

32

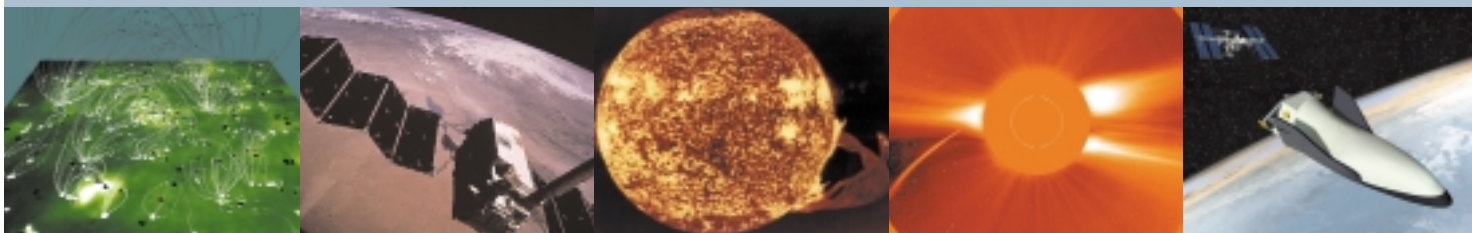
Septembre 2000

SPACE CONNECTION

**DOSSIER Le Soleil,
tout feu tout flammes**



Sommaire



03 **Dossier:** Le Soleil, tout feu tout flammes

- Chronique d'une mort annoncée
- Les calories du Soleil
- Une ardeur irrégulière
- Le vent solaire
- Le casse-tête des neutrinos

Annexe : L'étoile du jour

14 **Sous haute surveillance**

- Le Soleil depuis la Terre
- Des ballons aux satellites
- La plate-forme européenne Eureka
- L'odyssée d'Ulysse
- Le Soleil observé 24 h sur 24
- Le futur

Annexe : Un raccourci qui passe par Jupiter

Annexe : En équilibre pour l'éternité

24 **Les Belges scrutent le Soleil**

- Introduction : les Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles
- L'Observatoire Royal de Belgique
- L'Institut Royal Météorologique de Belgique
- L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

28 **Actualités belges**

32 **Actualités internationales**



**Services fédéraux des affaires
scientifiques, techniques
et culturelles (S.S.T.C.)**

Space Connection est une lettre d'information éditée par les Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles (S.S.T.C.) contenant des informations sur les réalisations récentes dans le domaine spatial. Cette lettre d'information s'adresse à tous les passionnés de l'espace et en particulier aux jeunes.

**Comment obtenir gratuitement
le Space Connection ?**

Envoyez vos nom et adresse à la :

**Cellule Relations publiques
Secrétariat général
S.S.T.C.**

Rue de la Science, 8
1000 Bruxelles
ou envoyez un e-mail à
dhae@belspo.be

<http://www.belspo.be>

Editeur responsable:

M. Eric Beka
Secrétaire général des S.S.T.C.

Rédaction:

Cellule Relations publiques
Secrétariat général
S.S.T.C.
Rue de la Science, 8
1000 Bruxelles

Collaboration extérieure:

Benny Audenaert, Paul Devuyt
(dossier), Christian Du Brulle,
Théo Pirard, Steven Stroeykens

Coordination:

Patrick Ribouville

Gestion des abonnements:

Ria D'Haemers
e-mail: dhae@belspo.be

Photo de couverture:

L'éclipse solaire du 11 août 1999.
(ESO)

Numéro 32 - Septembre 2000

Introduction

Le *Soleil*, tout feu tout flammes

Si le Soleil n'est qu'une étoile parmi les cent milliards d'autres que compte notre galaxie, sans lui la vie sur notre planète serait tout à fait impossible parce que la température à sa surface avoisinerait les -250°C et que, sans sa lumière, pas de photosynthèse possible. Alors, rien d'étonnant à ce que l'on lui ait longtemps attribué une essence divine: le dieu *Inti* était vénéré par les Incas, tout comme *Mithra* dans la mythologie perse, *Pushan* en Inde, *Shamash* en Mésopotamie, *Kinich Ahau* chez les Mayas tandis que *Ra*, *Rê* ou *Aton* était le père des pharaons égyptiens.

Le rapport au Soleil n'est pas seulement constitutif du pouvoir, il désigne et fonde aussi la situation de l'homme dans le cosmos. Pour toutes les civilisations archaïques ou traditionnelles en effet, le seul moyen de se préserver du chaos, de la mort, de la nuit, est d'organiser, de "cosmiser" l'espace connu en déterminant son centre, nombril du monde, seul point par où la Terre se relie au ciel, notamment le Soleil. Ce symbolisme ne se retrouve du reste pas seulement dans les mythologies ou les croyances religieuses mais il inspire la construction des bâtiments et principalement les temples.

Les sentiments d'adoration des Anciens étaient surtout mêlés de la crainte de voir s'interrompre son cycle apparemment régulier (le mouvement du Soleil entre son lever et son coucher constituait pour eux une horloge adéquate et était matérialisée par le cadran solaire) et les fêtes du solstice d'hiver qu'ont connues toutes les sociétés primitives ne font qu'exprimer la joie ressentie à voir le Soleil reprendre sa course annuelle vers le zénith. A l'inverse, et avant que leur mécanisme fût compris, les éclipses plongeaient les populations dans de saintes horreurs. [suite page 04]

[suite de la page 03]

Il faudra attendre 1515 pour voir *Nicolas Copernic* justifier la rotation de la Terre sur elle-même et sa révolution autour du Soleil mais, par prudence, il ne publia les résultats de ses travaux qu'en 1543, année de sa mort. En faisant tourner la Terre et les autres planètes autour du Soleil, Copernic a obtenu une description bien plus simple que celle construite dans l'Antiquité par *Ptolémée*. Dans cette dernière, si l'on n'en garde que les éléments essentiels, le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles étaient fixés sur des sphères translucides centrées sur la Terre et tournant autour d'elle. Copernic avait recentré les sphères sur le Soleil. Contemporain de *Galilée*, *Johannes Kepler* se débarrassa des sphères et établit que les trajectoires des planètes sont des ellipses; il publia trois lois qui décrivent leur mouvement. Vers 1667, *Isaac Newton* comprend que la Lune tombe vers la Terre (comme la pomme qui se détache de l'arbre) et que son mouvement résulte d'un équilibre entre l'attraction de la Terre et la force centrifuge. En vingt ans d'un travail acharné, il élabore la mécanique et justifie les lois empiriques de Kepler.

Dans cette histoire, le rôle de Galilée apparaît fondamental car, expérimentateur soigneux,

c'est lui qui établit les lois de la chute des corps et son analyse de leur mouvement parabolique est la clef qui permettra à Newton de comprendre que le mouvement de la Lune est une chute. Mais plus importante encore est son action de propagandiste: contrairement au prudent Copernic et au timoré Kepler, Galilée fera connaître *urbi et orbi* que la Terre, et donc l'homme, n'est pas au centre du monde. C'en est trop pour l'Eglise qui le fera condamner dans un procès à grand spectacle.

Pour sauver sa vie, Galilée abjura publiquement ses idées le 16 juin 1633 et passa ses dernières années en résidence surveillée. Le retentissement de cette injustice sera énorme et on peut dire que, de ce jour, la Terre a vraiment tourné dans les esprits.

Aujourd'hui, croyances et légendes sont soigneusement rangées dans le tiroir aux souvenirs et, à tout le moins dans les pays développés, nous sommes tous assurés que le Soleil poursuit une course régulière, qu'il nous inondera chaque année à la même époque de la même bienfaisante chaleur et nous ne prêtons plus qu'une attention distraite aux phénomènes engendrés par la



← Phénomènes de luminescence atmosphérique, les aurores polaires découlent de l'interaction du vent solaire et de la magnétosphère. (NASA)

combinaison hasardeuse des lois de la mécanique céleste et de la propagation rectiligne de la lumière. Pourtant il suffit que des connaissances récentes acquises sur le Soleil soient mises en doute par certains médias pour que les vieilles craintes mystiques renaissent et que tout un chacun y voie la cause de certains "dérèglements" météorologiques ou climatiques (sécheresses ou inondations) et, partant, économiques (bonnes ou mauvaises récoltes), voire pathologiques (folies, cancers) ou politiques (guerres, révolutions).

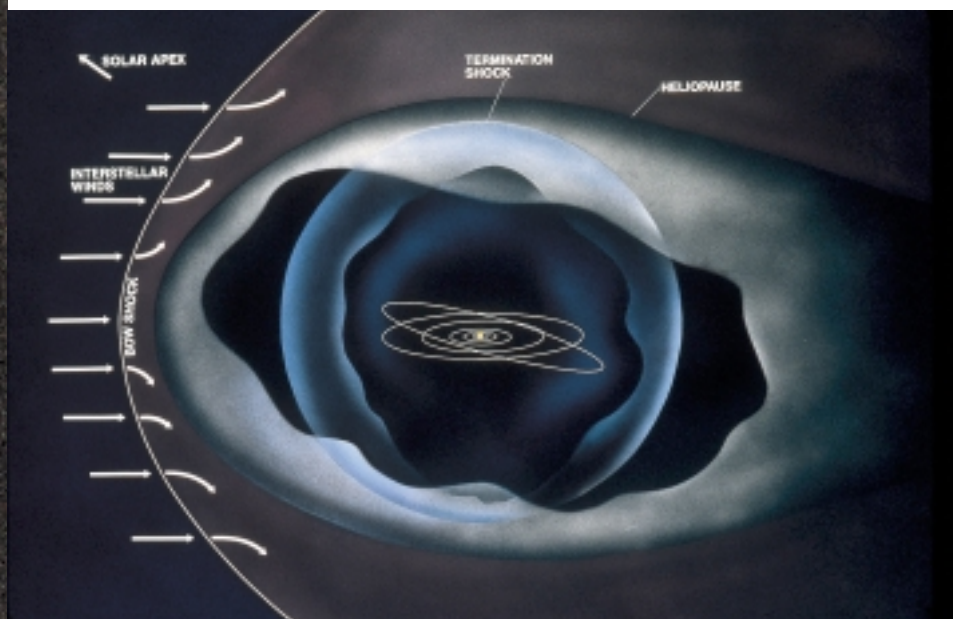
Si ces assertions ont fait et continuent de faire sourire certains scientifiques, la complexité de l'environnement terrestre et des phénomènes dont il est le siège est telle qu'il convient de se garder à la fois de tout triomphalisme dans les récentes "découvertes" comme de toute attitude dogmatique de rejet.

Chronique d'une mort annoncée

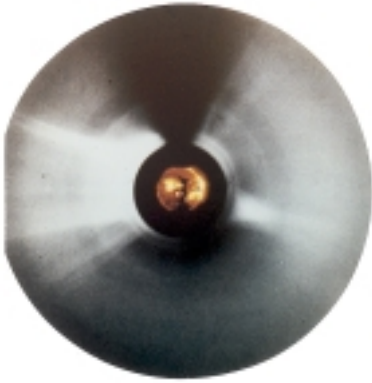
Notre plus proche étoile rayonne en permanence de l'énergie à travers sa surface visible (*la photosphère*) dont la température est de l'ordre de 6.000 degrés C. Le Soleil

génère cette énergie par fusion nucléaire (transformation lente d'hydrogène en hélium) dans son noyau et elle est ensuite évacuée, d'abord dans la zone de transfert radiatif par une longue série d'émissions et d'adsorptions, puis, sur le dernier tiers du rayon solaire, par convection: du gaz chaud monte vers la surface, se refroidit puis redescend. Cette zone convective ressemble à de l'eau en ébullition. C'est là, a priori, que le champ magnétique du Soleil est généré par un mécanisme "dynamo" et ses variations induisent des courants qui circulent dans l'atmosphère du Soleil, y créant une riche variété de structures et de phénomènes sporadiques.

La couche la plus externe de l'atmosphère solaire (*la couronne*) est un plasma, c'est-à-dire un gaz tenu complètement ionisé. Paradoxalement, il y fait plus chaud que dans les couches sous-jacentes de l'atmosphère solaire ! Ce gaz chaud (de 500.000 à 2 millions de degrés C) émet des rayons g, X et EUV (extrême ultraviolet) et des ondes radioélectriques. Dans ces longueurs d'onde, la couronne est observable en permanence. La couronne est en expansion là où le champ magnétique le permet, expansion qui



→ Représentation de la structure à grande échelle de l'héliosphère. Les orbites des planètes extérieures sont représentées pour donner l'échelle des grandeurs. (ESA).



