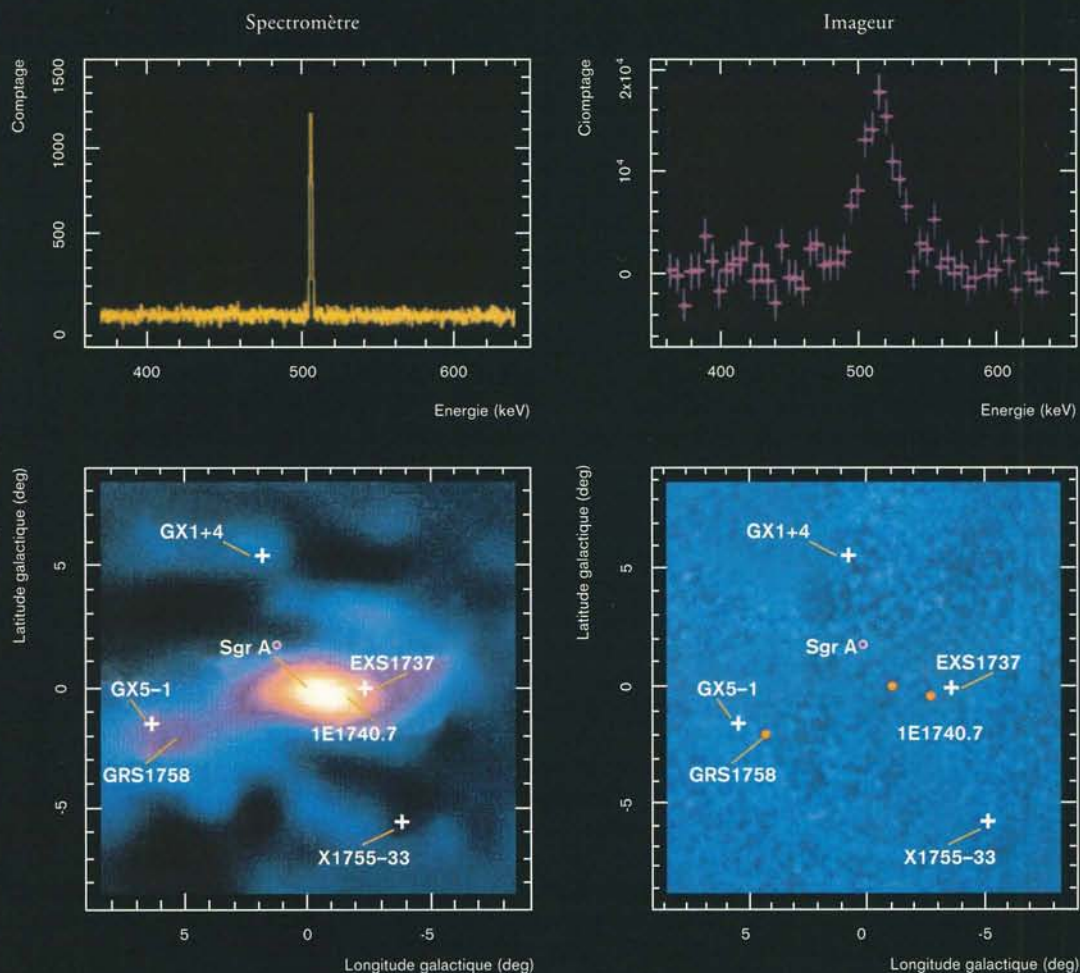
Jamais personne n'a pu associer un éclair de lumière visible à un sursaut gamma. Intégral sera équipé d'une petite caméra optique (OTC), qui observera la même région du ciel que les instruments gamma et X. Peut-être franchirons-nous une nouvelle étape dans l'étude de ce phénomène si nous parvenons à observer un flash de lumière visible qui coïncide avec un événement. S'agissant des sursauts gamma, Christoph Winkler, responsable scientifique du projet Intégral à l'ESA, se dit "convaincu qu'Intégral a de bonnes chances de résoudre l'énigme".

A quoi peut bien ressembler le cœur de la Galaxie? La vision que les instruments d'Intégral auront du centre de notre Galaxie a été simulée par ordinateur. Voici à quoi pourrait ressembler le cœur de la Voie lactée, vu dans le rayonnement gamma émis par l'annihilation des positrons. Le

spectromètre (à gauche) en identifiera plus nettement l'émission caractéristique, tandis que l'imageur (à droite) déterminera plus aisément la position des sources. Les points

référencés correspondent aux positions pour lesquelles les astronomes ont déjà signalé des émissions X ou gamma.

Cliché: G. Skinner (Birmingham, UK)



Explosions stellaires et trous noirs

Comme sur Terre, la matière radioactive dispersée dans l'espace interstellaire émet des rayons gamma présentant des niveaux d'énergie caractéristiques. Les sources les plus puissantes sont les nébuleuses nées de l'explosion d'une étoile et qui alimentent notre Galaxie en éléments chimiques nouveaux, dont certains sont radioactifs. Ce rayonnement propice à la découverte d'étoiles mortes et de particules de matière nouvelle offre de riches possibilités à l'observatoire Intégral, qui passera plusieurs mois à arpenter la Voie lactée et à rechercher les lieux où se sont produits des explosions stellaires.

Intégral pourrait également contribuer à clarifier une énigme soulevée par l'observatoire Compton de la NASA. Cet observatoire gamma a décelé, grâce au rayonnement à 1,8 MeV de l'aluminium 26, des éléments produits par des milliers d'explosions d'étoiles sur le pourtour de la Voie lactée pendant le dernier million d'années environ. Alors qu'ils s'attendaient à trouver une répartition relativement uniforme, les astronomes décelèrent des zones d'émissions intenses au niveau d'énergie de l'aluminium, s'étendant sur plusieurs degrés de la sphère céleste, séparées par des zones d'émissions plus faibles.

"Les taches brillantes nous ont beaucoup surpris", explique Volker Schönfelder, de Garching (Allemagne), dont l'instrument COMPTEL a permis de cartographier ces sources. "Faut-il y voir d'étranges concentrations d'explosions stellaires? Des restes de supernovae proches? Ou quelque chose de très différent que nous n'avons pas les moyens d'imaginer à l'heure actuelle?"

La radioactivité n'est que le plus familier des nombreux processus physiques de l'Univers émettant dans le rayonnement gamma. C'est ainsi, par exemple, que la rencontre aléatoire de gaz interstellaires et de particules cosmiques de très haute énergie se traduit par l'émission diffuse de rayons gamma tout autour du disque de la Voie lactée. Ce processus permet d'étudier le comportement des rayons cosmiques ainsi que la répartition du gaz dans la Galaxie.

Divers processus engendrent une émission gamma à 0,5 MeV, correspondant à la raie dite "d'annihilation". Celle-ci s'observe lorsqu'un électron ordinaire et un positron (antiparticule de l'électron) plus rare se rencontrent et se détruisent mutuellement. Comme le rayonnement gamma de plus haute énergie peut donner naissance à des électrons et à des positrons, il se transforme spontanément en grande partie selon ce modèle. Mais les positrons peuvent également avoir pour origine d'autres processus, comme la désintégration d'éléments radioactifs, et il se pourrait que les accélérateurs naturels présents au voisinage des trous noirs émettent également des faisceaux de positrons. En 1991, le télescope français gamma à masque codé embarqué à bord du satellite soviétique Granat détecta une très puissante émission gamma à 0,5 MeV au cours d'une éruption de rayons X aussi brève qu'intense, localisée dans Nova Muscae. Les astronomes, confortés par d'autres indices, parvinrent à la conclusion que Nova Muscae était un trou noir stellaire engloutissant du gaz. L'instrument gamma observa également des émissions à environ 0,2 MeV, qui provenaient peut-être des émissions à 0,5 MeV diffusées par le disque de gaz chaud présumé tourbillonner autour d'un trou noir. Intégral balaiera les régions denses de la Galaxie à intervalles de quelques jours, à la recherche d'événements similaires. Il pourrait découvrir au rythme d'un par mois des phénomènes susceptibles de constituer des trous noirs. Il existe des points chauds gamma près du centre de la Voie lactée, où les astronomes soupçonnent la présence d'un gigantesque trou noir. L'image qu'ils en ont est brouillée par plusieurs objets, parmi lesquels pourraient se trouver de petits trous noirs. Les observations d'Intégral, en ce qui concerne notamment la recherche de faisceaux de positrons, pourraient contribuer à éclaircir certaines questions controversées concernant le cœur de notre Galaxie.

1 Imageur

Télescope gamma équipé d'un masque codé, de scintillateurs à l'iodure de césium et d'un blindage au germanate de bismuth
Surface du détecteur: environ 2500 cm²
70 keV à 10 MeV

2 Spectromètre

Spectromètre gamma équipé d'un masque codé, de détecteurs au germanium 70 et d'un blindage au germanate de bismuth
Surface du détecteur: 327 cm²
15 keV à 10 MeV

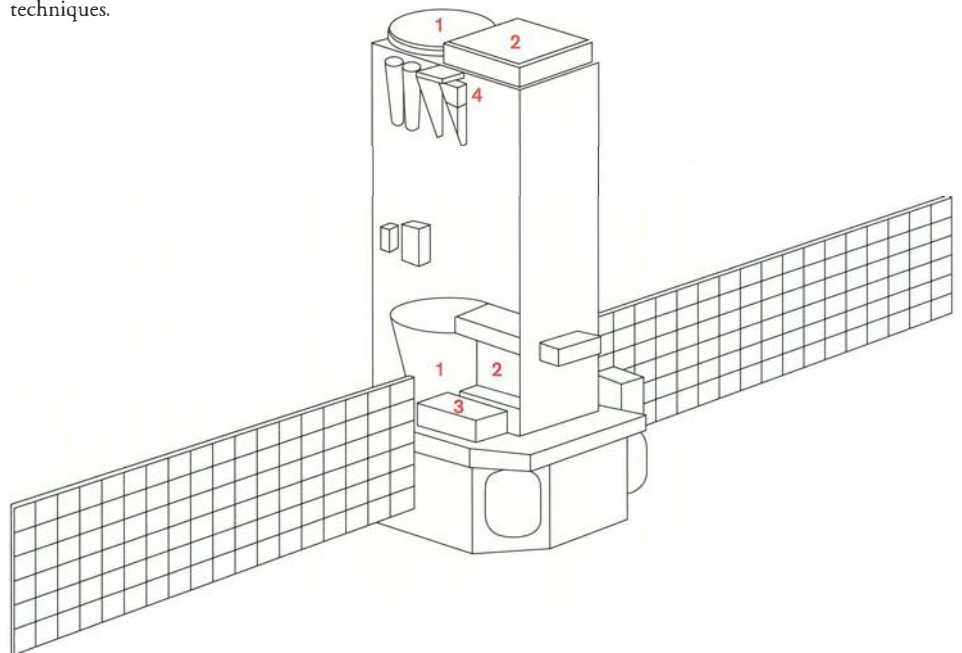
3 Moniteur de rayons X

Télescope à rayons X équipé d'un masque codé et d'un compteur proportionnel imageur rempli de xénon
Surface du détecteur: 1000 cm²
3-120 keV

4 Caméra OTC

avec objectif 30 mm f/1,0 et dispositif CCD
2048 x 1024 pixels
550-850 nanomètres (du jaune à l'IR proche)

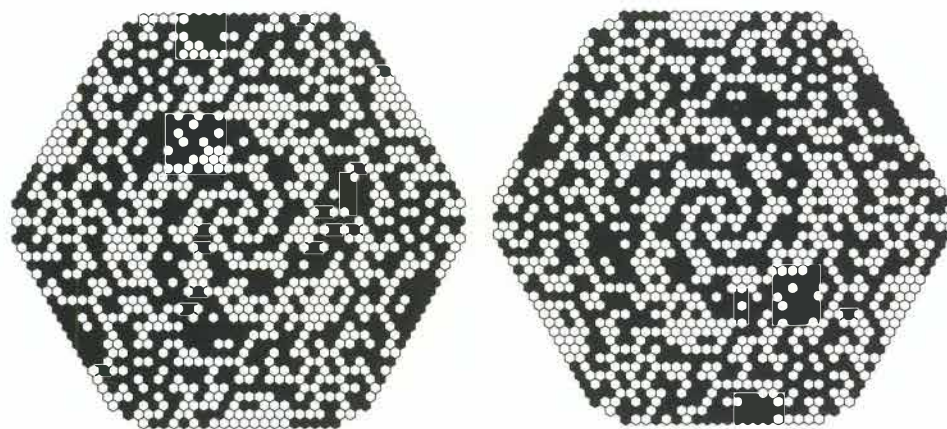
Module de charge utile d'Intégral.
Sur ce schéma réalisé lors de l'étude 1992-1993, on peut voir un spectromètre et un imageur gamma associés à des moniteurs de rayons X et de lumière visible.
La configuration du satellite est donnée à titre purement indicatif. Elle évoluera au fil des études techniques.



Un masque ingénieux

Bien que les autres émissions cosmiques se caractérisent pour les astronomes par leur longueur d'onde, le rayonnement gamma se mesure pour les spécialistes de ce domaine en mégaelectronvolts (MeV). Une particule gamma de 1 MeV véhicule autant d'énergie qu'un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 million de volts. Comme cela équivaut à environ un million de fois l'énergie d'une particule de lumière visible, un objet cosmique présentant la même luminosité dans ces deux domaines du spectre émet des quantités nettement moindres de particules gamma. Il faut parfois un temps d'exposition de plusieurs jours, voire de plusieurs semaines, pour collecter suffisamment de particules gamma et obtenir un cliché fiable. L'astronomie gamma rencontre des problèmes qui n'existent pas aux autres longueurs d'onde. Pour l'essentiel, ses méthodes de détection sont celles de la physique des particules, qui analyse l'interaction des rayons gamma et de la matière au moyen de détecteurs à état solide ou de chambres à étincelles. Les télescopes à focalisation, y compris les modèles spéciaux utilisés en astronomie X, ne conviennent pas à l'observation gamma. La localisation précise des sources a été longue et difficile, les méthodes de balayage ayant pour effet d'occulter à un moment donné la plus grande partie du rayonnement incident. Intégral fait appel à une astuce inventée en Europe et connue sous le nom de masque codé, qui permet de détecter avec efficacité les rayons gamma cosmiques sans l'aide d'un télescope à focalisation.

Cette technique consiste à placer en avant des détecteurs un masque composé de zones opaques et d'orifices agencés selon un algorithme mathématique précis. Le rayonnement de sources cosmiques arrivant de directions différentes dans le champ de visée traverse le masque avant d'atteindre, sous forme d'ombres portées, les détecteurs. On compte le nombre de rayons gamma atteignant chaque position. Un traitement informatique permet ensuite de dissocier ces ombres les unes des autres et de déterminer la position et l'intensité de chaque source. La validité de la technique du masque codé a été démontrée par des chercheurs britanniques pour les rayons X, une première fois en 1976 à bord d'un ballon, puis en 1985 pendant 75 heures d'observations conduites dans le Spacelab-2 de l'ESA à bord de la navette spatiale américaine. D'autres chercheurs, français et russes, ont adopté cette technique dans des instruments gamma et X équipant le satellite russe Granat, lancé en 1989. Intégral comprendra un spectromètre et un imageur gamma de haute technologie qui seront tous deux équipés d'un masque codé. Le traitement informatique des données de l'imageur permettra de déterminer les positions de sources lumineuses ponctuelles en fonction de leur ombre portée, avec une précision de l'ordre du centième de degré, mais aussi de cartographier des sources diffuses avec un pouvoir de résolution pouvant atteindre quelques dixièmes de degré. A titre de comparaison, le satellite COS-B, au tout début de l'astronomie gamma, avait un pouvoir de résolution de 2 degrés.



Masque codé proposé pour l'imageur. Les particules gamma passeront à travers un masque alvéolé (à gauche) dans lequel la moitié des orifices sont bloqués par du tungstène. Les particules ayant franchi le masque se dirigeront vers un réseau de détecteurs, également alvéolé, placé à 4 m en arrière du masque. Il n'y a pas de correspondance bi-univoque entre l'orifice d'entrée et la position du détecteur excité par le photon. Le masque est toutefois agencé de sorte qu'une rotation de 60 degrés (à droite) ouvre les éléments fermés et ferme les éléments ouverts. Des méthodes statistiques permettront ensuite de calculer la position des sources gamma susceptibles d'avoir activé le détecteur.

Au-delà de la Voie lactée

Les supernovae, ces spectaculaires explosions stellaires créatrices de matière, se produisent rarement dans notre Galaxie, mais fréquemment dans des galaxies voisines. En analysant le rayonnement gamma émis par les nuages de débris de formation récente, les astronomes peuvent déchiffrer directement les processus nucléaires qui, dans des temps reculés, ont conduit à la formation, dans les étoiles, des atomes dont nous sommes faits. Intégral pourra observer des supernovae situées à des dizaines de millions d'années-lumière.

Les observatoires gamma actuels ont suscité une vive émotion parmi les astrophysiciens en découvrant des galaxies gamma, également dénommées blazars. Selon la théorie actuelle, un jet d'électrons, issu des environs d'un trou noir géant au cœur d'une galaxie active, s'orienterait directement vers la Terre. Entrant en collision avec des particules de lumière ordinaire, ces électrons provoqueraient un transfert d'énergie et transformeraient les photons en particules gamma.

Maintenant que l'astronomie gamma commence à explorer l'extérieur de la Voie lactée, son horizon recule vers les limites extrêmes de l'Univers observable. À côté des blazars et autres objets, des cataclysmes encore inexpliqués de l'espace intergalactique lointain peuvent donner naissance à des sursauts gamma de courte durée. Mais plus les observatoires gamma existants font de découvertes, plus il apparaît nécessaire de confronter les théories avec des observations plus fines.

"Intégral utilisera aussi une autre technique, tout aussi importante que celle des masques codés: la spectroscopie au germanium", explique Christoph Winkler, responsable scientifique du projet Intégral à l'ESA. "Nous ferons en sorte que la proportion de germanium 70, qui est de 20% à l'état naturel, dépasse les 90%. Des chercheurs américains ont testé, à bord de ballons, des détecteurs gamma au germanium 70. Ces dispositifs réduisent considérablement le bruit de fond dû à la radioactivité - la désintégration bêta. Et grâce à des techniques permettant de chercher des signaux dans la profondeur des détecteurs, nous pouvons presque entièrement éliminer ce bruit parasite." Le spectromètre fonctionnera à -190°, son refroidissement étant assuré par un système mécanique. Il mesurera l'énergie des rayons gamma avec une précision meilleure que 0,2%, soit une amélioration d'un facteur 40 par rapport aux missions spatiales actuelles. Les astronomes pourront par exemple en déduire la température et l'état de la matière émettrice de rayons gamma, et distinguer trois niveaux de température - bas, moyen ou élevé - du gaz interstellaire. Intégral emportera dans l'espace un télescope X à masque codé ainsi qu'une caméra fonctionnant dans la lumière visible. Du point de vue technique, il aura de nombreux points communs avec le satellite XMM d'astronomie X de l'ESA, qui devrait être lancé deux ans plus tôt. Étant donné que les missions XMM et Intégral se dérouleront en parallèle pendant un certain temps, l'occasion pourrait se présenter de mener des observations simultanées d'objets prédéfinis dans un éventail très large du spectre.

Une mission à l'échelle mondiale

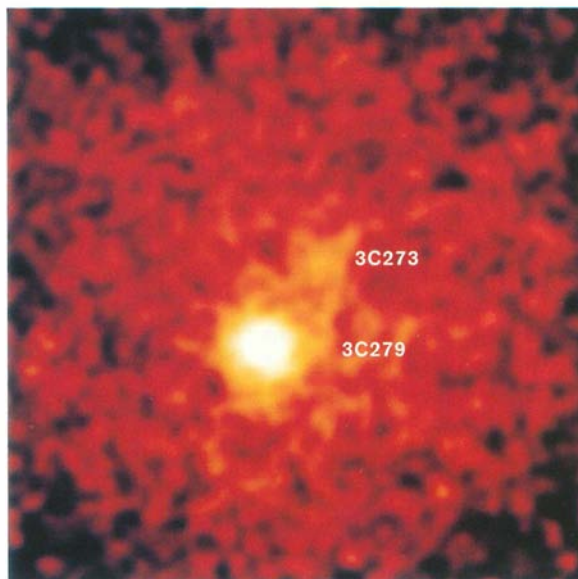
Les Russes et les Américains apportent leur soutien au projet Intégral de l'ESA qui a pour objectif de réaliser un observatoire gamma de sensibilité très améliorée.

L'observatoire Compton de la NASA arrivera au terme de son activité opérationnelle à la fin de la décennie, et Intégral sera lancé en 2001 par une fusée russe Proton qui le placera sur une orbite exceptionnellement élevée. "C'est pour nous un privilège d'avoir pu embarquer notre télescope imageur à bord du satellite Compton", explique Volker Schönfelder, "mais je suis heureux d'avoir aujourd'hui la possibilité de participer à la réalisation de son successeur européen, d'autant plus que l'envoi d'un télescope gamma dans l'espace est un événement rare dans la carrière d'un chercheur. S'il est vrai que nous avons déjà accumulé beaucoup d'observations remarquables, nous sommes terriblement tentés d'en savoir plus. D'où notre intérêt pour Intégral, qui offrira une sensibilité et un pouvoir de résolution plus poussés."

Blazar gamma. Ce cliché présente deux galaxies actives proches l'une de l'autre dans le ciel. 3C 273, brillante en lumière visible, émet faiblement dans le rayonnement gamma.

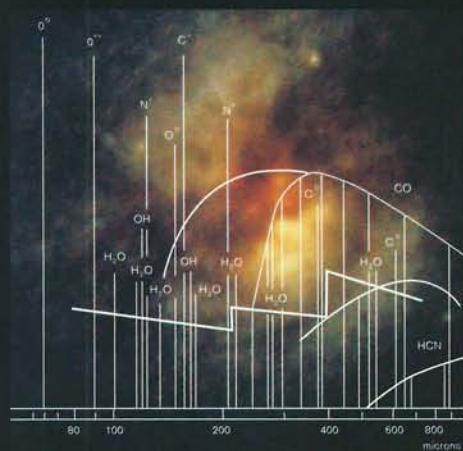
3C 279, moins brillante, est en revanche beaucoup plus lumineuse dans le domaine gamma, comme l'a constaté l'observatoire Compton de la NASA. On pense que ce blazar transforme la lumière en rayonnement gamma sous la forme d'un jet d'électrons dirigé vers nous.

Cliché: C.E. Fichtel
(Goddard/NASA) et équipe
EGRET/Compton-GRO.



De tous les événements qui sont déroulés dans l'Univers, le plus important a été l'organisation des atomes en molécules. Sur au moins une planète possédant de l'eau, ce phénomène a eu une conséquence remarquable: la formation de cellules vivantes à partir de molécules à base de carbone. Chez l'homme, ces structures moléculaires ont fini par évoluer suffisamment pour qu'on puisse même s'interroger sur leurs origines.

A chaque molécule correspond, dans les domaines infrarouge et radio, une longueur d'onde qui permet de l'identifier. Des concentrations de matière connues sous le nom de nuages moléculaires sont dispersées dans notre galaxie, la Voie lactée. La densité de la poussière et du gaz interstellaires y est supérieure à la normale et les nuages peuvent s'agglutiner, sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, en amas de



Chimie à 300 millions d'années-lumière. Les astronomes ont essayé d'imaginer un spectre transmis par FIRST. Voici les signatures qu'ils s'attendent à trouver pour les radicaux OH, les molécules d'eau, de monoxyde de carbone et de cyanure d'hydrogène, ainsi que pour les atomes de carbone, d'azote et d'oxygène, dans la galaxie Arp 220, riche en poussière.

matière de plus en plus denses donnant naissance à de nouvelles étoiles.

Un nuage moléculaire géant peut mesurer 200 à 300 années-lumière et sa masse peut atteindre 100 000 fois celle du Soleil.

Au cours des trente dernières années, les astronomes ont identifié dans les nuages interstellaires plus de quatre-vingt-dix molécules de complexité variable, allant du monoxyde de carbone à des structures exotiques contenant des douzaines d'atomes. Pour trouver à quoi correspondent les émissions, les chimistes doivent créer des molécules et des fragments bizarres en laboratoire dans des enceintes simulant l'espace interstellaire. Certaines molécules complexes évoluent par réactions successives dans le milieu interstellaire. D'autres semblent résulter de la scission de grosses molécules de carbone, les fullerènes, qui ont l'aspect d'un ballon de football et se forment au voisinage des étoiles agonisantes.