↑ Couronne du Soleil avec en surimpression, à la même échelle, une image du rayonnement X du Soleil. Caractéristique frappante : son manque de symétrie. (ESA)

→ Le Soleil est le siège de brusques décharges d'énergie (éruptions) qui provoquent localement dans la chromosphère et la couronne des perturbations importantes. (ESA)

se manifeste par un flot de matière ionisée (*le vent solaire*) qui baigne tout le système planétaire.

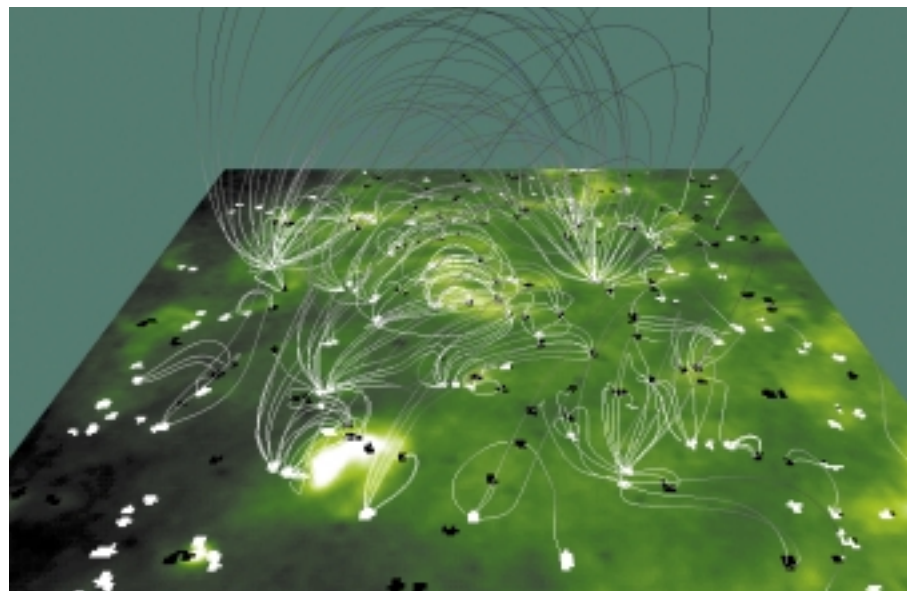
Le Soleil influence l'environnement terrestre de différentes façons: à cause du vent solaire ou de l'absorption du rayonnement X et UV qui chauffe l'atmosphère terrestre et la fait se dilater ; ce même vent solaire "presse" sur les lignes de force du champ magnétique terrestre qui sont comprimées du côté jour et étirées du côté nuit. D'autre part, les phénomènes éruptifs sont souvent accompagnés d'ondes de choc qui modifient les paramètres du vent solaire. La pression du vent solaire déclenche des perturbations du champ magnétique terrestre (*orages magnétiques*) et le nombre de particules chargées augmente alors au voisinage de la Terre (ceintures de radiation) tandis que certaines sont précipitées dans la basse atmosphère près des pôles magnétiques, y créant de spectaculaires phénomènes lumineux (*aurores*).

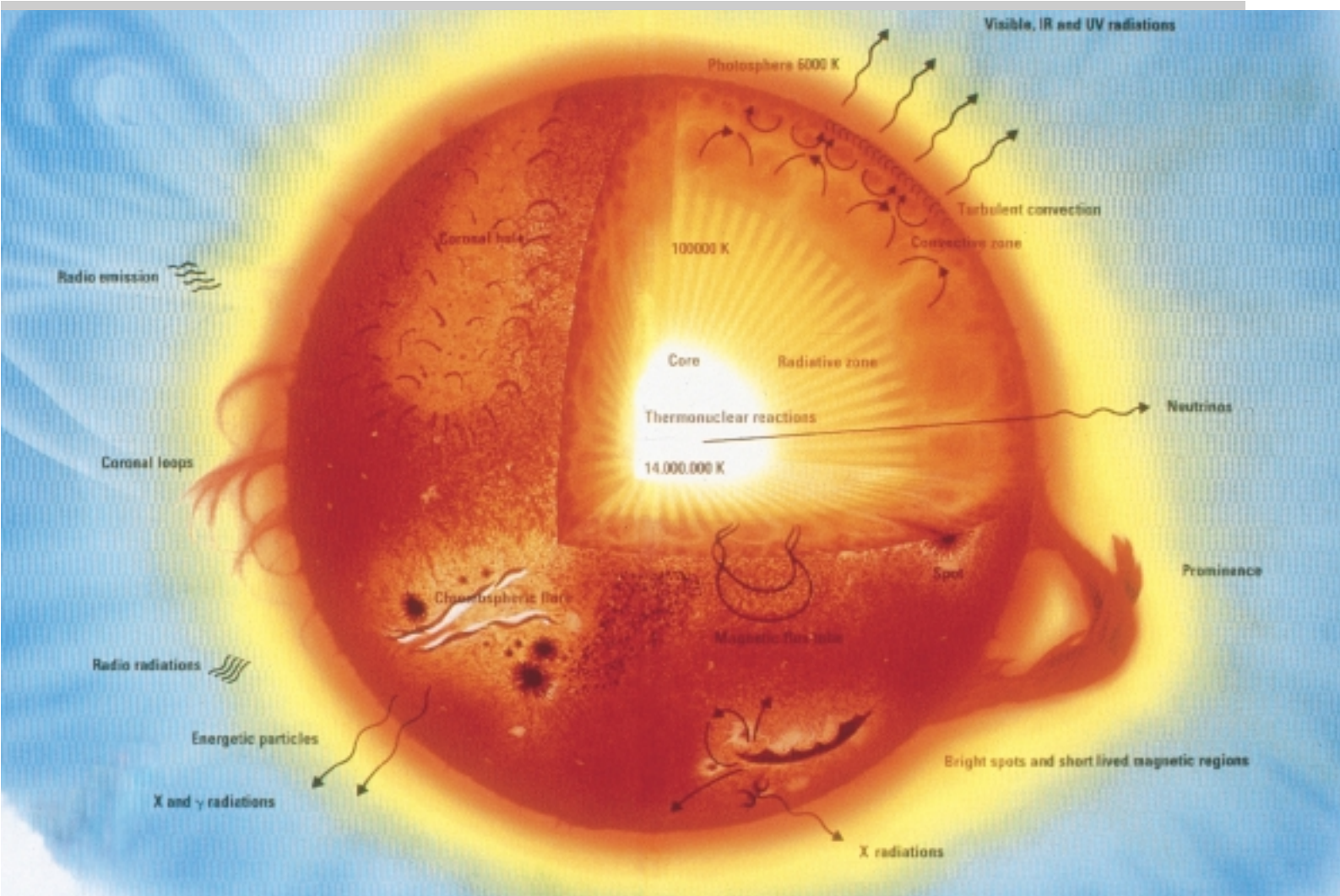
Poursuivant sa combustion, la température du Soleil va monter et le noyau se contracter provoquant l'expansion de l'enveloppe. Finalement, le Soleil va devenir une "géante rouge" lorsque la plus grande partie de l'hydrogène du noyau sera brûlée. Alors celui-ci

va se contracter davantage, devenant sans cesse plus chaud jusqu'à atteindre 100 millions de degrés, température à laquelle l'hélium-4 qui s'est formé au fil du temps va amorcer une réaction de formation de carbone-12 dans une explosion thermonucléaire. Les astrophysiciens prévoient que pendant les 100 millions d'années à venir, l'étoile restera brillante mais qu'ensuite cette fournaise va s'arrêter et que le cœur deviendra inerte. Cependant, à l'extérieur du noyau, l'hydrogène et l'hélium encore présents vont continuer à brûler pendant quelque temps encore. Progressivement, l'étoile passera à l'état de "naine blanche" et sa masse sera environ moitié de celle du Soleil actuel. Cette étoile chaude sera encore visible pendant quelques années mais elle finira par se refroidir pour devenir une "naine brune" invisible.

Quand notre Soleil deviendra une géante rouge, il avalera tout d'abord dans son expansion Mercure (à 58 millions de km), puis absorbera Vénus (108 millions de km), engloutira la Terre (150 millions de km) et atteindra presque Mars (228 millions de km). Heureusement pour nous, le sort que nous réserve notre bon vieux Soleil attendra encore... cinq milliards d'années !

→ Modèle des champs magnétiques à la surface solaire développé sur base des données récoltées par différents instruments à bord du satellite SOHO. (Document NASA Goddard Space Flight Center)





La petite explosion thermonucléaire qui mijote à notre porte -même si elle est durablement confinée sous l'effet de sa propre gravitation, comme l'assurent les spécialistes- n'est pas très réjouissante mais comme les liens entre l'activité solaire et la vie terrestre (climat, magnétisme, taches solaires, éruptions, etc...) se sont révélés plus étroits qu'on ne le pensait, voilà que notre étoile, au moment où elle est au maximum de son cycle d'activité, devient un ardent sujet de conversation et que son étude connaît, elle aussi, un regain d'activité.

En réalité, le puzzle scientifique autour du Soleil est beaucoup plus complexe que tout ce que l'on avait imaginé. Mais grâce à l'observation spatiale, conjuguée avec celle réalisée depuis la Terre, le moment approche où les scientifiques devraient entrevoir une unité de compréhension.

Les calories du Soleil

L'énergie fabriquée au cœur du Soleil se transforme en rayonnement qui jaillit sur toute la gamme des longueurs d'onde mais, pour l'essentiel (99%), l'astre émet de la chaleur (infrarouge) et de la lumière. Cette énergie nous arrive après deux amputations: les nuages jouent un rôle de miroir pour une partie tandis que l'atmosphère terrestre en absorbe une autre.

Au siècle dernier, les premières études dans ce domaine furent conduites par le physicien français *Claude Pouillet*, dont les travaux furent ensuite prolongés par ceux de l'Américain *Charles Abbot*. Il s'agissait évidemment de mesures faites au sol et la situation évolua lorsqu'il devint possible de faire séjourner des instruments au-dessus de l'atmosphère. Un appareil fonctionnant sur

le principe d'une comparaison de la chaleur du rayonnement solaire à celle fournie par une source électrique préalablement étalonnée fut embarqué lors de la première mission du *Spacelab* en 1983, une version améliorée (*Atlas*) conçue par l'Institut Royal Météorologique de Belgique volant à bord de la navette américaine *Atlantis* en même temps que notre astronaute *Dirk Frimout*.

Les nombreuses expériences qui furent conduites dans ce domaine, les unes avec des satellites automatiques, les autres avec des instruments largués à partir des navettes spatiales, permettent d'affirmer aujourd'hui que le Soleil envoie à peu près 1 368 watts par mètre carré normalement exposé à son rayonnement à la limite supérieure de notre atmosphère et pour un éloignement moyen de la Terre. Il est également acquis que cette puissance n'est pas

constante: elle est modulée par le Soleil en quelque 25 jours et fonction de l'importance des taches solaires observées. Le Soleil envoie une puissance plus faible lorsqu'il est calme et au contraire plus élevée lorsqu'il est actif, l'écart étant de l'ordre du watt.

Un watt peut paraître peu mais en réalité il peut être très important s'il découle de changements dans une tranche de rayonnements particulièrement importante. Il faut rappeler que le Soleil émet un double rayonnement. Il y a tout d'abord un spectre continu du fait de sa température, notre étoile se comportant comme un objet parfaitement émissif, c'est-à-dire presque identique au rayonnement émis par un corps chauffé à 5 400°C et représenté par une lumière visible, dont les longueurs d'onde seraient comprises entre 0,40 et 0,75 micromètre. Mais le Soleil est également créateur de radiations spécifiques qui connaissent de grandes fluctuations. C'est à elles qu'il faut imputer le contraste entre le Soleil actif et le Soleil calme, le watt de différence concernant une bande de longueurs d'onde où l'activité chimique du rayonnement est extrême, de sorte que de grandes conséquences en découlent pour notre haute atmosphère.

Le rayonnement solaire atteignant la surface terrestre n'est pas absorbé dans sa totalité, l'atmosphère et la surface de la planète en réfléchissant environ 30% vers l'espace. Le pourcentage de rayonnement incident réfléchi par la planète vers l'espace (*l'albédo*) varierait notablement si le climat changeait, si davantage de poussières étaient émises dans l'atmosphère (volcans, pollution) ou si davantage de terres étaient déboisées. Une diminution ou une augmentation de l'albédo conduirait à un réchauffement ou à un refroidissement de la Terre puisque le rayonnement solaire qui n'est pas réfléchi est... absorbé ! Il est assez étonnant qu'il aura fallu la crise de l'éner-

gie, en 1974, pour que le monde prenne à nouveau conscience du potentiel que représente l'énergie solaire alors qu'en réalité elle a toujours existé (*Archimède*, en 212 av. J.C., utilisa des miroirs "ardents" pour incendier la flotte romaine devant Syracuse) et d'une violente tempête au lendemain de Noël 1999 qui a privé des millions de familles françaises d'électricité, pour réaliser qu'il faut des watts pour éclairer les salles d'opérations et les maternités, des centaines de watts pour moulin le grain et faire fonctionner les frigos où sont conservés les vaccins et des milliers de watts pour pomper et irriguer les cultures. Bref, il faut des watts pour vivre.