FIRST

FIRST: caractéristiques techniques

Objectif

astronomie dans l'infrarouge et
le domaine submillimétrique

Gamme de longueurs d'onde

0,085 à 0,9 millimètre
= 85 à 900 microns = 300-3500 gigahertz
Diamètre du télescope
3 mètres

Lancement

2005

Agence responsable:

ESA. Rôle dans le programme
Horizon 2000: 4ème pierre angulaire

Nom

Far InfraRed and Submillimetre Space
Telescope

Masse

2,5 tonnes

Longueur

6,5 mètres

Lanceur

Ariane 5 (lancement partagé)

Orbite

excentrique de 24 h; périégée: 1000 km,
apogée: 70 000 km; inclinaison: 7° par
rapport à l'équateur

Exploitation

17 h par jour

Durée de vie

2 à 6 ans

Alimentation en énergie

panneaux solaires

Ce sont les nuages froids qui abritent les principales réactions de la chimie cosmique. Les molécules et les atomes de ces nuages émettent avec un maximum d'intensité à des longueurs d'onde de quelques dixièmes de millimètre. L'atmosphère terrestre est remplie de molécules qui bloquent la plupart de ces émissions cosmiques. Malgré ce handicap, les observatoires aéroportés ou érigés sur les sommets terrestres donnent aux chimistes du cosmos un avant-goût des richesses qui restent à découvrir. Lorsque le satellite d'astronomie submillimétrique de l'Agence spatiale européenne s'élèvera au-dessus de l'atmosphère en 2005, équipé d'un télescope de 3 mètres et d'instruments à refroidissement cryogénique, il lèvera le voile sur l'univers moléculaire.

Le télescope spatial FIRST (Far InfraRed and Submillimetre Space Telescope), conçu pour l'observation dans l'infrarouge lointain et les longueurs d'onde submillimétriques, permettra aux astronomes de retracer l'histoire des molécules depuis le Big Bang. Ces molécules témoigneront également des conditions physiques régnant dans des environnements étranges. Molécules et microcristaux réunis forment la poussière interstellaire éjectée lors des explosions stellaires. Avant d'être recyclée dans la création d'étoiles et de planètes, cette poussière passe le plus clair de son temps dans des nuages froids, aux alentours de -250°C, en émettant dans la bande submillimétrique.

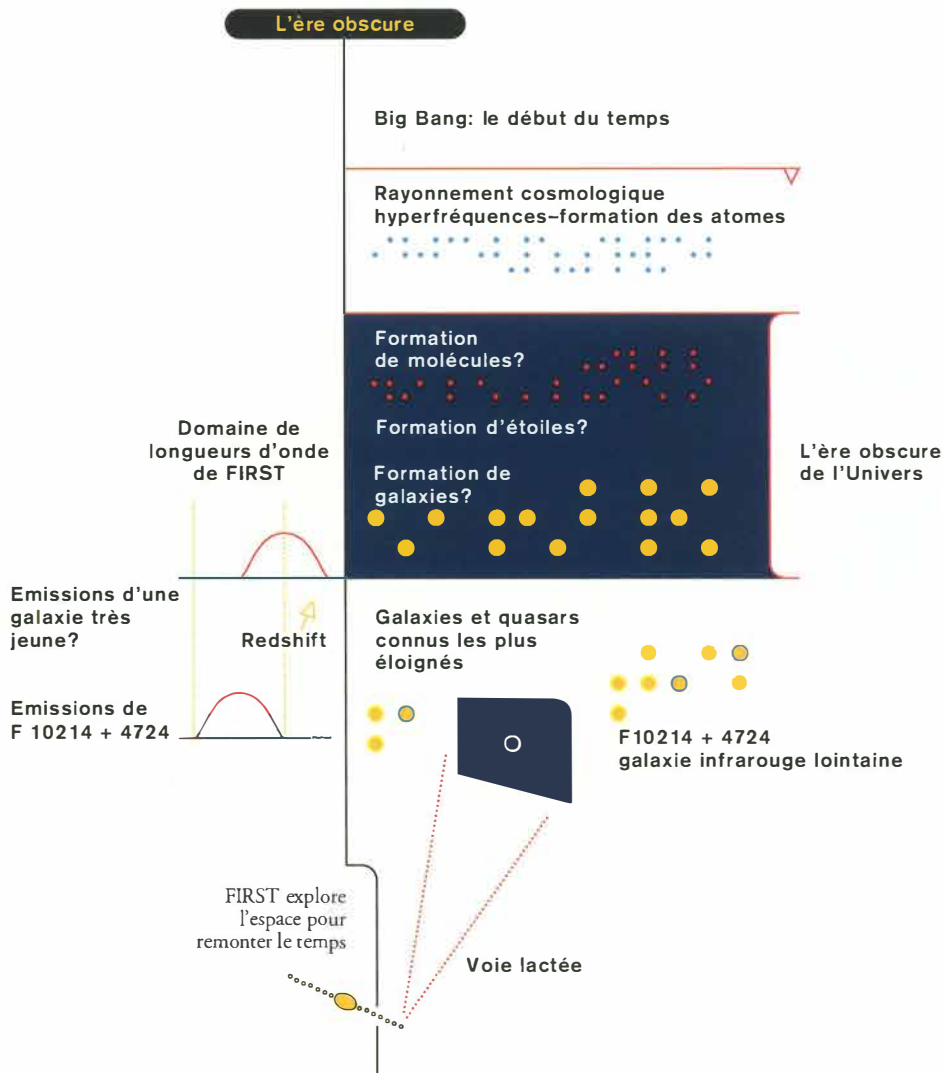
Les atouts particuliers de FIRST tiennent à sa supériorité dans un domaine inhabituel du spectre électromagnétique, celui des ondes submillimétriques, qui marquent précisément la transition entre l'astronomie infrarouge et la radioastronomie. Parmi les scientifiques collaborant à ce projet, il y a ceux qui parlent de "télescope" et de "microns" et ceux qui parlent d' "antenne" et de "gigahertz".

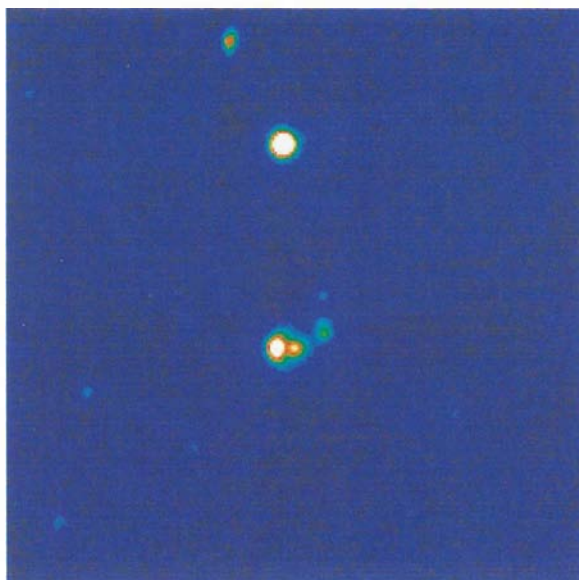
"Compte tenu des compétences particulières qui existent en Europe, nous sommes assurés d'avoir de superbes instruments", affirme Pierre Encrenaz, de Paris, qui conduisit une étude technique sur FIRST en 1992-1993. "Pour la partie infrarouge, le développement du satellite ISO de l'ESA nous rend très optimistes. Pour la partie radio, nous disposons de l'expérience sans équivalent de l'astronomie au sol dans les longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques.

"Aussi, lorsque nous promettons que FIRST sera dix fois meilleur que ses prédécesseurs, nous savons de quoi nous parlons", conclut-il. "Car nous sommes partie prenante dans cette aventure scientifique."

Quand et comment les galaxies se sont-elles formées?

Nos savons très peu de choses de cette partie de l'Univers située entre les galaxies visibles les plus éloignées et le rayonnement micro-ondes du fond du ciel, encore plus lointain, où des amas de gaz donneront un jour naissance à des millions de galaxies. Quelque part dans l'espace-temps intermédiaire, à 'l'ère obscure' de l'Univers, les galaxies ont vu le jour. Ces amas fourmillant d'étoiles parmi lesquels figure notre Voie lactée sont les composantes caractéristiques de la matière visible de l'Univers. Pour bien comprendre les galaxies, les astronomes ont besoin de savoir quand et comment elles se sont formées et à quoi elles ressemblaient dans leur prime jeunesse. L'un des problèmes clés de la cosmologie est de savoir si elles sont apparues isolément ou en amas plus ou moins grands.





Très poussiéreuse et très éloignée. La galaxie infrarouge IRAS F10214+4724 figurant sur ce cliché du grand télescope Keck de Hawaï est très éloignée de nous. Ses émissions infrarouges montrent qu'elle contient une concentration exceptionnelle de poussières éjectées à la suite d'explosions stellaires. Des galaxies de ce type, que FIRST pourra aisément détecter, nous livreront des données nouvelles sur l'Univers tel qu'il se présentait dans sa jeunesse.

Cliché: J. Larkin, K. Matthews, T. Soifer (Caltech); télescope Keck

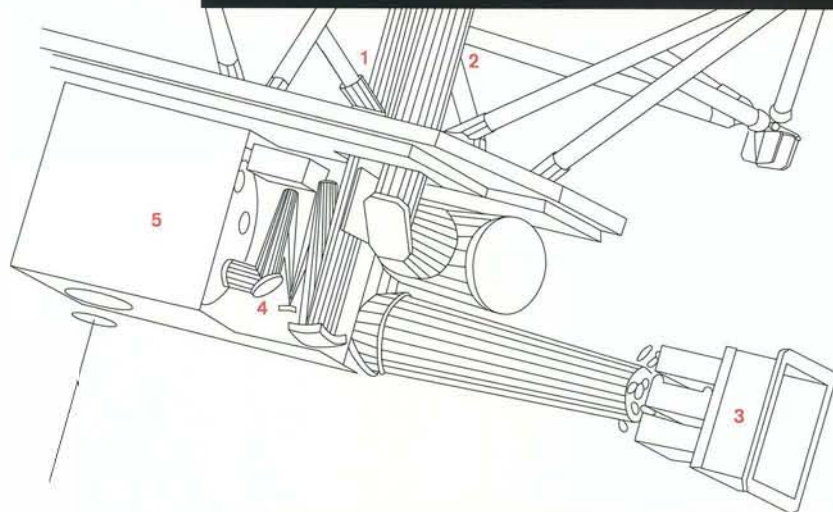
On connaît des quasars plus éloignés de nous dans l'espace, et donc dans le temps, que des galaxies. On suppose qu'ils sont alimentés en énergie par de gigantesques trous noirs nichés au coeur de galaxies par ailleurs invisibles. Certaines radiosources pourraient aussi être de jeunes galaxies, mais, ne pouvant s'appuyer sur des contreparties visibles, les astronomes ne peuvent évaluer leur distance. Pour vérifier leurs théories sur la naissance des galaxies, ils ont besoin de détecter un grand nombre de spécimens très jeunes inaccessibles aux télescopes observant en lumière visible.

"FIRST semble être l'outil idéal pour remonter à l'origine des galaxies", affirme Michael Rowan-Robinson, de Londres. "Nous avons en effet des raisons de penser que les galaxies primitives étaient très riches en poussières et qu'elles émettaient surtout dans l'infrarouge. Mais dans la période de prime jeunesse qui nous intéresse, l'expansion de l'Univers multiplie par six, voire plus, toutes les longueurs d'onde des émissions galactiques. Cet énorme décalage vers le rouge a pour effet de transformer le rayonnement infrarouge en rayonnement submillimétrique, que FIRST distinguera plus nettement que tout autre instrument aujourd'hui à l'étude."

Pendant de nombreuses semaines, le satellite scrutera une région du ciel observable par une 'trouée' du nuage de poussières local de la Voie lactée. D'après les calculs, il est permis de supposer que FIRST découvrira des milliers de galaxies infrarouges, notamment dans des régions très lointaines qui devraient abriter les galaxies les plus anciennes.

A une époque encore plus reculée de 'l'ère obscure', pendant des centaines de millions d'années, l'Univers se composait principalement de gaz chaud. FIRST cherchera des molécules de ce gaz primitif, de sorte que nous pourrions remonter à un stade précoce de la chimie cosmique, à quelques millions d'années du Big Bang.

La charge utile actuellement prévue. Les instruments de FIRST ont été choisis par une équipe de chercheurs européens en 1992-1993. Leur conception sera confirmée ou modifiée d'ici la fin du siècle. Les détecteurs pourront fonctionner à très basse température grâce à un réseau de refroidisseurs mécaniques à cycle Stirling mis au point par des ingénieurs britanniques. Cette technique permettra d'obtenir une durée de vie plus longue que celle d'ISO et d'IRAS, dont le refroidissement était assuré par évaporation d'hélium liquide.



Chocs humides et capsules glacées

L'eau, substance indispensable à la vie, est fabriquée dans les usines cosmiques. Selon la théorie en vigueur, les molécules d'eau se formeraient par l'association de l'hydrogène et de l'oxygène interstellaires sous l'effet d'ondes de choc dues à des explosions stellaires, ou de vents furieux issus d'étoiles nouvelles nées. FIRST explorera le gaz interstellaire ayant subi ce type de phénomène pour essayer d'y détecter de jeunes molécules d'eau, dont il observera le devenir tant dans les nuages moléculaires que dans les amas de matière en cours d'agglutination, prêts à donner naissance à des étoiles et à des planètes nouvelles.