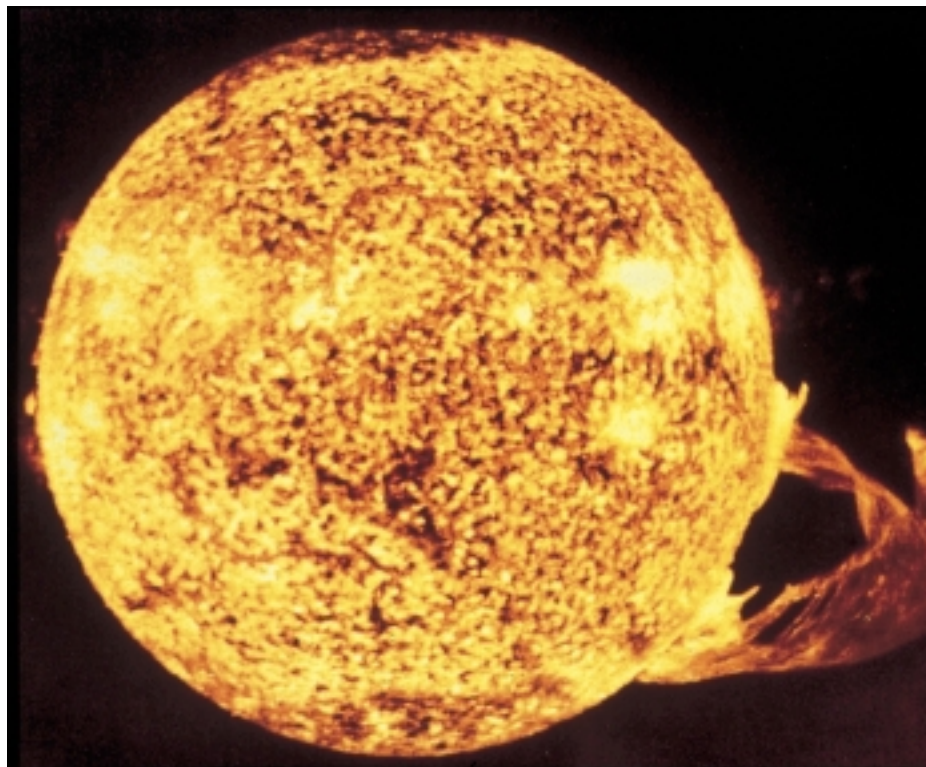
Une ardeur irrégulière

Quand nous sommes allongés sur une plage ou quand nous nous promenons en rase campagne, le Soleil nous semble d'une ardeur

constante. Pourtant il s'agit d'une étoile "variable" et le cycle bien connu des taches solaires, de période égale à 11 ans, n'est qu'un des aspects d'un *cycle d'activité magnétique* de période égale à 22 ans, qui influence l'émission de la lumière visible, des rayonnements ultraviolets, des rayons X et des particules chargées. Ces rayonnements et ces particules réchauffent et dilatent la haute atmosphère terrestre, provoquent les *aurores*, perturbent la transmission du courant électrique par les lignes à haute tension, modifient la couche d'ozone et peut-être même le climat. Les variations de l'activité solaire ne sont elles-mêmes pas régulières: elles étaient différentes au XVII^e siècle et elles changeront probablement encore.

L'étude de ces variations est importante car notre planète s'adapte à l'activité solaire, en ce qui concerne notre climat notamment et les scientifiques cherchent donc à préciser

↓ Situé à environ 150 millions de kilomètres de la Terre, le Soleil est une étoile complexe et le siège de phénomènes qui font actuellement l'objet d'importantes études scientifiques, notamment à l'aide des satellites Ulysse et SOHO. (NASA)



les relations existants entre les phénomènes qui se déroulent à l'intérieur du Soleil et leurs conséquences sur la Terre. Ils tentent de prévoir -si prévoir est possible- l'évolution de l'activité solaire. Les premiers espoirs de prévision sont apparus en 1843, quand le pharmacien allemand *Heinrich Schwabe*, qui observait le Soleil en amateur, remarqua que le nombre de taches solaires variait avec une précision de dix ans environ. Intéressé par les observations de Schwabe, le directeur de l'observatoire de Zurich, Rudolf Wolf, proposa en 1849 une recension quotidienne des taches solaires en se faisant aider par des astronomes du monde entier. Simultanément, il rechercha l'évolution du nombre de ces taches durant les 150 dernières années d'observation. Il arriva à la conclusion que la période du

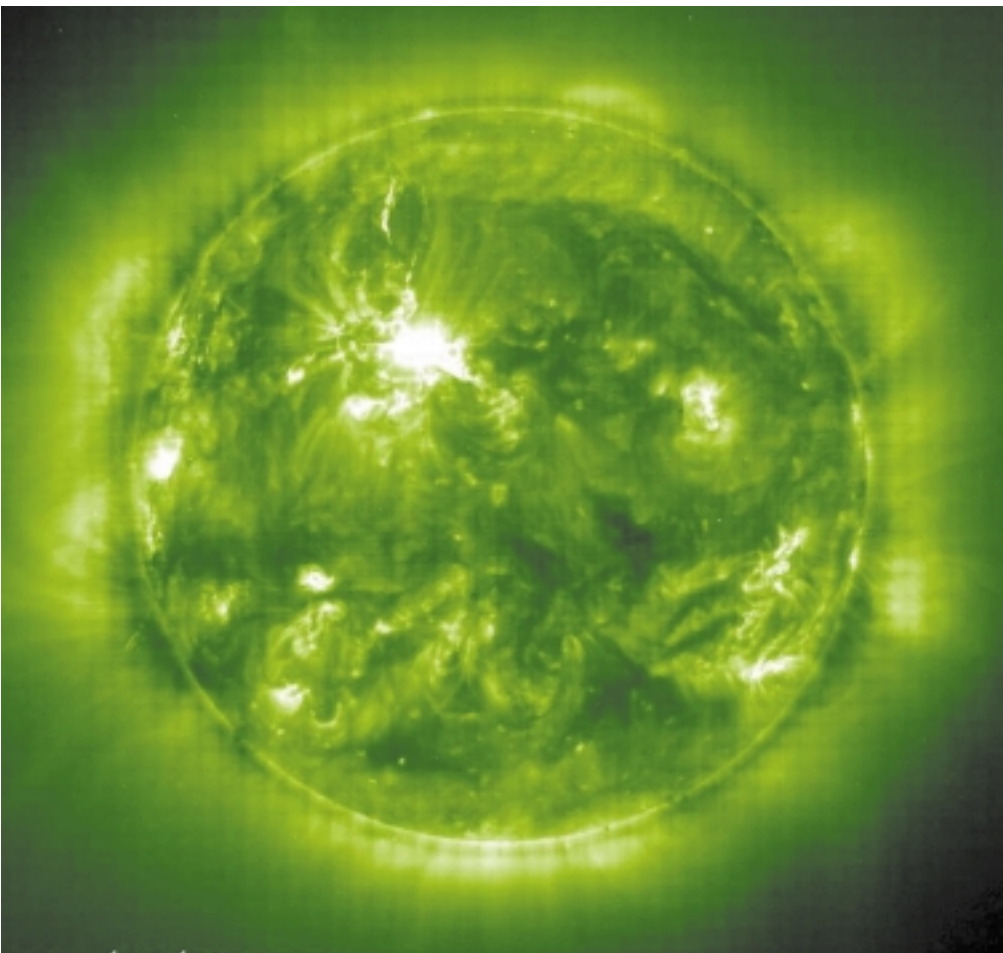
cycle était égale à 11,1 ans, malgré d'importantes irrégularités.

Deux remarques s'imposent ici. La première est qu'entre 1645 et 1715 le nombre de taches solaires n'a pas varié cycliquement et qu'elles étaient rares. Cet affaiblissement de l'activité solaire est connu sous le nom de "minimum de Maunder", du nom de l'astronome britannique *Walter Maunder* qui étudia le phénomène au début du XX^e siècle. Il faut souligner que ce minimum de Maunder eut lieu lors d'une période au climat particulièrement froid, la "petite glaciation", qui eut lieu sous le règne de Louis XIV, le Roi... Soleil ! La seconde est que depuis 1715 le nombre de taches solaire a oscillé sans interruption et alors que les cycles couvrant la période 1878-1923 (cycles

numérotés 12 à 15) ont une amplitude moyenne de 82 en indice de Wolf, ceux de la période récente allant de 1944 à 1986 (cycles 18 à 21) ont une amplitude moyenne de 157, soit environ deux fois plus.

On retiendra l'importance de résultat de la formule de Wolf au point de vue statistique car si, au jour le jour, on ne constate que peu de corrélation entre R et les phénomènes d'activité solaire, par contre sur des périodes plus longues R devient une valeur moyenne qui a de nombreuses applications. Prenons par exemple le 22^e cycle dont le maximum a eu lieu en 1989-1990 et le minimum en 1996. C'est ainsi que le 6 mars 1989 débuta une série d'importantes éruptions qui dura huit jours au cours desquels pratiquement tout le réseau de communication de la marine américaine (fonctionnant aux fréquences 10-20 MHz) fut hors service. En octobre de la même année, des protons accélérés lors d'éruptions successives et projetés dans le milieu interplanétaire pendant plusieurs jours, vinrent perturber les capteurs servant à orienter la sonde Magellan et, bien qu'étant sur une orbite basse et relativement protégée, les astronautes qui volaient à bord de la navette américaine Atlantis pour le lancement de la sonde Galileo ressentirent des éclairs rétinien et des irritations oculaires importantes. Il est évident que ces protons, très énergétiques, peuvent traverser tous les blindages et venir perturber le fonctionnement des satellites: ce fut le cas en septembre 1989 lorsque le satellite américain TDRS-A enregistra 53 erreurs dans les mémoires de son ordinateur de bord alors que le taux habituel est d'une erreur par jour. Ils érodent également les panneaux solaires et l'on rapporte de nombreux cas de perte de puissance de ces générateurs durant de tels événements.

Enfin, quelques jours après une éruption, une onde de choc pénètre dans l'environne-



ment terrestre et déclenche des perturbations du champ magnétique terrestre; ce sont les *orages magnétiques*. Comme les rayonnements X et ultraviolets arrivés plus tôt, ils chauffent l'atmosphère et accroissent sa densité à l'altitude de vol des satellites. Le freinage augmentant, tant l'orbite que l'altitude des satellites se voient modifiées et doivent être corrigées pour maintenir un fonctionnement correct. Et, lorsque le 13 mars 1989 survint l'orage magnétique le plus intense jamais enregistré depuis le début des observations systématiques, le satellite scientifique *Solar Maximum Mission (SMM)* de la Nasa perdit en quelques jours plusieurs kilomètres d'altitude tandis qu'un réseau de sept satellites de communication nécessita en

deux jours autant d'interventions qu'en une année normale. Au Norad (le réseau américain de surveillance de l'espace), les spécialistes virent passer de 1 000 à 6 000 le nombre de cibles temporairement non indifiées du fait des nombreux changements d'orbite subis par les satellites et les débris divers qui orbitent autour de la Terre.