FIRST étudiera aussi le devenir de l'eau plus près de la Terre en observant la vaporisation des glaces primitives des comètes au moment de leur passage près du Soleil, complétant en cela les observations des missions cométaires Giotto et Rosetta de l'ESA. En outre, à l'instar de la sonde Huygens qui sera envoyée vers Titan, FIRST examinera la validité de la théorie selon laquelle les océans et l'atmosphère de la Terre se seraient formés à la suite d'impacts cométaires. Les traces de vapeur d'eau décelées dans l'atmosphère martienne nous permettront de mieux comprendre le climat de la planète rouge à l'heure où l'exploration de surface devrait reprendre.

Les grains et les mélanges de composés carbonés présents dans la poussière interstellaire sont enrobés de glace d'eau. Ces capsules glacées témoignent de la capacité de l'Univers à engendrer la vie. FIRST pourra observer les nuages de poussière non seulement dans la Voie lactée, mais aussi dans d'autres galaxies.

Les molécules et les grains de poussière ne sont pas des sous-produits passifs des processus physiques.

La composition chimique des nuages contribue à déterminer la vitesse à laquelle ils s'effondrent pour donner naissance à des étoiles. Et à mesure que les capsules glacées s'ouvrent au contact de la chaleur, cette composition chimique se modifie. Cette interaction physico-chimique a des effets spectaculaires.

Elle explique par exemple le contraste entre le bloc rocheux qu'est notre planète et la masse gazeuse qu'est Jupiter. FIRST permettra aux astronomes de déceler des processus moléculaires similaires dans l'univers plus lointain des étoiles et des galaxies.

Charge utile actuellement prévue

- 1 Faisceau utile du FIR
- 2 Faisceau utile du MFH
- 3 Oscillateur local du MFH
- 4 Chemin optique du MFH
- 5 Détecteurs du FIR

FIR: instrument infrarouge

Imagerie et spectroscopie 0,085 à 0,3 mm avec une matrice de photoconducteurs

Photométrie et imagerie 0,3 à 0,9 mm avec deux matrices de bolomètres. Température minimale des détecteurs: 0,15 K

MFH: récepteur hétérodyne multi-fréquences

Spectroscopie 0,27 à 0,6 mm (1113 à 490 GHz) avec neuf mélangeurs hétérodynes

Température minimale des détecteurs: 4 K



Nuages de gaz et de poussière.
Ce cliché infrarouge, pris par le
satellite IRAS, de régions fécondes
en étoiles dans la constellation
d'Orion donne une idée des
nébulosités que FIRST sondera au
niveau moléculaire.
Cliché: IRAS/NASA/JPL

Etoiles en incubation

“Nous n’avons pas encore formellement identifié de véritables protoétoiles”, affirme Göran Pilbratt, du Département de science spatiale de l’ESA. “Mais nous sommes certains que FIRST nous aidera à les trouver.” Les protoétoiles sont des sortes d’œufs cosmiques. Elles constituent le chaînon manquant de l’histoire du Soleil et des autres étoiles, qui seraient nés de l’effondrement de nuages de gaz et de poussière. On pense que l’embryon chaud d’une nouvelle étoile est enveloppé d’une coque de gaz et de poussière invisibles émettant uniquement dans les longueurs d’onde submillimétriques, rayonnant dans l’espace cosmique la chaleur intense dégagée par la formation de l’étoile. Celle-ci parvient à “éclosion” lorsque ses émissions deviennent suffisamment intenses pour briser la coque de poussière et laisser s’échapper la lumière visible.

Notre galaxie, la Voie lactée, donne naissance tous les ans à une couvée de plusieurs étoiles nouvelles dont l’incubation a duré des centaines de milliers d’années. On devrait donc pouvoir trouver de nombreuses protoétoiles. La constellation d’Orion ainsi que d’autres nébuleuses sont des sites bien connus de formation d’étoiles. Mais le jour où le “bébé étoile” est détecté en lumière visible, voire dans le rayonnement infrarouge traversant les nuages de poussière, la formation de l’étoile est pratiquement achevée.

Le satellite infrarouge ISO de l’ESA, qui sera lancé en 1995, tentera de détecter d’éventuelles protoétoiles à l’extrémité de son domaine de longueur d’onde opérationnel, à savoir 0,2 millimètre. Le pic d’émission d’une protoétoile devrait se situer à 0,3 millimètre, c’est-à-dire bien au milieu de la bande spectrale dans laquelle fonctionnera FIRST dix ans plus tard. Doué d’une grande sensibilité, ce satellite pourra détecter des protoétoiles à une distance de 5000 années-lumière. De nombreuses “couveuses stellaires” seront donc à sa portée.

FIRST pourra non seulement découvrir sans équivoque bon nombre de protoétoiles, mais aussi les étudier en détail. En identifiant les molécules qui s’y trouvent, il livrera des clés nouvelles sur la chimie de la formation des étoiles. C’est ainsi que les émissions de certaines molécules - les “raies de refroidissement” - contribuent directement à dissiper un excédent de chaleur susceptible d’interrompre le processus d’effondrement. Et les décalages de longueurs d’onde enregistrés dans les émissions des molécules indiqueront la vitesse d’attraction du gaz vers la protoétoile, même si cette vitesse ne dépasse pas quelques centaines de mètres par seconde.

Dans la Voie lactée et d’autres galaxies spirales, les étoiles jeunes se regroupent principalement dans les bras spiraux brillants. Faute de pouvoir trouver une autre explication à cet élégant motif, certains astronomes soupçonnent les galaxies voisines d’émettre des ondes de nature à comprimer le gaz à partir duquel se forment des étoiles. FIRST dressera, avec un degré de détail sans précédent, une carte des zones de formation d’étoiles présentes dans certaines galaxies spirales proches et contribuera peut-être ainsi à résoudre une très vieille énigme.

Les galaxies les plus riches en poussières

Arp 200 est une galaxie brillant d'un très vif éclat dans l'infrarouge dans lequel elle rayonne dix fois plus d'énergie qu'en lumière visible. Une poussière dense obscurcit certaines régions extraordinairement prolifiques en étoiles. Les astronomes y voient la manifestation d'une collision galactique, qui provoquerait dans le gaz interstellaire les perturbations propices à la production en série d'étoiles.

Les collisions galactiques pourraient bien avoir un lien avec les quasars et les galaxies actives, dans lesquels des trous noirs géants engloutissant étoiles et gaz seraient à l'origine de phénomènes cataclysmiques.

Les bouleversements associés aux collisions de galaxies ne se bornent pas à la consommation de gaz donnant naissance à des étoiles nouvelles; les galaxies peuvent également être dépossédées d'une partie de leur gaz par les trous noirs géants susceptibles de se trouver dans l'une ou l'autre d'entre elles, ou dans les deux à la fois.

Lorsqu'il observera Arp 220 et de nombreuses galaxies similaires, notamment M82, relativement proche, FIRST détectera diverses molécules qui témoigneront des conditions physiques régnant dans le gaz interstellaire. D'après l'intensité du rayonnement émis par les poussières dans le domaine submillimétrique, les astronomes pourront calculer la masse totale des poussières de chaque galaxie, ainsi que le taux de formation d'étoiles.

Les astronomes découvrirent la singularité de Arp 220 en 1983, lorsque le satellite IRAS enregistra ses émissions de forte intensité dans l'infrarouge. IRAS localisa également, parmi une multitude d'autres objets, une galaxie lointaine de faible luminosité, F10214+4724. Dix ans plus tard, des observations conduites à partir du télescope Keck d'Hawaï montrèrent qu'il s'agissait en fait d'une galaxie riche en poussières et prolifique en étoiles, mais si lointaine et s'éloignant si rapidement que ses émissions les plus intenses doivent présenter un décalage vers les ondes submillimétriques. Si, comme nous le pensons, l'Univers contient beaucoup d'autres objets similaires, cette découverte offre à FIRST une nouvelle occasion d'explorer les confins de l'empire galactique.

Une attente justifiée

FIRST sera la dernière mission "pierre angulaire" du programme Horizon 2000 de l'ESA. Pour les partisans enthousiastes de ce projet, cela signifie vingt années d'attente depuis la conception initiale du satellite jusqu'à son achèvement. Les équipes chargées de réaliser les instruments ne seront sélectionnées que fin 1997. Après une dizaine d'années de travail, le satellite sera lancé en 2005 par une fusée Ariane 5 et nous pourrions alors recueillir le fruit de ses observations.

Certains esprits critiques se demandent s'il est bien sage d'annoncer aussi longtemps à l'avance la mise en oeuvre d'une mission de science spatiale. Certes, il serait imprudent d'achever plus tôt que de besoin la mise au point des instruments et du projet. Mais l'avantage d'une échéance lointaine, c'est d'avoir suffisamment de temps devant soi pour développer les technologies qui permettront de faire coïncider les ambitions des chercheurs avec un budget réaliste. Toute découverte faite dans l'intervalle par de petits satellites ou par des instruments aéroportés ne fera qu'exacerber le désir de disposer un jour d'un puissant observatoire polyvalent fonctionnant dans la bande complète des ondes submillimétriques. Tout bien pesé, FIRST vaut la peine d'être attendu.



esa

Troisième partie

Horizon 2000 Plus

3

Des tâches difficiles pour le siècle à venir: aperçu général

Vingt ans, c'est long à l'échelle d'une vie scientifique. Des découvertes inattendues suscitent de nouvelles interrogations. De jeunes chercheurs viennent bousculer les idées de leurs aînés. Personne ne sait ce qui préoccupera les scientifiques dans les dix ou vingt ans à venir.

Il n'en reste pas moins que les chercheurs, les gestionnaires et les délégations nationales qui définissent et approuvent le programme scientifique de l'Agence spatiale européenne doivent d'ores et déjà tourner leur regard vers la période 2010-2020. Compte tenu d'un budget annuel relativement modeste, une vision à long terme s'impose si l'on veut éviter les crises de trésorerie et faire face aux problèmes qui surgissent dans chacun des projets tout en assurant aux chercheurs de l'Europe spatiale une succession ininterrompue de missions d'envergure mondiale.

Se choisir des objectifs ambitieux est un des moyens dont on dispose pour résoudre la contradiction entre planification à long terme et imprévisibilité de la recherche. Sans instruments et technologies nouvelles, on ne peut élucider certaines énigmes scientifiques majeures. En matière de recherche spatiale, il s'agira de satellites offrant des capacités jamais atteintes jusque là. Les conseillers scientifiques de l'ESA se montrent généralement prudents quant à la faisabilité technique des missions proposées. Lorsqu'ils se projettent dans l'avenir, à échéance de vingt ans, ils doivent se demander si leurs idées sont suffisamment hardies.

Un comité d'étude dont les réunions se sont échelonnées sur une période de dix mois en 1993 et 1994 a passé en revue cent dix propositions, émises à l'initiative de milliers de chercheurs européens et de quelques-uns de leurs confrères américains. Selon les termes de son président Lodewijk Woltjer (St Michel, France), le comité fit preuve d'un "degré d'unanimité surprenant" dans ses choix. Trois grandes missions furent retenues pour le programme Horizon 2000 Plus de l'ESA, couvrant la période 2006-2016.

Ces trois nouvelles "pierres angulaires" intéressent de nombreux domaines. La première, vouée à l'exploration du système solaire, aura pour objectif d'explorer l'énigmatique planète Mercure au voisinage du Soleil. La deuxième, consacrée à l'astronomie, s'appuiera sur au moins deux télescopes d'une sensibilité inégalée, dans le visible ou l'infrarouge, et fera appel à la technique de l'interférométrie depuis longtemps privilégiée par les radioastronomes. La troisième a pour ambition de détecter des ondes gravitationnelles.

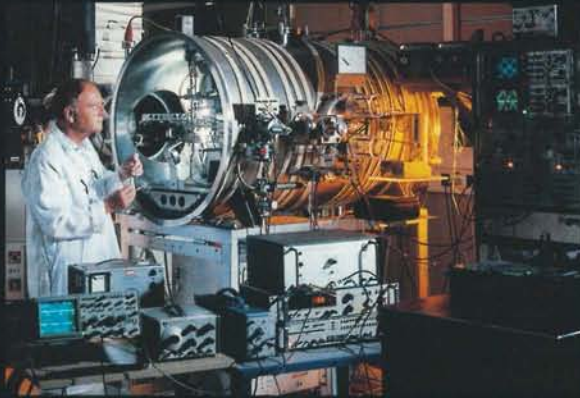
Les conseillers scientifiques de l'ESA lui recommandent de mener de façon autonome les "pierres angulaires" d'Horizon 2000 Plus: que celles-ci restent ouvertes à la participation d'autres agences, mais que leur exécution ne dépende pas de décisions prises ailleurs. Il n'en existe pas moins d'innombrables possibilités de coopération dans la sphère de la recherche spatiale depuis la fin de la guerre froide.

"Nous recevons des offres de coopération de plus en plus nombreuses émanant de spécialistes de renom de pays autres que nos Etats membres", fait remarquer Roger Bonnet, directeur du Programme scientifique de l'ESA. "Ils aiment travailler avec nous, me semble-t-il, parce que l'ESA a apporté la preuve qu'elle était le partenaire le plus fiable dans ce domaine. Cela, nous le devons à la stabilité de notre budget et au fait que nous n'avons jamais annulé une mission déjà approuvée."

Le comité d'étude a relevé des possibilités de collaboration inter-agences en ce qui concerne les petites et moyennes missions d'Horizon 2000 Plus. Le financement prévu pour ces projets permettra à l'Europe de réagir à l'apparition de possibilités nouvelles et de répondre à des questions scientifiques non encore formulées, en choisissant des missions réalisables dans un laps de temps plus court que les pierres angulaires. Le comité d'étude s'est donc abstenu d'être trop directif, mais certaines de ses propositions donnent une idée de la façon dont on pourrait enrichir le programme de l'ESA.

Compte tenu du vif intérêt des chercheurs européens pour le Soleil - dont témoignent la mission Ulysse, en cours, et les projets Soho et Cluster - Horizon 2000 Plus comprendra au moins une mission solaire. L'ESA pourrait prendre part à un projet international d'observation du Soleil en trois dimensions, à partir de satellites sur orbite terrestre. Le comité d'étude a également recommandé à l'ESA de s'associer à d'autres agences spatiales en vue de construire une sonde qui plongerait dans la couronne solaire.

Le document qui décrit Horizon 2000 Plus évoque un nouveau système de propulsion. En effet, l'exploration du Soleil et du système solaire s'appuie sur l'emploi de moteurs-fusées à combustible chimique et sur le recours à l'assistance gravitationnelle des planètes pour placer les vaisseaux spatiaux sur les trajectoires voulues, ce qui nécessite parfois un périple de plusieurs années avant d'atteindre la cible. Or les ingénieurs considèrent que la propulsion électrique utilisant l'énergie solaire pourrait réduire la durée de ces voyages spatiaux. Un moteur à propulsion électrique alimenté par d'énormes panneaux solaires pourrait communiquer à un véhicule spatial une poussée certes faible, mais constante. La propulsion électrique solaire reste une possibilité pour le XXI^e siècle et pourrait trouver sa première application à bord d'une sonde d'exploration de la couronne solaire.



Propulsion électrique. Les ingénieurs de l'ESA étudient depuis plusieurs années la possibilité de propulser les engins spatiaux par des moteurs-fusées électriques.

Mars figure aussi parmi les grands objectifs. L'agence européenne participe déjà à un groupe de travail international mis en place pour programmer l'exécution d'opérations concertées à la surface de la planète rouge. Bien que les incertitudes présentes ne facilitent pas la définition d'une mission vers Mars, le comité d'étude a pensé que l'ESA devrait être prête à apporter une "contribution substantielle" si l'occasion s'en présentait.

S'agissant de l'astronomie, outre la mission d'interférométrie, les experts ont vivement incité l'ESA à poursuivre sa participation au télescope spatial Hubble et à d'autres programmes d'observation en lumière visible et ultraviolette qui seraient appelés à lui succéder. Ils ont noté que la Station spatiale internationale pourrait offrir l'occasion de tester ou de réaliser une nouvelle mission importante dans le rayonnement X ou gamma. Ils ont également recommandé de conduire des études techniques sur des télescopes X à miroirs multiples légers et sur des détecteurs électroniques de rayons X améliorés. En ce qui concerne les ultimes étapes du programme Horizon 2000 Plus et au-delà, le comité d'étude a imaginé, pour la période postérieure à 2016, un satellite d'astronomie X encore plus puissant qu'XXM en cours de construction à l'ESA. Une nouvelle mission d'astronomie dans l'infrarouge est également envisagée.

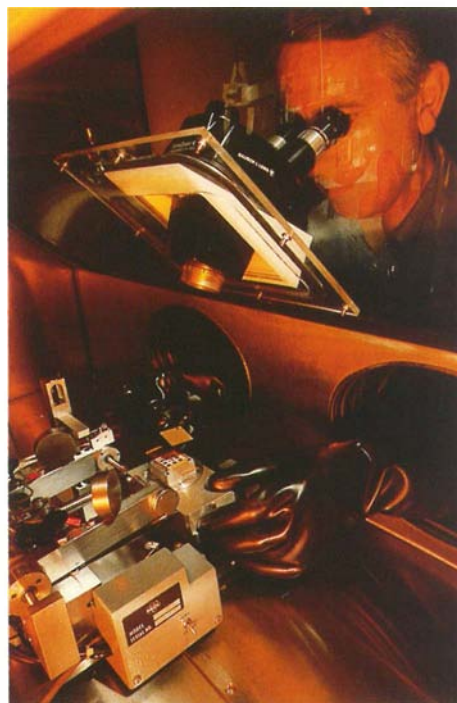
Instruments qualifiés pour l'espace.
Le Département de Science spatiale
de l'ESA participe aux expériences
embarquées à bord des satellites.

Le défi technique

Dans leur définition actuelle, chacune des missions "pierres angulaires" - Mercure, interférométrie et ondes gravitationnelles - coûtera quelque 640 millions d'écus (soit 800 millions de dollars) au niveau des prix de 1995, ce financement étant complété par une participation des agences nationales et des instituts de rattachement des expérimentateurs. De larges possibilités d'action s'ouvriront en Europe à l'industrie aérospatiale et électronique et aux fabricants d'instruments. Tous feront appel aux technologies nouvelles nécessaires pour faire reculer les limites des connaissances.

En fixant des échéances précises, mais sans précipitation excessive, pour la mise en oeuvre de ces missions, l'ESA sera, comme les programmes militaires dans d'autres pays, un moteur de l'innovation technique en Europe. Matériaux inédits pour structures légères et ultra- stables, techniques de refroidissement novatrices, systèmes de commande et de contrôle et instruments de grande sensibilité, circuits électroniques et optiques intelligents, etc. sont autant d'exemples des innovations escomptées dans le cadre d'Horizon 2000 Plus.

Ces "pierres angulaires" sont encore assorties d'un point d'interrogation. En effet, à l'heure où ce texte est rédigé, le principe du programme doit encore être approuvé par les ministres siégeant au Conseil de l'ESA. Mener à bien ces trois missions de première importance pendant la période couverte par Horizon 2000 Plus suppose d'augmenter légèrement, à partir de l'an 2000, le budget annuel du programme. C'est le prix à payer pour faire une place à la physique fondamentale sans pour autant nuire aux engagements pris par l'Agence dans le domaine de l'astronomie et de l'étude du Système solaire.



La confirmation de chacune des missions d'Horizon 2000 Plus et l'établissement de leur calendrier viendront plus tard, en fonction de l'évolution des technologies nécessaires à leur réalisation. Dans le cas de l'interférométrie, il faudra choisir entre la lumière visible et l'infrarouge. Les recommandations faites par le comité d'étude en 1994 résument néanmoins les espoirs des chercheurs européens quant à l'avenir de la recherche spatiale et aux développements technologiques qui la rendront possible. Les "pierres angulaires" proposées donnent les grandes lignes du programme Horizon 2000 Plus et montrent comment entretenir la dynamique engendrée dans le cadre du programme Horizon 2000 en cours.

Les ambitions des chercheurs se situant à la limite des possibilités techniques actuelles, l'accent sera mis dans le bref exposé qui suit sur les aspects techniques des missions. Certains projets seraient aujourd'hui bien trop coûteux à réaliser. Un ingénieur, dit-on, est quelqu'un qui peut faire pour dix francs ce que n'importe qui peut faire pour cent francs. Pour Horizon 2000 Plus, l'enjeu consiste à conjuguer imagination et recherche technologique pour réaliser des projets innovants et ambitieux dans les limites des budgets alloués.

Une mission vers Mercure

La chaleur est le principal ennemi des vaisseaux spatiaux qui s'aventurent vers la planète la plus proche du Soleil. La lumière solaire est en effet dix fois plus intense au voisinage de Mercure qu'à proximité de la Terre, et le rayonnement émis par cette planète chaude augmente la charge thermique auquel s'expose une sonde en la survolant. Les chercheurs souhaiteraient explorer Mercure de façon plus approfondie qu'ils n'ont pu le faire jusqu'à présent, tout en étant conscients des difficultés techniques d'un tel projet.

La "pierre angulaire" de l'ESA prévoit de faire graviter un engin spatial autour de Mercure pendant au moins trois mois. C'est le temps que met la planète pour décrire une révolution autour du Soleil. Dans l'hypothèse où d'autres agences spatiales s'associeraient à ce projet, il serait éventuellement possible d'ajouter un module appelé à se poser sur la planète, ou un satellite auxiliaire qui observerait simultanément d'autres régions au voisinage de la planète. Une autre option consisterait à larguer, pendant le voyage vers Mercure, une sonde qui irait explorer Vénus.

La forme et les dimensions de l'engin spatial lancé vers Mercure ainsi que son orientation par rapport au Soleil influenceront sur sa charge thermique. L'orbite qu'il décrira autour de la planète jouera elle aussi un rôle à cet égard. L'excentricité de l'orbite de la planète elle-même sera également à prendre en compte, car elle explique la température exceptionnellement élevée de la face exposée au Soleil lorsque la planète passe au plus près de celui-ci. Mais prendre en compte ces facteurs dans les paramètres opérationnels de façon à limiter l'échauffement au strict minimum sans pour autant compromettre les objectifs scientifiques de la mission ne sera pas suffisant pour empêcher la lumière du Soleil de griller l'orbiteur comme un poulet à la broche. Les ingénieurs thermiciens devront également mettre au point d'autres moyens de protection: peinture, surfaces émissives ou réfléchissantes et revêtements thermiques propres à isoler les composants vitaux, et systèmes de refroidissement mécaniques.

Les refroidisseurs Stirling reposent sur le principe de la compression et de l'expansion d'un volume de gaz placé dans une enceinte étanche. Ils équipent déjà les satellites d'observation de la Terre ERS de l'ESA. Des modèles à refroidissement ultra-poussé sont en cours de développement dans le cadre des contrats passés par l'ESA pour le satellite d'astronomie FIRST. En ce qui concerne la mission vers Mercure, les refroidisseurs Stirling pourraient être adaptés de façon à pouvoir fonctionner en milieu chaud. Malgré cela, certains éléments du satellite seront inévitablement exposés à une chaleur difficilement supportable et l'enjeu technique consistera à faire fonctionner des équipements mécaniques et électroniques à des températures élevées.

Les photopiles alimentant la sonde en énergie bénéficieront d'un éclairage solaire surabondant et les ingénieurs de l'ESA s'intéresseront aux dispositifs les plus évolués à base d'arséniure de gallium, en remplacement du silicium traditionnel, et aux colles thermorésistantes permettant de fixer ces piles sur la sonde.

L'antenne parabolique de l'orbiteur devra rester pointée en permanence vers la Terre alors que la sonde est en rotation sur elle-même. Une panne du moteur de dégyrage assurant ce pointage condamnerait la mission car les données scientifiques ne pourraient plus être transmises aux stations sol. Le moteur de dégyrage de la sonde cométaire Giotto de l'ESA avait beaucoup préoccupé les ingénieurs pendant sa mise au point, mais il a finalement fonctionné de façon impeccable. Pour ce qui est de la mission vers Mercure, il faut que le moteur et les joints rotatifs alimentant l'antenne en signaux radio puisse fonctionner à haute température.

La propreté magnétique de la sonde sera également un sujet de préoccupation pour les ingénieurs. Ceux-ci devront s'arranger pour que les batteries, l'alimentation électrique, les moteurs, la caméra et les différents instruments scientifiques n'émettent pas de champ magnétique significatif, car ce dernier compromettrait l'un des objectifs principaux de la mission qui est de mesurer le faible champ magnétique de Mercure.

Les planétologues ont besoin de comprendre pourquoi cette planète possède un champ magnétique. La découverte de ce dernier lors des brefs survols de Mercure par la sonde Mariner 10 de la NASA, en 1974 et 1975, créa une grande surprise. Toute aussi énigmatique est la densité élevée de Mercure par rapport à celle de la Terre. Manifestement, Mercure se compose pour l'essentiel de fer. La Nature a-t-elle simplement privilégié cet élément au moment de former une planète près du Soleil? S'est-il produit une collision cataclysmique qui aurait éjecté la plupart des matériaux plus légers de Mercure? Cette planète sans atmosphère interagit aussi avec le vent solaire, constitué de particules ionisées, et donnera lieu à une comparaison fascinante avec les événements qui se déroulent autour de la Terre. Malgré quelques difficultés particulières, la mission vers Mercure s'inscrit dans le prolongement de la technologie spatiale actuelle. La sonde ressemblera probablement, par certains aspects marquants, aux satellites Cluster de l'ESA qui seront lancés en 1995. C'est pourquoi les experts sont convaincus de la faisabilité de la mission vers Mercure et de la possibilité de la réaliser dans les limites d'un budget du niveau "pierre angulaire".