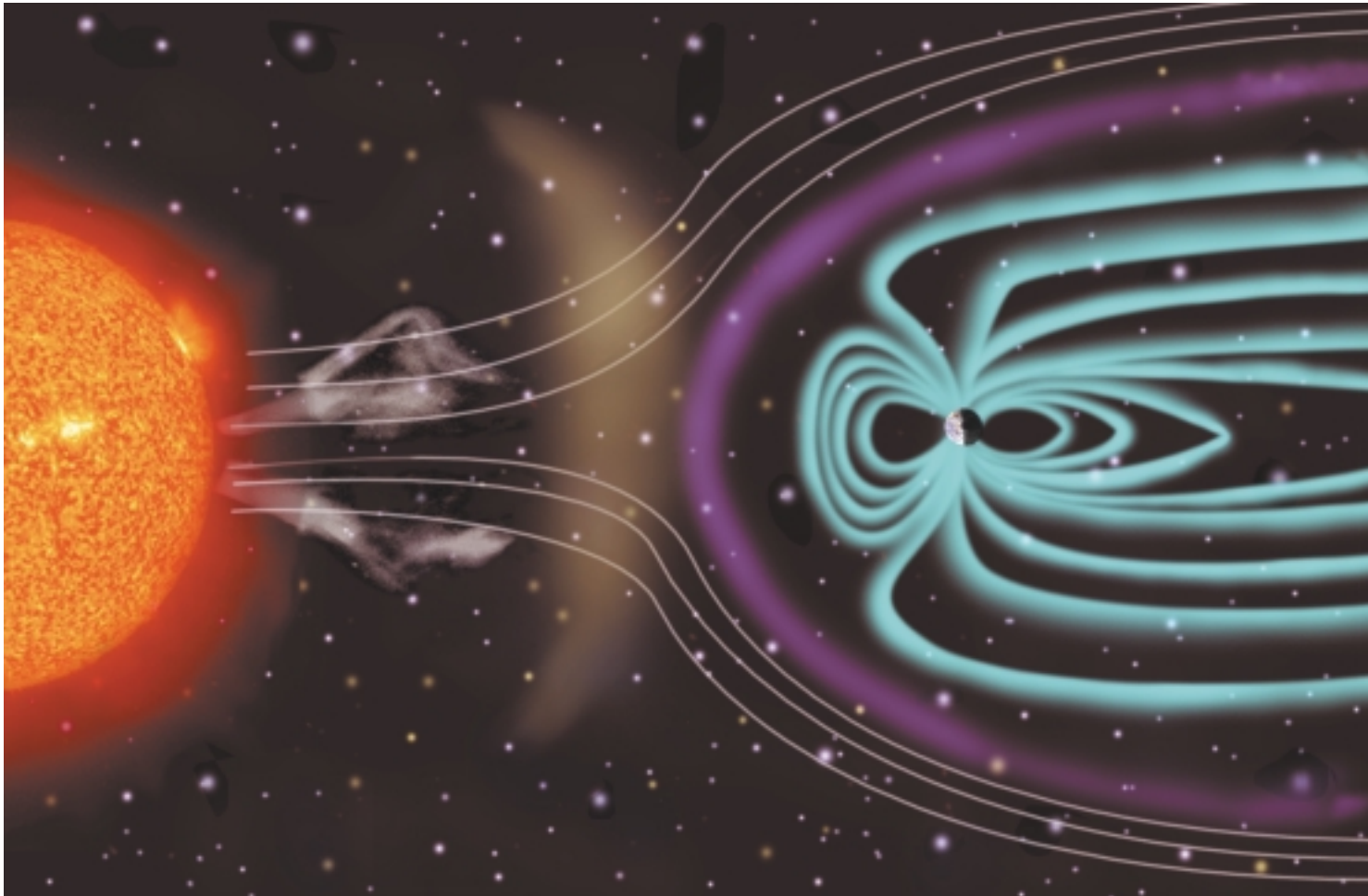
Nous sommes actuellement au début du 23^e cycle, ce qui revient à dire que l'activité solaire devrait atteindre un maximum... cette année !

Le vent solaire

En 1951, l'astrophysicien allemand *Ludwig Biermann* fournissait une explication à un

phénomène qui avait intrigué des générations d'astronomes : les comètes possèdent une longue queue faite de gaz et de poussières qui s'échappent de leur noyau solide et qui devrait, en toute logique, refléter son mouvement, c'est-à-dire traîner dans son sillage à l'instar d'une écharpe qu'on laisse flotter d'une voiture décapotable. Or ce n'est pas le cas: la queue tend à s'orienter dans la direction opposée au Soleil et se dédouble. Pourquoi ? Parce que la partie dédoublée de la queue, faite de gaz ionisé, c'est-à-dire constituée de particules électriquement chargées, est sensible à des particules de même type qui s'échappent continuellement du Soleil et qui ont le même effet qu'un vent soufflant de biais aurait sur l'écharpe qui traîne de la voiture. Biermann

↓ Le vent solaire est un flux de particules qui s'échappent en permanence de la couronne solaire dans le milieu interplanétaire et dont l'expansion est contrôlée par le champ magnétique du Soleil. (ESA/NASA)



venait ainsi de découvrir le *vent solaire*. Ce vent est constitué essentiellement de protons, d'électrons et de noyaux d'hélium avec des traces infimes d'ions d'éléments plus lourds, tels que l'oxygène ou le carbone. Il s'échappe continuellement et dans toutes les directions de la surface du Soleil et baigne l'ensemble du système solaire.

Sur Terre, il provoque divers effets directement observables. Par exemple, ses particules, parce qu'elles sont électriquement chargées, sont contraintes de suivre les lignes du champ magnétique terrestre. Celles-ci ont approximativement une configuration dipolaire, c'est-à-dire que, comme autour d'un barreau aimanté, elles s'écartent en éventail du pôle magnétique nord, font le tour de la Terre et rejoignent le pôle sud. Comme le trajet des particules chargées doit s'enrouler autour du champ magnétique, le champ terrestre forme un écran magnétique qui nous protège du vent solaire mais lorsque sa pression est particulièrement grande (après une éruption solaire, par exemple) le flot de particules ionisées déforme les lignes de champ et provoque des orages magnétiques, perturbations de l'environnement ionisé terrestre qui peuvent interrompre momentanément les communications radio et téléphoniques. Il arrive aussi que des conditions soient créées permettant à des particules de s'engouffrer dans les régions polaires où l'écran magnétique est percé et de pénétrer assez profondément dans l'atmosphère, y provoquant de spectaculaires aurores boréales ou australes.

Le vent solaire, qui produit des effets similaires sur les autres planètes, est une composante fondamentale du milieu interplanétaire. Les particules éjectées par le Soleil créent en effet autour du système solaire une bulle de gaz chaud et ionisé (ou plasma) connue sous le nom d'héliosphère et cette cavité baignée par le plasma

héliosphérique marque la zone d'influence du Soleil dans le milieu interstellaire. Le physicien américain *Eugène Newman Parker*, en 1958, fut le premier à trouver une explication possible de l'origine du vent solaire: la haute atmosphère du Soleil (la couronne) contient un plasma très chaud dont la température dépasse le million de degrés et dont les articules sont, par conséquent, animées d'une vitesse d'agitation thermique importante (jusqu'à 5 000 km/s). A partir d'une certaine altitude, des électrons peuvent s'échapper, entraînent protons et ions dans l'espace interplanétaire à une vitesse très élevée (supérieure à celle du son dans le milieu ambiant). Le vent solaire acquiert donc une vitesse supersonique dans la couronne, vitesse qui, dans le modèle de Parker, demeure approximativement constante jusqu'au niveau de l'orbite terrestre. Au-delà, elle est de l'ordre de 400 km/s.

La densité du vent solaire diminue, elle, régulièrement selon l'inverse du carré de la distance au Soleil: d'environ 10^{12} particules par cm^2 au niveau de la couronne solaire, elle décroît jusqu'à 10 particules au niveau de l'orbite de la Terre et est de moins d'une particule par cm^2 à la distance de Jupiter. On ignore encore où ce mouvement pourrait s'interrompre suite à l'interaction d'un obstacle, par exemple celui que constitue le gaz d'hydrogène interstellaire qui baigne toute la galaxie. On ignore (pour l'instant encore) où se situe la frontière (appelée héliopause) entre le vent solaire et le gaz interstellaire, les estimations théoriques la plaçant à environ 300 unités astronomiques (1 UA = 150 millions de km), soit bien au-delà de l'orbite de Pluton. Autrement dit, c'est tout le système solaire qui baigne dans le vent solaire.

Connaissant la densité et la vitesse du plasma éjecté par le Soleil, on peut estimer la quantité de matière que le Soleil perd sous forme de vent solaire, soit environ

1 million de tonnes d'hydrogène par... seconde. Bien qu'impressionnant, ce chiffre est en réalité très faible lorsqu'on le compare à la masse totale du Soleil ($2 \cdot 10^{27}$ tonnes) et il faudrait environ 1 000 milliards d'années à notre étoile pour perdre toute sa masse sous forme de vent. En pratique, cela ne se produira jamais car, bien avant, le Soleil aura commencé à s'éteindre doucement sous forme de naine blanche. Il se contractera jusqu'à atteindre à peu près la taille de la Terre et sa température ira en diminuant inexorablement. A ce stade, il n'éjectera plus de vent et l'écoulement du plasma héliosphérique s'arrêtera définitivement.

Avec l'avènement des sondes spatiales, qui ont permis à partir de 1962 l'étude *in situ* du vent solaire, le modèle de Parker a reçu d'éclatantes confirmations observationnelles et il demeure encore le schéma de base permettant d'expliquer les principales caractéristiques de ce flot de particules solaires. Mais, en même temps, les résultats des expériences spatiales ont profondément modifié et approfondi la vision trop simpliste de Parker. On sait maintenant que le vent solaire est le siège d'importantes variations au cours du temps et de phénomènes complexes variés dont on commence seulement à comprendre les mécanismes. C'est ainsi, par exemple, qu'entre le 10 et le 12 mai 1999, le Soleil n'a presque pas émis de vent solaire : le flot normalement ininterrompu de particules qu'éjecte la couronne du Soleil, d'environ 5 à 10 protons par centimètre cube d'espace est tombé ces jours-là à 0,2 proton par cm^2 . Les satellites américains ACE et Wind ont aussi mesuré une forte baisse de la vitesse de ce vent qui est descendue à 280 km/s alors qu'elle est normalement comprise entre 300 et 800 km/s. Cette courte période de calme plat devait être mise à profit par les astrophysiciens pour mieux étudier certains mécanismes de notre étoile.

Le casse-tête des neutrinos

Le Soleil est une boule de 700 000 km de rayon contenant deux milliards de milliards de milliards de tonnes de gaz (principalement de l'hydrogène), et qui rayonne en une seconde l'équivalent de l'énergie produite en 10 000 ans par un million de réacteurs nucléaires. Telles sont les déductions auxquelles sont arrivés les scientifiques à partir de ce qu'ils appellent le "modèle standard". Des mesures et des observations des lois de physique nucléaire vérifiées en laboratoire sur des accélérateurs de particules. De plus, quelques hypothèses et surtout beaucoup de calculs leur ont permis d'aligner ces chiffres. Quant à les transformer en certitudes, c'est une autre histoire car si certaines données sont aisément observables et mesurables de façon assez précise, il n'en est pas de même pour certaines autres. Impossible, par exemple, d'envoyer un instrument au cœur du Soleil: aucun matériau fabriqué par l'homme ne résisterait à pareille température.

Seule possibilité, compter et mesurer les caractéristiques des "messagers" que nous envoie le Soleil, les particules élémentaires produites par les violentes réactions nucléaires qui l'animent. Les plus intéressantes à cet égard sont les "*neutrinos*" que les physiciens s'efforcent de capter depuis plus d'un quart de siècle. L'ennui, c'est que, jusqu'à présent, les résultats de toutes leurs expériences ne cadrent toujours pas vraiment avec le fameux "modèle standard".

Produits par la fusion de deux noyaux d'hydrogène (la réaction de la bombe H), les neutrinos font partie, comme les électrons et les quarks, des particules élémentaires, ces briques fondamentales à partir desquelles est construit tout l'Univers. Ils présentent une caractéristique irremplaçable pour les spécialistes du Soleil: électriquement neutres et de masse nulle (ou très faible), pratiquement rien ne les arrête et ils

arrivent sur Terre à la vitesse de la lumière, huit minutes seulement après avoir été produits au cœur du Soleil. Contrairement aux photons, ces "grains" de lumière qui mettent plus d'un million d'années à en atteindre la surface après un trajet chaotique, les neutrinos représentent donc les meilleurs témoins possibles pour étudier les réactions nucléaires qui animent le Soleil.

Malheureusement, ils sont presque insaisissables: s'ils bombardent la Terre au rythme de 65 milliards par centimètre carré et par seconde, UN sur 100 000 milliards d'entre eux seulement interagissent avec un atome, et peut donc être -éventuellement- détecté. Les autres traversent notre planète et les êtres vivants qui la peuplent sans les "voir" et (heureusement) sans dommage! Depuis plus d'un quart de siècle des chercheurs européens, japonais et américains tentent en vain de piéger les neutrinos en construisant des détecteurs qu'ils placent au fond de mines, de tunnels creusés dans la montagne ou de l'océan et ces expériences ont surtout montré qu'un certain nombre de neutrinos... leur échappent.