Cette mission préfigure aussi les problèmes thermiques beaucoup plus critiques qui seraient à résoudre dans le cas d'une mission d'exploration de la couronne solaire, projetée pour le programme Horizon 2000 Plus en coopération. Si une sonde, conformément aux vœux des spécialistes de la physique solaire, devait traverser l'atmosphère du Soleil à une altitude égale à 1,5 fois le diamètre de cet astre, elle serait exposée à un rayonnement 2900 fois plus intense que celui qui atteint la Terre.

L'énigme du magnétisme de Mercure.
Les théoriciens ont du mal à
l'expliquer, mais il se pourrait que la
future mission de l'ESA contribue à
élucider ce mystère.

Hypothèses avancées



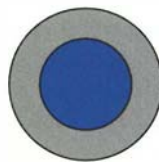
noyau gelé - pas
de magnétisme?

Faux



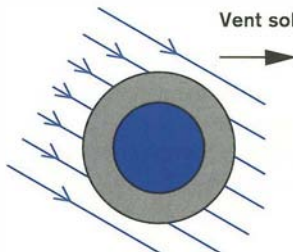
Enveloppe fluide
avec effet dynamo?

Trop puissant



Reliquat d'un
magnétisme ancien
dans la partie rocheuse?

Trop faible

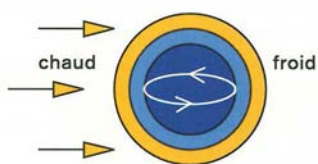


Magnétisme induit
par le vent solaire?

Trop faible

Vent solaire

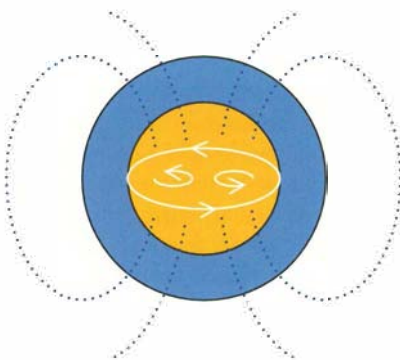
Lumière solaire



Formation de courants
thermoélectriques par
les couches de la
planète?

Possible

Mercur



Des mouvements de
rotation et de
convection à l'intérieur
du noyau fondu
produisent un effet
dynamo

Théorie largement
répandue

Terre



Supplée lumineux. Les puissantes
lampes au xénon du Grand
simulateur spatial de l'ESA à
Noordwijk (Pays-Bas) simulent les
effets du rayonnement solaire sur les
véhicules spatiaux pendant une
séance d'essais.

Une mission vers Mercure

La chaleur est le principal ennemi des vaisseaux spatiaux qui s'aventurent vers la planète la plus proche du Soleil. La lumière solaire est en effet dix fois plus intense au voisinage de Mercure qu'à proximité de la Terre, et le rayonnement émis par cette planète chaude augmente la charge thermique auquel s'expose une sonde en la survolant. Les chercheurs souhaiteraient explorer Mercure de façon plus approfondie qu'ils n'ont pu le faire jusqu'à présent, tout en étant conscients des difficultés techniques d'un tel projet.

La "pierre angulaire" de l'ESA prévoit de faire graviter un engin spatial autour de Mercure pendant au moins trois mois. C'est le temps que met la planète pour décrire une révolution autour du Soleil. Dans l'hypothèse où d'autres agences spatiales s'associeraient à ce projet, il serait éventuellement possible d'ajouter un module appelé à se poser sur la planète, ou un satellite auxiliaire qui observerait simultanément d'autres régions au voisinage de la planète. Une autre option consisterait à larguer, pendant le voyage vers Mercure, une sonde qui irait explorer Vénus.

La forme et les dimensions de l'engin spatial lancé vers Mercure ainsi que son orientation par rapport au Soleil influenceront sur sa charge thermique. L'orbite qu'il décrira autour de la planète jouera elle aussi un rôle à cet égard. L'excentricité de l'orbite de la planète elle-même sera également à prendre en compte, car elle explique la température exceptionnellement élevée de la face exposée au Soleil lorsque la planète passe au plus près de celui-ci. Mais prendre en compte ces facteurs dans les paramètres opérationnels de façon à limiter l'échauffement au strict minimum sans pour autant compromettre les objectifs scientifiques de la mission ne sera pas suffisant pour empêcher la lumière du Soleil de griller l'orbiteur comme un poulet à la broche. Les ingénieurs thermiciens devront également mettre au point d'autres moyens de protection: peinture, surfaces émissives ou réfléchissantes et revêtements thermiques propres à isoler les composants vitaux, et systèmes de refroidissement mécaniques.

Les refroidisseurs Stirling reposent sur le principe de la compression et de l'expansion d'un volume de gaz placé dans une enceinte étanche. Ils équipent déjà les satellites d'observation de la Terre ERS de l'ESA. Des modèles à refroidissement ultra-poussé sont en cours de développement dans le cadre des contrats passés par l'ESA pour le satellite d'astronomie FIRST. En ce qui concerne la mission vers Mercure, les refroidisseurs Stirling pourraient être adaptés de façon à pouvoir fonctionner en milieu chaud. Malgré cela, certains éléments du satellite seront inévitablement exposés à une chaleur difficilement supportable et l'enjeu technique consistera à faire fonctionner des équipements mécaniques et électroniques à des températures élevées.

Les photopiles alimentant la sonde en énergie bénéficieront d'un éclairage solaire surabondant et les ingénieurs de l'ESA s'intéresseront aux dispositifs les plus évolués à base d'arséniure de gallium, en remplacement du silicium traditionnel, et aux colles thermorésistantes permettant de fixer ces piles sur la sonde.

L'antenne parabolique de l'orbiteur devra rester pointée en permanence vers la Terre alors que la sonde est en rotation sur elle-même. Une panne du moteur de dégyrage assurant ce pointage condamnerait la mission car les données scientifiques ne pourraient plus être transmises aux stations sol. Le moteur de dégyrage de la sonde cométaire Giotto de l'ESA avait beaucoup préoccupé les ingénieurs pendant sa mise au point, mais il a finalement fonctionné de façon impeccable. Pour ce qui est de la mission vers Mercure, il faut que le moteur et les joints rotatifs alimentant l'antenne en signaux radio puisse fonctionner à haute température.

La propreté magnétique de la sonde sera également un sujet de préoccupation pour les ingénieurs. Ceux-ci devront s'arranger pour que les batteries, l'alimentation électrique, les moteurs, la caméra et les différents instruments scientifiques n'émettent pas de champ magnétique significatif, car ce dernier compromettrait l'un des objectifs principaux de la mission qui est de mesurer le faible champ magnétique de Mercure.

Les planétologues ont besoin de comprendre pourquoi cette planète possède un champ magnétique. La découverte de ce dernier lors des brefs survols de Mercure par la sonde Mariner 10 de la NASA, en 1974 et 1975, créa une grande surprise. Toute aussi énigmatique est la densité élevée de Mercure par rapport à celle de la Terre. Manifestement, Mercure se compose pour l'essentiel de fer. La Nature a-t-elle simplement privilégié cet élément au moment de former une planète près du Soleil? S'est-il produit une collision cataclysmique qui aurait éjecté la plupart des matériaux plus légers de Mercure? Cette planète sans atmosphère interagit aussi avec le vent solaire, constitué de particules ionisées, et donnera lieu à une comparaison fascinante avec les événements qui se déroulent autour de la Terre. Malgré quelques difficultés particulières, la mission vers Mercure s'inscrit dans le prolongement de la technologie spatiale actuelle. La sonde ressemblera probablement, par certains aspects marquants, aux satellites Cluster de l'ESA qui seront lancés en 1995. C'est pourquoi les experts sont convaincus de la faisabilité de la mission vers Mercure et de la possibilité de la réaliser dans les limites d'un budget du niveau "pierre angulaire".

Cette mission préfigure aussi les problèmes thermiques beaucoup plus critiques qui seraient à résoudre dans le cas d'une mission d'exploration de la couronne solaire, projetée pour le programme Horizon 2000 Plus en coopération. Si une sonde, conformément aux vœux des spécialistes de la physique solaire, devait traverser l'atmosphère du Soleil à une altitude égale à 1,5 fois le diamètre de cet astre, elle serait exposée à un rayonnement 2900 fois plus intense que celui qui atteint la Terre.

L'énigme du magnétisme de Mercure.
Les théoriciens ont du mal à
l'expliquer, mais il se pourrait que la
future mission de l'ESA contribue à
élucider ce mystère.

Hypothèses avancées



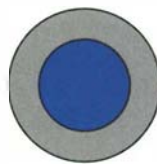
noyau gelé - pas
de magnétisme?

Faux



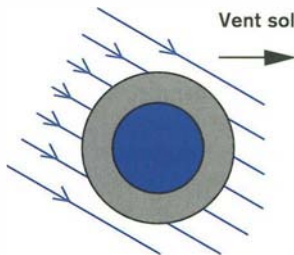
Enveloppe fluide
avec effet dynamo?

Trop puissant



Reliquat d'un
magnétisme ancien
dans la partie rocheuse?

Trop faible

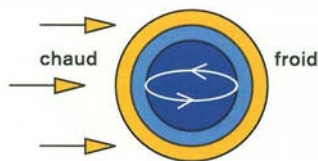


Magnétisme induit
par le vent solaire?

Trop faible

Vent solaire

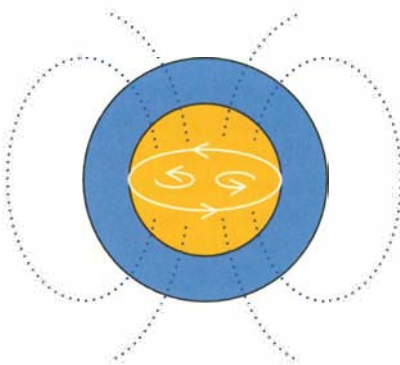
Lumière solaire



Formation de courants
thermoélectriques par
les couches de la
planète?

Possible

Mercure



Des mouvements de
rotation et de
convection à l'intérieur
du noyau fondu
produisent un effet
dynamo

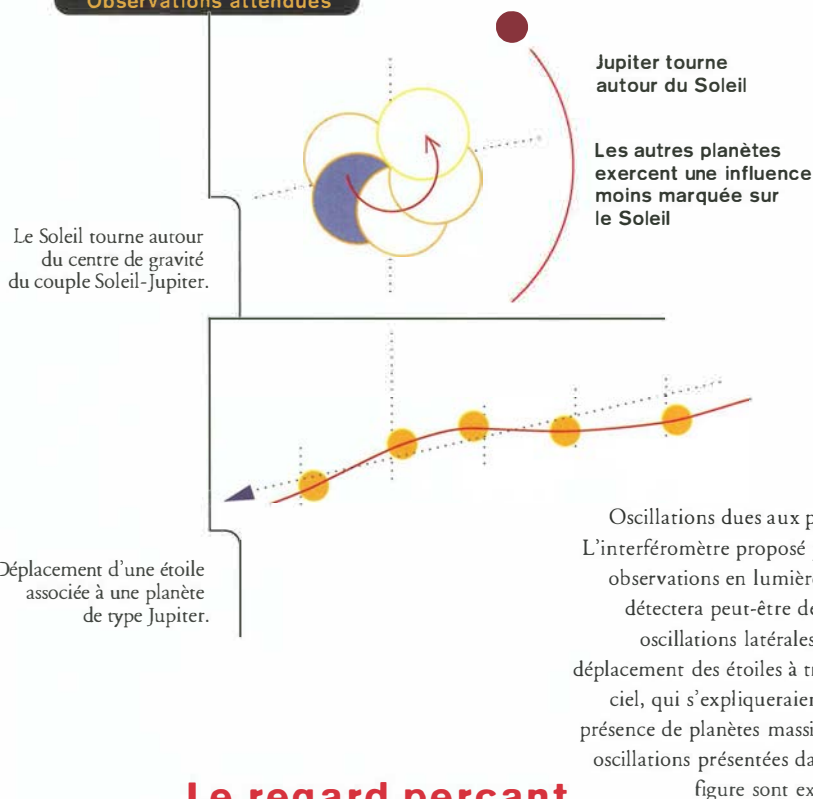
Théorie largement
répandue

Terre



Supplée lumineux. Les puissantes
lampes au xénon du Grand
simulateur spatial de l'ESA à
Noordwijk (Pays-Bas) simulent les
effets du rayonnement solaire sur les
véhicules spatiaux pendant une
séance d'essais.