Deux hypothèses sont avancées pour expliquer l'énigme des neutrinos manquants: la première est d'origine astrophysique et suppose que le nombre de particules captées en provenance du Soleil correspondrait aux seuls neutrinos issus de la fusion de l'hydrogène en hélium, ce qui implique que la température au centre du Soleil devrait être abaissée de 5 à 10 %. Ce qui, aux yeux des astrophysiciens, est inconcevable car l'équilibre énergétique du Soleil serait alors compromis. D'où, la seconde hypothèse basée sur les propriétés mêmes des neutrinos car comme ils existent sous trois variétés différentes, les neutrinos dits "électroniques", les "muoniques" et les "tau" et que seule la première est produite par le Soleil (et détectée sur Terre) on pourrait imaginer que les neutrinos manquants à l'arrivée se sont transformés en mu et en tau.

Ce mécanisme, imaginé par les physiciens sous le nom "d'oscillation", expliquerait le déficit relevé mais implique dans le même temps que les neutrinos aient une masse... ce qui demande d'aménager quelque peu le modèle standard de la physique des particules ! Les programmes de recherche en cours tant au *CERN* (Laboratoire Européen pour la Physique des Particules situé à Genève, Suisse) qu'aux Etats-Unis tentent de mettre cette oscillation en évidence, à déterminer la masse éventuelle des neutrinos et dans le même temps d'identifier la fameuse masse manquante de l'Univers.



L'étoile du jour

(ESO)

Si le Soleil est le centre de notre monde, il n'est cependant pas une étoile typique puisque dans notre galaxie (la Voie lactée) on estime qu'il y a 100 milliards d'étoiles, soit 100 milliards de soleils. De type G2, il est cependant l'objet le plus important du système solaire puisqu'il contient plus de 99,8% de sa masse totale, Jupiter contenant presque la totalité de la masse restante.

Quand le Soleil est né il y a quelque 4 600 millions d'années, son gaz comportait à peu près 72 % d'hydrogène, 24 % d'hélium et pour le reste une grande variété d'éléments qui avaient été presque entièrement synthétisés dans des supernovas (explosions d'étoiles) puis éjectés dans l'espace.

Aujourd'hui notre Soleil perd sous forme de vent solaire quelque 20 millions de millions de tonnes par an (700.000 tonnes par seconde), érosion qui peut s'observer pendant les éclipses solaires totales. Les conditions physiques subies par

la matière, dans le Soleil, changent radicalement en fonction de la profondeur : au cœur, la température est d'environ quinze millions de degrés et la densité ne dépasse pas la valeur de 150, valeur extraordinairement faible pour un astre aussi massif. Le gaz, brassé et porté lentement vers la surface, refroidit peu à peu pour atteindre, à 700 000 km du noyau, au niveau de la photosphère, 6 000°C. Plus haut, entre la photosphère et la chromosphère, la température du gaz raréfié passe par un minimum de... 4 500°C, puis remonte brusquement à 8 000°C au niveau des protubérances solaires. Plus haut encore, dans la couronne, la température du plasma solaire atteint 2 millions de degrés ; les astronomes se demandent toujours pourquoi...

** La période de rotation de la surface solaire varie d'environ 25 jours à l'équateur à 36 jours aux pôles. A l'intérieur profond, il semble exister une rotation sur une période de 27 jours.*

Les plus récentes données techniques du Soleil sont :

• Distance moyenne à la Terre	149,6 x 10 ⁶ km
• Masse	1 989 e + 30 kg
• Masse (Terre = 1)	332 946
• Température à la surface	6 000 K
• Température du noyau	15 000 000 K
• Diamètre apparent moyen	31'59",26
• Diamètre équatorial	1 392 000 km
• Rayon à l'équateur	696 000 km
• Rayon à l'équateur (Terre = 1)	108,97
• Densité moyenne (gm/cm ²)	1,410
• Densité moyenne (à la terrestre)	0,26
• Période de rotation (jours)	de 25 à 36*
• Energie (mégawatts)	386 x 10 ¹⁸
• Magnitude (Vo)	-26,8
• Température moyenne à la surface	6 000° C
• Inclinaison de l'équateur sur orbite	7° 15'

Chimie :

• Hydrogène	92,1 %
• Hélium	7,8 %
• Oxygène	0,061 %
• Carbone	0,030 %
• Azote	0,0084 %
• Néon	0,0076 %
• Fer	0,0037 %
• Silicium	0,0031 %
• Magnésium	0,0024 %

Dossier Le Soleil, tout feu tout flammes

← → La station internationale du Jungfraujoch dans les Alpes bernoises où les scientifiques belges observent le Soleil depuis 1950. (ORB)



Objet d'observation depuis des millénaires, le Soleil est donc loin d'avoir livré tous ses secrets et les astrophysiciens s'interrogent encore toujours sur bon nombre d'incompatibilités entre mesures et modèles théoriques tandis qu'ingénieurs et techniciens peaufinent, sous la direction de physiciens solaires, les instruments qui seront installés sur les futures sondes d'observation spatiale et les

télescopes ultra-perfectionnés qui sont montés sur les plus hauts sommets. Quelques observatoires se sont ainsi spécialisés dans l'étude de l'astre du jour. C'est le cas notamment de celui de Meudon et du Pic du Midi en France, de Kitt Peak et Sacramento Peak aux Etats-Unis pour l'observation optique, ou de Culgoora en Australie pour la radio.

Sous haute

Le Soleil depuis la Terre

Historiquement, l'observatoire de Meudon est le premier observatoire solaire du monde. Son fondateur, Jules Janssen, fut en effet le premier astronome à appliquer au Soleil les techniques de l'astrophysique naissante et c'est ainsi qu'en 1868 il découvrit l'hélium et qu'en 1876 il photographia la granulation solaire. Quinze ans plus tard, Henri Deslandres y inventa le spectrohélographe, un instrument qui donne des images de la chromosphère sur une seule longueur d'onde, permettant de photographier les différentes couches du Soleil sans mélanger les phénomènes qui s'y déroulent. Aujourd'hui, l'observatoire de Meudon est l'un des centres

mondiaux de documentation planétaire et de surveillance systématique des phénomènes liés à l'activité solaire. La grande lunette, dotée d'un objectif de 0,83 m de diamètre et de 16,3 m de focale (qui a été installé en 1891) est la troisième au monde. Il dispose également depuis 1969 de la première tour solaire d'Europe. Haute de 36 mètres, elle est constituée de deux cylindres concentriques: la tour intérieure qui supporte les miroirs étant isolée des effets du vent et des vibrations par la tour extérieure, dont les fondations sont indépendantes. Son miroir de 69 centimètres produit un faisceau de 45 mètres de long qui aboutit dans une pièce souterraine où il forme une image impres-

sionnante de 41 centimètres de diamètre. Celle-ci peut être examinée directement ou balayée par la fente d'entrée d'un spectographe.

L'observatoire solaire du Jungfraujoch, dans les Alpes Bernoises et situé à 3.580 mètres d'altitude, est un site idéal pour l'observation du Soleil car il y jouit de l'excellente transparence du ciel et d'une remarquable sécheresse de l'atmosphère. Depuis 1950, les scientifiques de l'Observatoire Royal de Belgique collaborent avec ceux de l'Université de Liège pour y effectuer des observations du spectre solaire.

L'autre grand observatoire solaire français est celui du pic du Midi



surveillance

de Bigorre à 2.870 m d'altitude où Bernard Lyot inventa et construisit le premier coronographe en 1931. Outre ses quatre coronographes de 15 à 26 centimètres d'ouverture et une lunette de 50 centimètres pour la photographie des taches solaires, l'observatoire possède depuis 1979 un télescope de 2 m de diamètre implanté au sommet d'une tour de 28 m de hauteur, sous une coupole à ouverture circulaire exactement ajustée au tube de l'instrument.

C'est dans l'ouest des Etats-Unis, en Californie, au Nouveau-Mexique et en Arizona que sont implantés les trois principaux observatoires solaires américains: le plus ancien est celui du mont Wilson qui dispose de

deux tours solaires dont une de 46 mètres de haut, les plus puissants ceux de *Sacramento Peak* et de *Kitt Peak*. A *Sacramento Peak*, l'instrument le plus spectaculaire est la tour solaire de 42 mètres qui forme une image du Soleil dans une chambre à vide située à 56 mètres sous la surface. L'absence d'air élimine les courants qui déformeraient l'image fournie par un miroir de 163 centimètres de diamètre et 55 mètres de longueur focale: c'est le plus grand du monde et les clichés obtenus avec cette tour solaire sont les plus fins jamais obtenus. Un second instrument, le magnétographe, fournit quotidiennement une carte des champs magnétiques tandis qu'un coronographe de 41 centi-

mètres d'ouverture est, avec celui de *Kislovodsk* (en Russie), le plus grand du monde.

Le *Kitt Peak National Observatory*, situé en Arizona, dans le désert de Sonora et à plus de 2.000 mètres d'altitude, fut inauguré en 1960. Il rassemble une dizaine de télescopes, parmi lesquels le télescope optique N.U. Mayall de 4 mètres de diamètres (mis en service en 1973) et le télescope McMath, le plus grand télescope solaire du monde, achevé en 1962. Il est installé dans une tour solaire de section carrée et inclinée d'une valeur égale à la latitude du lieu, soit 32°. Au total, le faisceau lumineux accomplit un trajet de 150 mètres, le miroir principal (152

centimètres d'ouverture) donnant une image directe du Soleil de 86 centimètres de diamètre projetée dans une chambre souterraine.

Enfin, signalons que faisant partie avec les observatoires de Kitt Peak et de Sacramento Peak, du *National Radio Astronomy Observatory* (organisme créé aux Etats-Unis en 1984 pour administrer les équipements nationaux d'astronomie optique), l'observatoire inter-américain de *Cerro Tololo* (fondé en 1963 et installé au Chili à 2.200 m d'altitude) compte sept télescopes dont le plus grand, mis en service en 1974, a 4 mètres d'ouverture et est identique au télescope Mayall de Kitt Peak.

Bien que l'essentiel du rayonnement solaire soit émis dans le visible et l'infrarouge, les émissions radio n'en ont pas moins une grande importance car elles permettent d'accéder aux phénomènes qui se déroulent dans l'atmosphère solaire. On utilise pour cela des radiohéliographes, ensembles d'antennes disposées en croix, en anneau ou en étoile. Le radio-observatoire de Nançay (dans le Cher, France) dispose de deux interféromètres, d'un radiohéliographe et d'un spectrographe multicanal. Une grande antenne parabolique (7.000 m² de surface utile) associant un miroir sphérique fixe de 300 m de long et 35 m de haut et un miroir plan mobile constitué de dix panneaux de 20 m sur 40 m, permet par ailleurs d'enregistrer le flux global de l'astre sur différentes longueurs d'onde tout au long de la journée. Les deux interféromètres donnent la position des sources d'émission radio avec une précision supérieure à 2 minutes d'arc (le diamètre du disque solaire est de 32 minutes) et produisent une "image" radio toutes les quatre minutes, ce qui permet de suivre l'évolution des sources au cours du temps. Le radiohéliographe fournit quant à lui des "images" radio du Soleil au rythme de 200 par seconde, ce qui permet de suivre l'évolution dans le temps de phénomènes très brefs. Mais le radio-interféromètre solaire le plus remarquable est certainement celui connu sous le nom d'*Australia Telescope* et situé en Nouvelle-Galles du Sud, en Aus-

tralie. Mis en service en 1988, il comprend deux composantes principales: d'une part un réseau compact de six antennes de 22 m de diamètre, installées à l'observatoire *Paul-Wild* de Culgoora et, d'autre part, pour obtenir un meilleur pouvoir de résolution, un réseau à longue base reliant à une ou plusieurs des antennes précédentes, une antenne de 22 m située à Mopra (à 100 km plus au sud) et le grand radiotélescope de 64 m de l'observatoire de Parkes, à quelque 200 km encore plus au sud. Enfin, l'utilisation conjointe d'antennes situées à Perth, Alice Springs, Hobart, Tidbinbilla et Sydney permet d'obtenir des performances équivalentes à celles que fournirait un radiotélescope de 3.000 km de diamètre avec un pouvoir de résolution atteignant 0,002" à 3 cm de longueur d'onde. A partir de ces observations, un ordinateur établit quotidiennement plusieurs cartes radio de l'ensemble du disque solaire.

Toutefois, si l'on parvient à s'affranchir (partiellement) de la turbulence, on ne peut rien contre le filtrage par l'atmosphère des rayonnements de courte longueur d'onde (UV, X et gamma) et, en attendant de disposer d'observatoires sur la Lune, les astrophysiciens n'ont d'autre ressource que d'utiliser des sondes spatiales et des satellites artificiels.

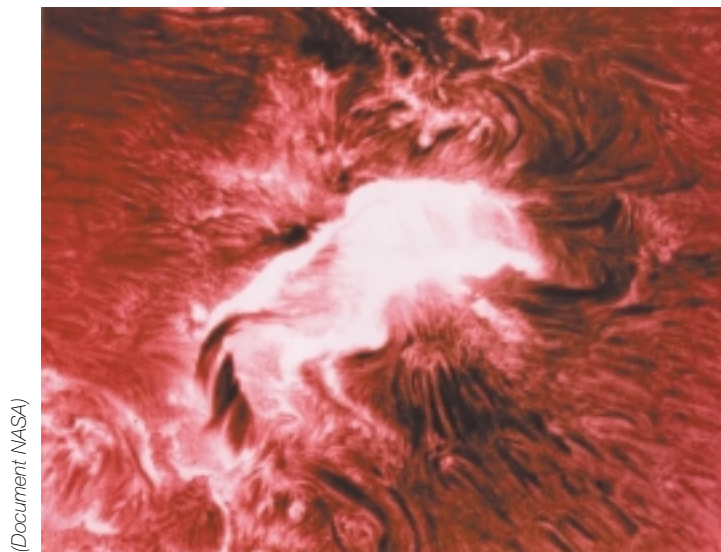
Des ballons aux satellites

La première tentative d'observation non classique de l'Univers

eut lieu peu de temps avant le début de la Seconde Guerre Mondiale, lorsque l'autrichien *V.F. Hess* parvint à haute altitude à bord d'un ballon et découvrit que passé un certain seuil et contrairement à toute attente, la densité des rayons cosmiques augmentaient fortement en fonction de l'altitude. En 1946, on parvint à obtenir au cours du bref vol d'une fusée, une image du spectre UV du Soleil. Au début des années 50, les premières fusées-sondes et des ballons inhabités de très haute altitude commencèrent à entrebâiller l'huître jusque là clos de l'Univers.

En 1952 et 1953, le *Dr. James Van Allen*, responsable de la coordination de l'étude scientifique des rayons cosmiques, fit procéder, depuis des ballons (baptisés "rockoons") parvenus à 24 km d'altitude, au lancement de petites fusées à proximité du nord magnétique de la planète. Les résultats de ces expériences incitèrent le physicien à demander en 1956 aux

→ Vue de la plate-forme européenne Eureka avec ses instruments, avant l'installation de sa couverture thermique. (ESA)



(Document NASA)

autorités l'autorisation de placer de petits détecteurs de rayons cosmiques à bord des premiers satellites expérimentaux américains. Ce furent cependant les Soviétiques qui, les premiers, placèrent des instruments capables de détecter le rayonnement cosmique ainsi que les rayonnements X et UV solaires à bord de *Sputnik 2* qui fut lancé le 3 novembre 1957. Finalement c'est grâce aux observations fournies par les satellites *Explorer* et *Pioneer* lancés en 1958 que James Van Allen et ses collègues ont pu déterminer l'existence de zones de radiations piégées dans le champ magnétique terrestre.

En 1959, les vols de *Luna 1-3* (URSS) et *Pioneer* permirent de découvrir un autre phénomène insoupçonné jusqu'alors, l'existence des vents solaires. Et c'est finalement le 7 mars 1962 que le tout premier observatoire solaire fut lancé: *OSO-1* (*Orbital Solar Observatory*). Huit satellites furent mis en orbite dans le



cadre de cette série entre 1962 et 1975, sur des orbites à peu près circulaires à 550 km d'altitude. Quelques satellites anglais (*Ariel*), français (*Tournesol*) allemands (*Hélios*), japonais (*Chinsei* et *Taiyo*), indiens (*Aryabhata*) et soviétiques (*Intercosmos*) ont aussi observé le Soleil en rayonnement X ou ultraviolet mais c'est depuis la station orbitale habitée américaine *Skylab* (lancée le 14 mai 1973) que les astronautes réalisèrent quelque 180.000 photographies du Soleil qui ont amené la découverte de l'existence des trous coronaux.

Plutôt que d'apporter des réponses, les résultats obtenus par toutes les observations du Soleil réalisées depuis l'espace soulevèrent autant de questions. Ainsi le satellite *SMM* (*Solar Maximum Mission*) lancé le 14 février 1980 par la NASA en plein maximum solaire et remis en état par deux astronautes le 4 avril 1984 lors d'une mission de la navette spatiale *Challenger*, a constitué un observatoire

automatique complet en orbite, entièrement consacré à l'étude des éruptions non seulement avec une résolution temporelle inégalée mais aussi dans diverses bandes d'énergie du domaine des rayons X de grande énergie. Le coronographe embarqué à bord de *SMM* et celui installé sur le satellite polaire américain *P78* ont montré sur plusieurs années que les majestueuses envolées de matière ionisée dans la couronne solaire se produisaient plusieurs fois par jour en période de maximum, un fait qui serait passé inaperçu sans l'observation continue depuis l'espace: *SMM* a suivi en direct plus de 12.000 éruptions solaires et a en outre découvert dix comètes au moment où elles frôlaient notre étoile ou s'écrasaient sur elle. D'autre part le radiomètre embarqué sur *SMM* a montré que la constante solaire variait elle aussi au cours du cycle solaire de vingt-deux ans. Tous ces phénomènes prennent surtout leur intérêt dans la mesure où les astrophysiciens

tentent de les replacer dans le cadre d'un modèle global de l'activité solaire mais, malheureusement encore aujourd'hui, aucun de ces modèles ne donne entière satisfaction. Le 2 décembre 1989 *Solar Max* quitta son orbite et brûla lors de sa traversée de l'atmosphère terrestre.

La plate-forme européenne EURECA

Le 2 août 1992, l'astronaute suisse Claude Nicollier, à bord de la navette spatiale américaine *Atlantis*, largua dans l'espace le porte-instruments réutilisable européen *EURECA* (*pour European Retrievable Carrier*). D'une masse de 4.491 kg (dont 1.000 kg d'instruments scientifiques) cette plate-forme constituait le plus lourd satellite jamais réalisé par l'Agence spatiale européenne. Gravitant autour de la Terre à 508 km d'altitude sur une orbite parfaitement stable et inclinée de 28 degrés sur l'équateur, les 15 appareils placés à bord d'*Eureca* ont fonctionné correcte-

ment pendant les onze mois qu'il a passé dans l'espace permettant de réaliser un total de plus de 90 expériences différentes. Il transmis à la Terre plus d'un milliard de données avant d'être récupéré à l'aide du bras télémanipulateur le 24 juin 1993 par un membre de l'équipage de la navette *Endeavour*.

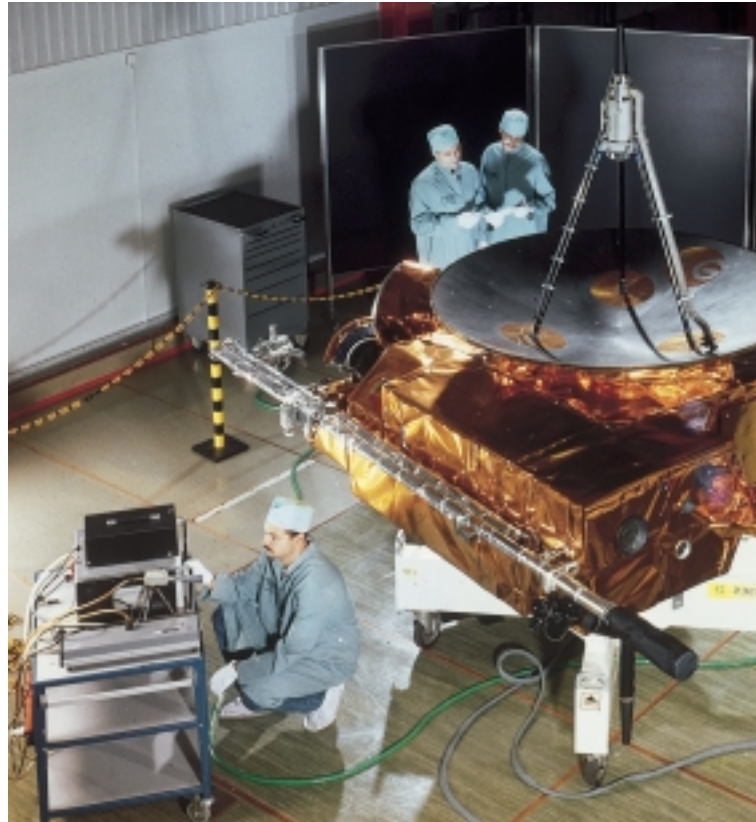
Conçues par une trentaine de laboratoires de recherche européens ou américains, les expériences portaient sur la biologie, la croissance de cristaux, la réalisation de matériaux, la physique des particules, l'observation des sources célestes de rayons X, de l'atmosphère terrestre et... solaire. Elles ont été menées soit en mode totalement automatique, soit en interactions avec les laboratoires terrestres qui télécommandaient les opérations depuis le Centre des opérations spatiales européen de l'ESA situé à Darmstadt, en Allemagne. Nous retiendrons ici les mesures du spectre solaire

(SOSP) réalisées sous la direction du service d'aéronomie du Centre National français de la Recherche Scientifique, ainsi que de la constante solaire et de ses variations (SOVA) dont l'expérimentateur principal était D. Crommelynck de l'Institut Royal Météorologique de Belgique. De plus, fruit de la collaboration scientifique entre l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) et le Département de Physique atmosphérique, océanique et planétaire de l'université d'Oxford (Grande-Bretagne), l'expérience ORA (pour Occultation Radiometer), dont E. Arijs était l'expérimentateur principal, a fait usage de ce que l'on appelle la "méthode de

l'occultation" pour réaliser des mesures de certains gaz mineurs et des aérosols présents dans l'atmosphère terrestre. Elle consistait à mesurer l'atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère durant les levers et couchers de Soleil observés par le satellite soit pendant environ trois minutes au cours de chacune des seize révolutions journalières d'Eureca.

Le succès d'Eureca, qui avait été conçu pour pouvoir effectuer au moins une demi-douzaine de séjours dans l'espace, ne fut cependant pas suffisant pour convaincre des utilisateurs potentiels et ne retrouva jamais plus son orbite de travail.

↓ La mission Ulysse à destination des pôles du Soleil. Ici, la sonde au sol avec ses instruments scientifiques. (ESA)



Un *raccourci* qui passe par Jupiter

Pour rencontrer les planètes qui se déplacent autour du Soleil il suffit de voyager dans l'écliptique, c'est-à-dire dans le plan dans lequel la Terre se déplace autour du Soleil. De Mariner à Galileo en passant par les Pioneer, Viking, Voyager ou Magellan, la formule a été exploitée au cours des quatre décennies écoulées avec le bonheur que l'on connaît mais pour capter le vent solaire dont les spirales jouent le rôle de repoussoir ainsi que pour réaliser l'observation des pôles du Soleil il est indispensable de s'écarter du disque des planètes et donc d'opérer hors de l'écliptique.

Logiquement, on pourrait imaginer une sonde qui quitterait la Terre en empruntant une direction perpendiculaire à l'écliptique. Mais une

telle manœuvre exigerait que l'on commence par neutraliser la vitesse de la Terre autour du Soleil (30 km/s) par une impulsion en direction opposée. Or cette exigence est totalement hors des possibilités d'un lanceur chimique si l'on tient compte du fait que sa charge utile devient environ dix fois plus petite chaque fois que l'on crée 4 km/s ! Autrement dit, les voyages dans l'écliptique sont les plus économiques et si l'on considère le voyage d'un engin de la Terre vers Jupiter, il suffit de porter sa vitesse par rapport au Soleil de 30 à 38,5 km/s (soit 8,5 km/s de différence). Si celle-ci dépasse les 12,4 km/s, il s'arrachera même à tout jamais au système solaire.

Telle est la situation au niveau de l'orbite de la Terre étant donné que notre planète, relative-

ment proche du Soleil, possède une vitesse élevée qu'elle confère à toutes les sondes. Mais cette situation change si l'on s'éloigne de l'astre du jour: la vitesse d'un engin placé sur une orbite solaire très excentrique va diminuer au fur et à mesure que croît l'éloignement du Soleil et comme elle ne sera plus que de 7 km/s au niveau de l'orbite de Jupiter, il sera possible de la neutraliser pour commander un virage à angle droit pour placer sa trajectoire non plus dans le plan de l'écliptique mais dans un plan perpendiculaire à celui-ci.