Observations attendues



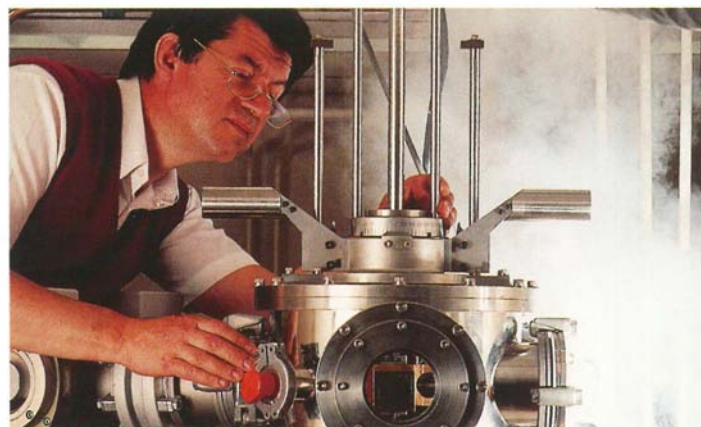
Le regard perçant de l'interférométrie

Comment installer sur un satellite deux télescopes espacés de plusieurs mètres et faire en sorte que leurs positions relatives en vol ne puissent varier de l'épaisseur d'un atome? Pour tout ingénieur qui connaît bien les problèmes de vibration, de déformation et de variation thermique interne liés à la rotation ou au changement d'orientation d'un satellite, c'est vraiment beaucoup demander! Pourtant les astronomes, qui aspirent à utiliser au XXI^e siècle des instruments à très haut pouvoir de résolution, exigent une stabilité à toute épreuve. Si les méthodes de fabrication ou les techniques de commande active ne permettent pas tout à fait d'y parvenir, des dispositifs de mesure interne devraient pouvoir détecter des déplacements microscopiques survenant d'un instant à l'autre. Ils devraient signaler le moindre écart par rapport à la normale en accompagnement des observations stellaires du satellite. En interférométrie, le recours à deux télescopes indépendants permet d'obtenir le même pouvoir de résolution qu'avec un grand télescope unique. Les ondes lumineuses en provenance d'un objet lointain collectées par les deux télescopes, puis superposés, interfèrent les unes avec les autres. Leurs faisceaux s'additionnent ou s'annulent. Dans le cas d'une source ponctuelle, le résultat se manifeste sous la forme de franges d'interférence brillantes et sombres présentant un maximum d'intensité au niveau d'un centre bien défini. Tout déplacement à l'intérieur du système optique aurait pour effet de modifier la longueur du trajet parcouru par les deux faisceaux lumineux avant leur réunion et empêcherait de déduire une interprétation fiable des franges d'interférence. Des impératifs rigoureux de stabilité mécanique marquent la mission pierre angulaire d'interférométrie visible du programme Horizon 2000 Plus. Les chercheurs européens y voient le moyen de remporter un nouveau succès, dans la foulée de la mission d'astrométrie Hipparcos de l'ESA. Une mission d'interférométrie pourrait conduire à de nouvelles avancées spectaculaires.

Cet objectif peut être atteint au moyen d'un satellite équipé de deux ou trois interféromètres orientés dans des directions différentes du ciel. Les miroirs devront conserver leurs orientations relatives au milliardième de degré près pendant des heures tandis que les interféromètres, balayant un cercle de la sphère céleste, mesureront l'écart angulaire de nombreuses étoiles. L'une des options envisagées pour cette mission a pour nom GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics). Elle prévoit des groupes de deux télescopes de 0,55 mètre d'ouverture espacés de 2,5 mètres. On envisage d'installer trois interféromètres de ce type à bord d'un satellite cylindrique de façon que leur axe de visée soit perpendiculaire au grand axe du satellite. La configuration de ce dernier serait adaptée à un lancement par une fusée Ariane 5. Avec des télescopes plus grands et plus espacés, il serait possible de localiser les étoiles de façon encore plus précise, d'observer des objets plus faibles et de reculer la limite d'observation de quasars lointains. Les astrométristes pourraient alors situer les étoiles du premier plan par rapport à la carte de l'Univers obtenue par radio-interférométrie à très grande base. Cependant, dans le cas par exemple de deux paires de télescopes de 1 mètre écartés de 10 mètres, il serait encore plus difficile de maintenir la stabilité du système optique. Comparé à Hipparcos, un interféromètre de taille moyenne du type GAIA permettrait en principe de multiplier par 500 le nombre des étoiles dont la position serait mesurée avec une précision 200 fois meilleure. Celui-ci procéderait à une exploration systématique de la voûte céleste avec pour objectif d'arpenter l'ensemble du ciel. Grâce à l'exactitude de ses relevés, les astronomes pourraient avoir une connaissance précise et fine de l'influence du champ gravitationnel du Soleil qui, en déviant la trajectoire de la lumière, produit un décalage dans la position apparente des étoiles. Ce décalage est prévu par la théorie de la relativité d'Einstein. Si les prévisions de ce dernier comportaient l'erreur la plus infime, la mission d'astrométrie la décèlerait. Dans ce type de mission, les astronomes, quant à eux, verraient tomber dans leur escarcelle des résultats nombreux et diversifiés. La mesure plus précise du mouvement propre d'étoiles plus éloignées leur permettrait, par exemple, de se faire une meilleure idée de la répartition de la mystérieuse masse cachée dans la Voie lactée. Les théoriciens sont particulièrement curieux de connaître la distance exacte des amas globulaires, car ce sont les objets les plus anciens de la Galaxie. Une telle mission offrirait même la possibilité de mesurer directement la distance des étoiles géantes situées dans les galaxies les plus proches, les nuages de Magellan. Une mission d'interférométrie dans la lumière visible aurait également pour avantage particulier de permettre de détecter dans le mouvement des étoiles proches les légères oscillations qu'entraînerait l'attraction gravitationnelle de planètes situées dans leur voisinage. L'exploration interférométrique permettrait en fait de déterminer la proportion d'étoiles possédant des planètes, donnée statistique importante pour tous ceux qui s'interrogent sur l'existence de la vie en dehors de la Terre.

Nouvelles techniques de fabrication.

Les laboratoires "Matériaux et Processus" de l'ESA développent des matériaux nouveaux destinés à des applications spatiales et explorent différentes façons de les utiliser.



A la recherche de planètes porteuses de vie

Avec un interféromètre infrarouge, il serait possible de détecter directement des planètes gravitant autour d'autres étoiles. Les partisans d'un tel instrument pour la mission d'interférométrie de l'ESA visent à surmonter l'obstacle qui empêche les télescopes classiques de voir des planètes extérieures au système solaire: la proximité de l'étoile-mère, qui a pour effet de noyer les émissions faibles en provenance des planètes. L'interférométrie permet de distinguer des objets lorsque l'observation porte sur des étoiles proches, et c'est dans l'infrarouge que les planètes, trop faibles pour être détectées dans la lumière visible, émettent avec le plus d'intensité.

Une proposition baptisée Darwin a séduit le comité d'étude. Des équipes de chercheurs français, britanniques et américains ont fait remarquer qu'en utilisant un interféromètre approprié, on pourrait détecter l'ozone de l'atmosphère d'une planète de type terrestre gravitant autour d'une autre étoile. Or, il est admis que seuls des organismes vivants peuvent produire l'oxygène libre nécessaire à la formation de l'ozone.

Un fléchissement à 9,7 microns de l'émission infrarouge d'une planète correspondrait à la signature de l'ozone et, peut-être, au tout premier signe d'une vie extérieure à la Terre. Il y aurait de quoi pavoiser si l'on parvenait à détecter ce fléchissement, mais une mission du type Darwin ne se justifierait pas par la poursuite d'un seul objectif. Pouvoir observer directement des planètes d'ailleurs, porteuses ou non de vie, et procéder à une étude préliminaire de leur atmosphère constitueraient de remarquables avancées. Dans le cadre de la mission Darwin, l'ESA pourrait aussi mettre à la disposition des spécialistes mondiaux de l'astronomie infrarouge un observatoire polyvalent dont le pouvoir de résolution rivaliserait avec celui du télescope spatial Hubble. L'interféromètre pourrait étudier le climat de Jupiter et découvrir des comètes aux confins du système solaire. Tout comme le projet d'interférométrie en lumière visible, cette proposition séduisante comporte de formidables embûches techniques. L'une des difficultés à surmonter est à mettre au compte de la Nature. En effet, les poussières de la partie centrale du système solaire engendrent ce qu'il est convenu d'appeler la lumière zodiacale et émettent avec une intensité particulière dans l'infrarouge. Peut-être pourrait-on échapper à la plupart de ces émissions envahissantes en envoyant l'interféromètre infrarouge loin dans l'espace, au-delà de la ceinture d'astéroïdes.

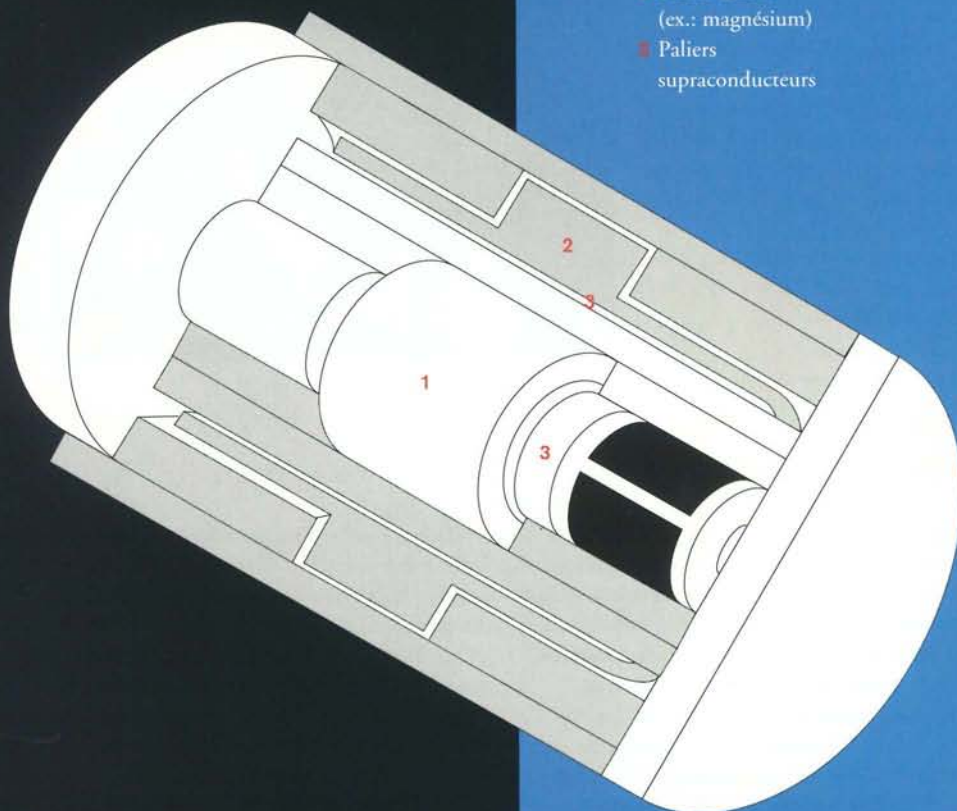
L'observation dans les grandes longueurs d'onde de l'infrarouge exige l'utilisation d'un grand instrument.

Lorsque les astronomes européens et américains évoquent des télescopes de 1 à 4 mètres, écartés de 10 à 30 mètres, les ingénieurs se demandent comment de tels monstres pourraient être lancés et déployés dans l'espace. Il faudra étudier de nouvelles méthodes de fabrication pour réaliser des télescopes optiques légers, de haute qualité.

Les impératifs de stabilité mécanique pourraient être moins rigoureux que pour l'interféromètre d'astrométrie. En revanche, il faudrait faire appel à des détecteurs électroniques pour l'infrarouge d'une grande sensibilité, non générateurs de bruit, afin d'observer les objets les plus faibles, notamment les planètes autour d'autres étoiles. Et comme pour toutes les missions dans l'infrarouge, un des problèmes importants sera celui du maintien des télescopes et des détecteurs à basse température. Il serait peu indiqué - c'est là un euphémisme - d'utiliser des systèmes élaborés de refroidissement à l'hélium liquide analogues à ceux de l'actuel observatoire ISO, les systèmes à hélium ayant comme inconvénient de limiter la durée de vie d'une mission. Comme pour le satellite FIRST, les télescopes à interférométrie seraient donc plutôt refroidis par un système passif qui les protégerait du Soleil et favoriserait l'évacuation de la chaleur dans l'espace. Le comité d'étude a proposé que l'ESA étudie les deux options, à savoir l'interféromètre d'astrométrie dans le visible et l'interféromètre imageur dans l'infrarouge, en portant un intérêt particulier aux technologies correspondantes. Dans quelques années, les avantages respectifs des deux options seront passés en revue et l'une d'entre elles sera choisie pour la mission d'interférométrie. "N'oubliez pas que nous nous projetons à échéance de dix ou vingt ans", fait remarquer Steven Beckwith, de Heidelberg, qui joua un rôle éminent dans l'évaluation des missions potentielles d'astronomie du programme Horizon 2000 Plus. "L'ESA fera un choix plus judicieux si elle continue de laisser jouer la concurrence pendant un certain temps et si elle évite de figer les idées trop tôt. Moyennant quelques investissements peu élevés dans le domaine de la recherche technologique, on devrait pouvoir dire dans quelle voie technique poursuivre les travaux pour obtenir les meilleures conditions de fiabilité: maintien des alignements structurels dans le cadre d'une mission d'astrométrie, ou refroidissement d'un interféromètre infrarouge."