Pourquoi Jupiter ? En raison de la ressource que la planète présente au point de vue mécanique céleste et économies d'énergie: par sa seule masse, elle permet une réaction de gravitation qui permet à une sonde qui entre



L'odyssée d'Ulysse

Son odyssée terminée, Ulysse s'ennuyait ferme à Ithaque auprès de Pénélope. Il tenta, raconte Dante, de convaincre ses anciens coéquipiers de partir à la découverte "du monde inhabité au-delà du Soleil". Il s'agissait alors de franchir le détroit de Gibraltar pour aborder une zone inexplorée à l'époque. Près de trois mille ans plus tard les scientifiques européens et américains ont baptisé "Ulysse" un petit robot qu'ils ont chargé de concrétiser à l'échelle cosmique le rêve fou du héros mythologique.

Imaginé par le physicien américain John Simpson en 1959, le

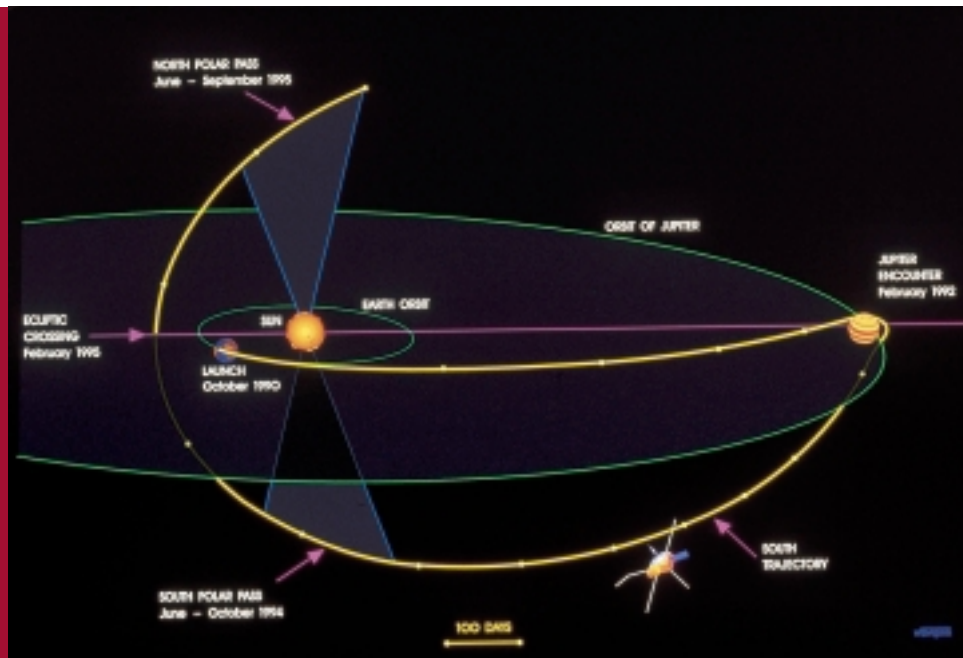
projet de voyage d'Ulysse consistant à aller examiner les pôles Nord et Sud du Soleil a mûri plus de vingt à l'ombre des laboratoires avant de prendre son envol. Le premier Spoutnik n'avait été lancé que deux ans auparavant et, pour les ingénieurs du spatial, une telle mission tenait largement du domaine de la science-fiction. Mais les frontières du possible reculent avec le temps et après avoir étudié le problème séparément, les scientifiques de l'Agence spatiale européenne (ESA, qui s'appelait alors ESRO) et de la NASA décidèrent en 1974 de travailler ensemble sur le projet. La mission OOE (*Out Of Ecliptic*) ne prendra finalement le nom d'Ulysse qu'en 1984 pour

entamer une odyssée... d'un quart de siècle.

Le lancement d'Ulysse, prévu initialement pour février 1983, reporté à diverses reprises pour des raisons techniques et budgétaires, eut finalement lieu le 6 octobre 1990 à partir de la navette spatiale américaine Discovery. Le long de son trajet vers Jupiter, la sonde a multiplié les observations et les analyses: intensité et distribution des électrons et des protons du vent solaire, charge électrique de ses ions, champ magnétique interplanétaire, composition et propriétés des particules très énergétiques et des rayons cosmiques, etc..., accumulant un

→ La trajectoire d'Ulysse vue de 15° au-dessus du plan de l'écliptique. Les lignes bleues délimitent les segments du véhicule spatial supérieure à 70°; les intervalles entre deux croix représentent des périodes de 100 jours. (ESA)

dans son domaine d'en ressortir avec une vitesse très différente parce qu'énergies et quantités de mouvement se trouvent, du fait de leur interaction, redistribuées autrement. Cette opportunité fut mise à profit dans le passé pour accélérer d'autres engins qui arrivaient près de Jupiter. C'est ainsi que les vitesses des Pioneer 10 et 11 et des Voyager 1 et 2 furent augmentées dans des proportions qui confèrent à ces sondes l'énergie nécessaire pour s'évader du système solaire.

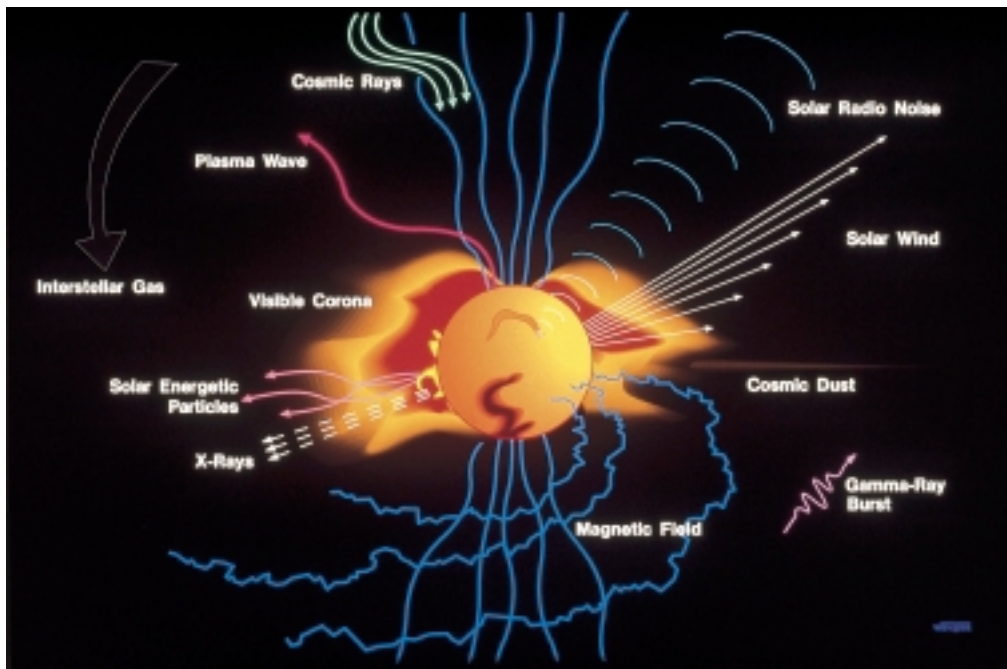


La gravitation de Jupiter peut également servir (il s'agit d'un "simple" problème de composition des vitesses) à ralentir un engin qui viendrait de la Terre au point de le faire tomber vers le Soleil. C'est le moyen le plus économique pour atteindre le Soleil et ce fut donc la for-

mule mise en œuvre avec Ulysse: abordant le domaine de Jupiter dans le plan de l'écliptique avec une vitesse de 7 km/s, sa trajectoire fut tordue au point qu'il en est ressorti animé d'une vitesse voisine de 9,3 km/s et dans une direction presque perpendiculaire à l'écliptique.

A l'issue de sa réaction de gravitation avec Jupiter, Ulysse s'est donc retrouvée animée d'une vitesse propre à se placer sur une orbite solaire de six ans, constituant dans le même temps une planète artificielle évoluant dans un plan perpendiculaire à l'écliptique.

↓ Représentation schématique des différents domaines étudiés par Ulysse. (ESA)



nombre impressionnant de mesures qui pour l'essentiel constituèrent des "premières".

Le 8 février 1992 le satellite passait au plus près de Jupiter et le 13 septembre 1994, après quatre années de voyage et un parcours de 1,7 milliard de kilomètres, il survolait les régions antarctiques du Soleil, les scientifiques ayant enfin une vue plongeante sur ses racines magnétiques. En route vers l'hémisphère nord, l'engin traversa ensuite le plan de l'équateur solaire le 12 mars 1995. Il était alors au plus proche du Soleil, soit à 200 millions de kilomètres ! Le 31 juillet de la même année il survola pour la première fois les régions du pôle Nord solaire. Poursuivant son odyssee, Ulysse croisa une nouvelle fois l'orbite de Jupiter le 17 avril 1998, entamant ainsi sa deuxième orbite solaire. Un nouveau survol de la zone solaire antarctique est prévu en sep-

tembre de cette année, au moment où l'activité solaire sera environ à son paroxysme et que le Soleil aura inversé sa polarité magnétique. Les instruments scientifiques découvriront alors des régions polaires totalement différentes de celles explorées six ans plus tôt. Fin février de cette année, Ulysse avait atteint la latitude 47 degrés sud et se trouvait à environ 585 millions de kilomètres du Soleil. Ce voyage dans la troisième dimension pourrait se poursuivre jusqu'à épuisement des ressources énergétiques de l'engin en l'an 2004 alors qu'il était prévu à l'origine de clôturer la mission le 31 décembre 2001.

Cette sonde de 370 kg et d'une valeur d'environ 1 milliard de dollars (1 milliard d'euros), qui mesure (hors antennes) 3,24 m de long, 3,33 m de large et 2,14 m de haut, emporte neuf instruments scientifiques pour

détecter les plasmas du vent solaire, le champ magnétique autour du Soleil, les rayons cosmiques provenant de notre galaxie et d'autres particules chargées provenant du Soleil ainsi que les bouffées radioélectriques et les rayonnements X solaires. Au total, 49 institutions scientifiques européennes et américaines participent à la mission d'Ulysse dont l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB). Celui-ci a offert d'analyser et d'interpréter des observations faites simultanément avec plusieurs instruments dans le but d'utiliser ces observations pour tester et affiner les modèles théoriques des discontinuités directionnelles développés à l'IASB depuis 1976 par Michel Roth et Joseph Lemaire.

Le périple de la sonde Ulysse autour du Soleil a été émaillé de nombreuses découvertes car, du fait de sa trajectoire sans équi-

valent, elle a pu se livrer à des observations sous un angle nouveau, dans l'espace lointain et en particulier sur des régions jusqu'ici inexplorées de l'héliosphère au-dessus des pôles solaires. Les découvertes sur le vent solaire rapide figurent probablement parmi les résultats les plus remarquables de la mission. Le vent solaire issu de la zone équatoriale se déplace à une vitesse variable mais relativement lente, comprise entre 350 et 400 km/s. En revanche, le vent solaire issu des trous coronaux souffle à la vitesse constante de 750 km/s. De plus, Ulysse a constaté que ce vent rapide s'éloigne du Soleil en se déployant dans l'héliosphère qu'il occupe aux deux-tiers. Enfin, il existe une ligne de démarcation étonnamment nette entre ces deux types de vent.

D'autre part, le champ magnétique solaire est apparu curieusement uniforme à toutes les latitudes héliosphériques: au voisinage de la surface visible du Soleil, l'intensité de ce champ atteint son maximum au-dessus des pôles mais à la distance qui sépare Ulysse du Soleil cette intensification n'apparaît plus. Il semblerait que la pression magnétique du vent solaire estompe les différences d'intensité du champ mais Ulysse a néanmoins découvert des ondes magnétiques d'une intensité inhabituelle dans la région des pôles.

Enfin, autre découverte surprenante: l'existence d'un lien entre les régions polaires et

équatoriales. Aux latitudes élevées, Ulysse a en effet observé des variations d'intensité des particules énergétiques et des rayons cosmiques imputables à la vitesse de rotation du Soleil à des latitudes plus proches de l'équateur. Les astrophysiciens s'interrogent encore aujourd'hui sur les modifications qu'ils devront apporter à leur conception du champ magnétique héliosphérique pour la faire concorder avec les observations effectuées par Ulysse !