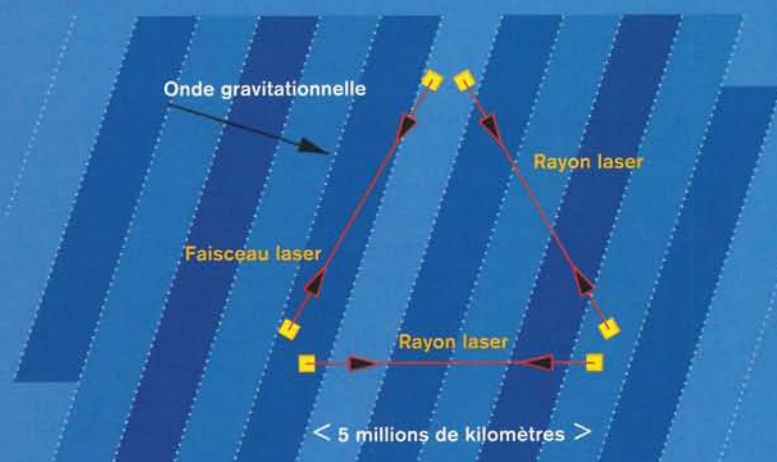
Projet STEP

- 1 Masse étalon (ex.: platine)
- 2 Masse étalon (ex.: magnésium)
- 3 Paliers supraconducteurs



Projet LISA

Einstein a-t-il eu raison? L'ESA envisage aujourd'hui deux missions qui engageront son programme scientifique dans le domaine de la physique fondamentale. Le projet STEP a pour ambition de vérifier, à l'aide de masses étalon composées de matériaux différents, la thèse d'Einstein selon laquelle tous les objets tombent à la même vitesse sous l'effet de la pesanteur. Des détecteurs supraconducteurs seraient utilisés pour mettre en évidence les moindres écarts dans ces déplacements d'objets en orbite. La théorie de la relativité générale prévoit par ailleurs que l'espace cosmique est traversé et déformé par des ondes gravitationnelles. La mission LISA aurait pour objectif de détecter ces ondes. Elle ferait appel à des faisceaux laser pour mesurer d'infimes variations de distance entre des véhicules spatiaux très éloignés les uns des autres.



Une incursion en physique fondamentale

La vérification de la théorie d'Einstein relative à la déviation des rayons lumineux a été évoquée à propos de l'option "astrométrie" de la mission d'interférométrie de l'ESA. D'autres aspects de la théorie de la relativité générale d'Einstein, formulée à Berlin en 1915, figurent parmi les centres d'intérêt de tout premier plan de la recherche spatiale.

Au côté de la mécanique quantique, la relativité générale est considérée comme un des piliers de la physique moderne. Mais si la vérification expérimentale des théories quantiques est une opération de haute précision, la vérification de la relativité générale se fait à plus grands traits. Les physiciens n'excluent pas la possibilité que la théorie d'Einstein, comme celle de son prédécesseur Newton, ne soit qu'une proche approximation de la réalité. Les cosmologues et les physiciens des particules rencontrent en effet des problèmes qui semblent nécessiter de subtils remaniements de la théorie de la relativité générale.

L'ESA a déjà envisagé des technologies qui permettraient de vérifier cette théorie. Parmi les options prises en considération pour les petites et moyennes missions à venir figure le projet STEP. Ce satellite pourrait être lancé aux alentours de 2003 dans le cadre du programme Horizon 2000 actuel. Comme il préfigure toutefois le thème nouveau de la physique fondamentale proposé pour Horizon 2000 Plus, on en donnera ici une description succincte.

Einstein a formulé une proposition connue sous le nom de principe d'équivalence. Ce principe veut que tous les corps, indépendamment de leur composition ou de leur masse, tombent exactement à la même vitesse sous l'effet de la pesanteur. Selon la tradition populaire, Galilée aurait laissé tomber du haut de la Tour de Pise différents objets parvenus au sol au même moment. La mission STEP (sigle signifiant vérification par satellite du principe d'équivalence) aurait pour objectif de rééditer l'expérience de la Tour de Pise dans l'espace, en observant des masses "en chute libre" pendant que le satellite graviterait autour de la Terre.

Le milieu spatial offre des conditions excellentes, mais imparfaites, pour la recherche en physique fondamentale. Il ne suffit pas en effet que les objets flottent en impesanteur. Les ingénieurs de STEP devront aussi faire en sorte que les masses se subissent aucun frottement au cours de leur chute. Cela nécessitera l'utilisation de matériaux supraconducteurs pour obtenir un effet de lévitation.

De même, s'il est vrai que les véhicules spatiaux obéissent avec une précision quasiment mathématique aux lois de la pesanteur, STEP rencontrera, même à 350 kilomètres au-dessus de la Terre, une légère résistance des couches supérieures de l'atmosphère. Ce phénomène de traînée pourrait occulter l'effet subtil des ondes gravitationnelles recherchées. C'est pourquoi on prévoit un satellite à traînée compensée.

Des accéléromètres détecteront toute force extérieure s'exerçant sur le satellite, que compenseront des mini-propulseurs. Les poussées nécessaires pour le contrôle d'un satellite de 1 tonne se mesurent en millinewtons, ce qui correspond à peu près au poids d'un timbre-poste. Dans l'hypothèse d'une mission plus ambitieuse encore, le contrôle du satellite s'annoncera encore plus délicat.

En quête des ondes gravitationnelles

En insistant auprès de l'ESA pour qu'elle prépare une mission "pierre angulaire" portant sur la recherche des ondes gravitationnelles dans l'espace, les chercheurs européens se sont exprimés massivement en faveur de la physique fondamentale. La théorie de la relativité générale prévoit l'existence d'ondes engendrées par des masses présentant un mouvement relatif significatif. En se propageant à travers l'Univers à la vitesse de la lumière, ces ondes ont pour effet de déformer l'espace. Les ondes gravitationnelles se traduisent par des variations rythmiques de la distance mesurée entre deux satellites. Mais cet effet, très peu marqué, est difficile à détecter. Pour le mettre en évidence, on émettra des faisceaux laser entre les deux satellites, à condition d'apporter le plus grand soin à la conception de ces derniers et de leur système optique. En ce qui concerne les impératifs techniques, il faudra utiliser des lasers à haute fiabilité émettant à des longueurs d'onde bien définies de l'infrarouge, assurer la stabilité structurelle des satellites et maîtriser la commande des opérations avec une extrême finesse.

Même la pression exercée par la lumière solaire sur le satellite pourrait nuire aux observations. Comme c'est le cas pour STEP, il faudra annuler toutes les forces d'origine extérieure par un système de compensation de traînée. On envisage d'utiliser à cet effet des propulseurs électriques à émission de champ. Leur poussée se mesurera en micronewtons et leur fonctionnement devra être régulé par un accéléromètre d'une sensibilité exceptionnelle.

Un 'cube magique' en alliage or-platine, de la taille d'un cube de jeu de construction, constitue le cœur du système de bord envisagé à l'heure actuelle. Il flotte en apesanteur à l'intérieur d'une cage dorée. Lorsqu'une force extérieure agit sur le satellite, le cube reste immobile par effet d'inertie. Tout mouvement du cube par rapport à la cage est détecté par des dispositifs électrostatiques qui actionnent alors les propulseurs en vue de corriger le déplacement correspondant.

La masse étalon (désignation officielle donnée au cube magique) ne sert pas uniquement de détecteur. Flottant dans l'espace à l'abri des forces non gravitationnelles, elle définit la position du satellite comme le point trigonométrique d'un géomètre. L'une de ses surfaces joue le rôle de miroir dans un système optique qui mesure les variations de la distance par rapport à la masse étalon identique d'un deuxième satellite éloigné du premier. Un faisceau laser infrarouge est émis en continu d'un satellite à l'autre. Le deuxième satellite verrouille son propre laser sur l'onde incidente et renvoie au premier satellite son faisceau. Un spécialiste radar parlerait à cet égard de "répéteur à verrouillage de phase", ce qui signifie que les crêtes et les creux des ondes reçues et émises coïncident parfaitement.

Le système optique du premier satellite compare les ondes incidentes aux ondes émises. Si la distance entre les deux satellites varie de 10 milliardièmes de longueur d'onde, ou 10 milliardièmes de millimètre, un décalage doit apparaître dans les positions relatives des crêtes et des creux. Cette précision impressionnante, si l'on considère les millions de kilomètres qui séparent les satellites, est indispensable pour détecter des ondes gravitationnelles.

LISA (Laser Interferometer Space Antenna), le concept préliminaire étudié par l'ESA pour la mission de détection des ondes gravitationnelles, prévoit six satellites équipés chacun de sa masse étalon. Ces satellites sont disposés deux par deux en triangle. Chaque côté du triangle, long de 5 millions de kilomètres, est placé sous le contrôle de deux satellites chargés de surveiller la distance qui les sépare. Chacun de ces deux satellites échange des signaux avec son voisin immédiat, occupant le même sommet du triangle.

Après leur lancement en une charge utile unique par une fusée Ariane 5 chargée de les arracher à la pesanteur terrestre, les six satellites LISA allumeront leurs propulseurs de bord pour s'élancer sur des orbites similaires autour du Soleil. Faire en sorte que les satellites atteignent leurs positions respectives, puis pointer correctement les faisceaux laser sont autant d'opérations qui promettent de donner fort à faire au Centre de contrôle de la mission.

Le comité d'étude du programme Horizon 2000 Plus a estimé que la détection des ondes gravitationnelles constituait de loin la proposition la plus importante pour la physique fondamentale spatiale, mais qu'il s'agissait d'une mission "exigeante". Il faudra plusieurs années de développement technologique pour porter ce projet au degré de maturité voulu et pour en réduire le coût sans diminuer le nombre de satellites nécessaires.

Une mission de détection des ondes gravitationnelles sera gagnante dans tous les cas. En effet, si elle ne parvenait pas à détecter les signaux gravitationnels ordinaires que les étoiles doubles proches sont présumées émettre, une des théories fondamentales de la physique s'en trouverait ébranlée, ce qui constituerait en soi un résultat majeur. De même, dans l'hypothèse plus probable où la mission atteindrait son objectif, les physiciens seraient gratifiés d'une découverte d'importance majeure.

Les ondes gravitationnelles ouvrent aux astronomes de nouvelles perspectives sur l'Univers, de nature très différente de celles que leur ont offertes jusqu'à présent les ondes du spectre électromagnétique. Ainsi, le transfert de matière d'une étoile vers une autre, susceptible de jouer un rôle important dans l'évolution stellaire, devrait donner naissance à des signaux gravitationnels, de même que les collisions d'étoiles effondrées, qu'il s'agisse de naines blanches, d'étoiles à neutrons ou de trous noirs stellaires.

Il sera passionnant de vérifier en direct la théorie selon laquelle l'Univers serait issu d'une gigantesque explosion. Pour certains physiciens, les déplacements de masses liés à un tel cataclysme devraient engendrer des ondes gravitationnelles que la mission de l'ESA pourra mettre en évidence. S'il en était ainsi, les scientifiques pourront se faire une idée des conditions dans lesquelles la matière et les forces cosmiques ont vu le jour.

La théorie de la relativité générale et la théorie des quanta offrent des points de vue contradictoires sur ce qui se passe dans des conditions extrêmes analogues à celles qui auraient existé lors du Big Bang. La première théorie peut en principe tout comprimer en un point mathématique, la deuxième supposant pour sa part que la matière et l'énergie conservent un certain volume - réduit peut-être, mais pas jusqu'à l'infiniment petit. Cette divergence est au cœur des questions qui secouent les théories modernes. En levant le voile sur les phénomènes extrêmes, qu'il s'agisse des parages des trous noirs ou de la naissance de l'Univers, les ondes gravitationnelles pourront contribuer à résoudre cette contradiction. On touche bien là à l'essence même de la physique fondamentale.