Le Soleil observé 24 heures sur 24

Lancé du centre spatial Kennedy (en Floride) le 2 décembre 1995 par une fusée américaine Atlas II AS, le satellite de l'Agence spatiale européenne SOHO (pour SOlar and Heliospheric Observatory) étudie le Soleil avec une précision encore jamais égalée dans le cadre d'un programme mené en collaboration avec la Nasa. Plutôt que d'être mis en orbite autour du Soleil, il a été placé au point précis où les forces gravitationnelles de la Terre et du Soleil s'équilibrent, à 1,5 million de kilomètres de la Terre en direction du Soleil, une position connue en astronomie sous le nom de "point de Lagrange L1" (voir encadré). De cet endroit, il peut observer le Soleil en continu, sans interruption 24 heures sur 24 pendant 365 jours par an puisqu'il n'est pas tributaire des conditions météorologiques ni de la présence de l'atmosphère comme c'est le cas pour les télescopes installés

au sol, et non plus par les passages du satellite dans l'ombre de notre planète.

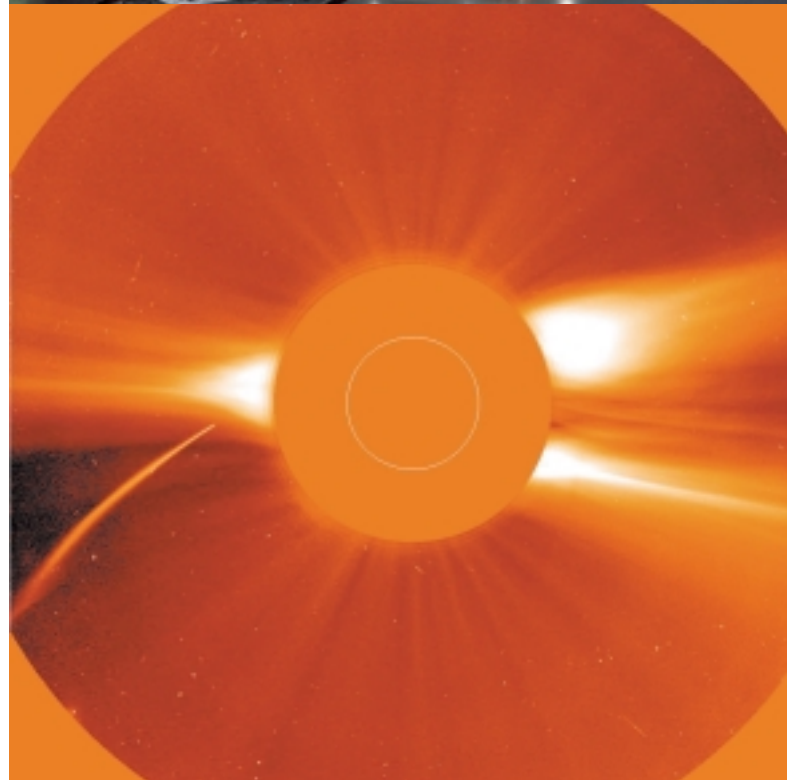
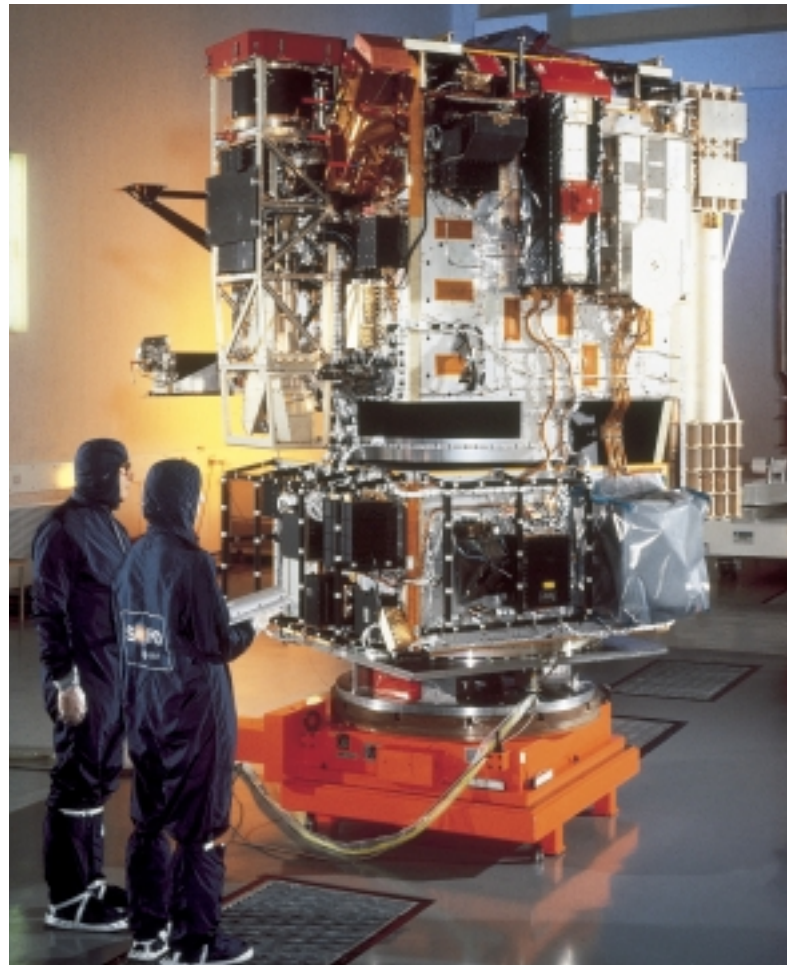
Ce lancement fut particulièrement complexe puisque réalisé en deux temps: après avoir été placé sur une orbite "de parking" à 180 km d'altitude, c'est l'étage supérieur de la fusée porteuse qui, réallumé, a placé l'engin sur la trajectoire interplanétaire qui devait lui permettre de rejoindre le point L1.

SOHO ne se contente pas de regarder le disque solaire visible mais il plonge également son regard au cœur de notre étoile pour le tourner également vers la Terre, à travers de nouvelles fenêtres d'observation. Trois régions du Soleil sont examinées plus particulièrement: son cœur opaque, son atmosphère chaude et transparente ainsi que le vent solaire qui s'en échappe sous la forme d'un flux de particules chargées et de champs magnétiques vers l'ensemble du système solaire.

Les douze instruments de mesure ou d'observation européens ou américains qu'emporte l'engin et qui ont été réalisés par une quinzaine de laboratoires de recherche différents, ont déjà permis de lever certains mystères majeurs du Soleil. Il y a trois instruments d'héliosismologie qui observent sans interruption les oscillations solaires, cinq instruments destinés à l'étude de l'atmosphère solaire, les autres étant destinés à l'analyse *in situ* des particules chargées du vent

→ Le satellite SOHO de l'ESA emporte douze instruments de mesure et d'observation européens et américains réalisés par une quinzaine de laboratoires de recherche différents. (ESA)

↓ Image prise par l'instrument LASCO. (ESA/NASA)



En équilibre pour *l'éternité* ?

Sur la route conduisant de la Terre à la Lune, Jules Verne avait admis l'existence d'un point neutre aux neuf-dixièmes de la distance séparant les centres des deux mondes. Cela pouvait paraître logique dès l'instant où la Lune est 81 fois plus légère que la Terre et qu'il est bien connu qu'à un éloignement neuf fois plus grand, la loi d'attraction universelle fait correspondre une force 81 fois plus petite. Le romancier avait cependant oublié que l'équilibre aurait dû être instauré entre non pas deux mais trois forces: d'un côté l'attraction de la Terre, de l'autre l'attraction de la Lune augmentée d'une force centrifuge. Se trouvant sur l'axe Terre-Lune, ce point neutre était dès lors promis à tourner autour de la Terre, tout comme la Lune.

Pareillement, sur le segment Soleil-Terre, un point neutre sera tel que l'attraction du Soleil contrebalancera l'attraction de la Terre augmentée d'une force centrifuge que développe une rotation autour du Soleil en une année. Non seulement cette mécanique est aujourd'hui bien connue mais les spécialistes ont substitué à la notion de "point neutre", le concept plus général de cinq points d'équilibre dits "points de Lagrange", du nom du mathématicien français Joseph Louis Lagrange (Turin 1736-Paris 1813) qui démontra leur existence en 1772.

Notés respectivement de L1 à L5, on retiendra que les trois derniers (L3, L4 et L5) se trouvent

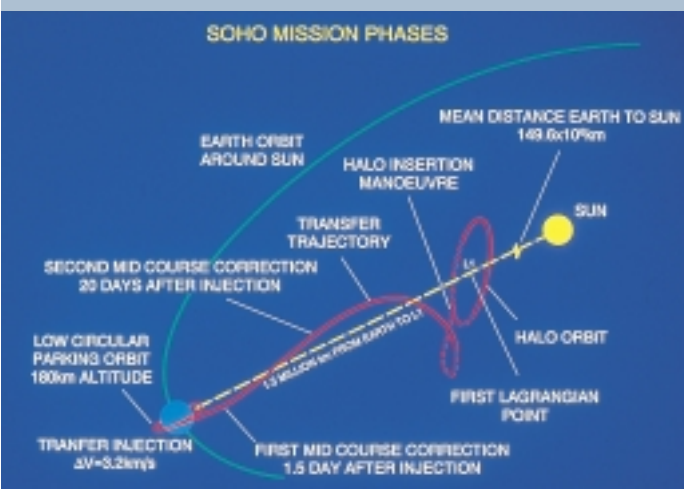
sur l'orbite de la composante la moins massive du système à 60°, 180° et 300° respectivement de la direction formée par les deux composantes du système. Les deux autres points d'équilibre se trouvent sur la ligne joignant les centres des deux composantes: L1 entre ces composantes et L2 au-delà de la composante la moins massive. Autrement dit, un objet sans vitesse placé en l'un de ces points y resterait en équilibre... pour l'éternité.

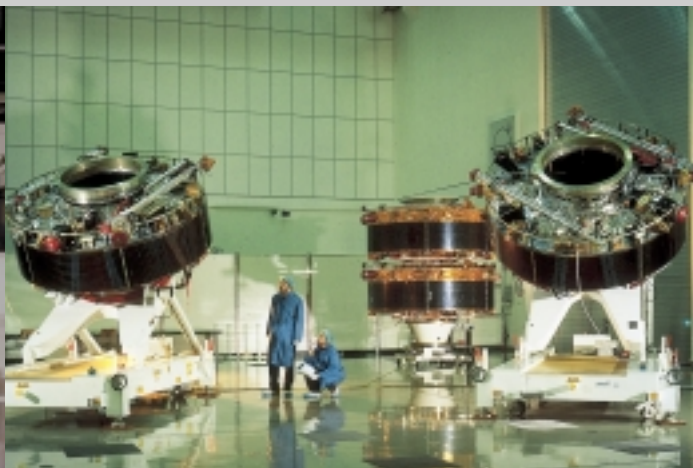
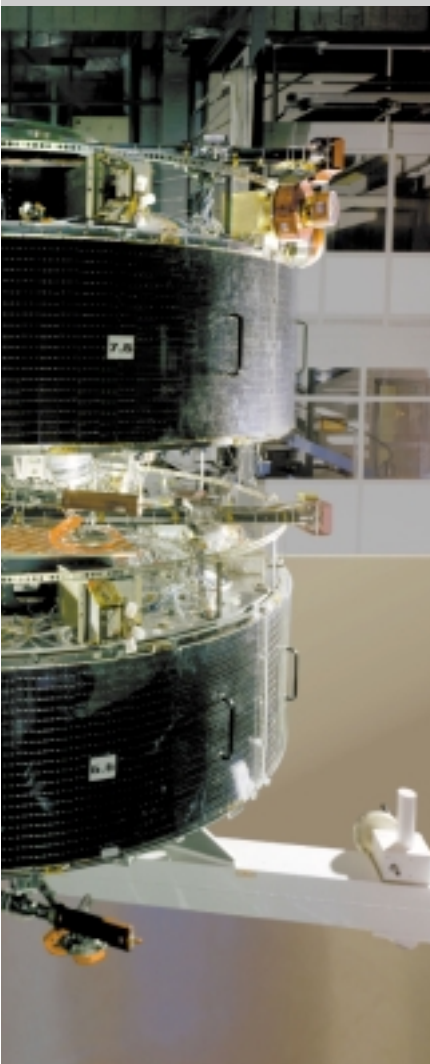
Malheureusement, au point L1 situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre, l'équilibre est instable, ce qui signifie que le plus petit déplacement de l'objet qui s'y trouverait placé par rapport à la position exacte d'équilibre, l'empêcherait d'y revenir et l'enverrait à la dérive. Et comme les scientifiques préfèrent conserver à cet placement un satellite qui a coûté la bagatelle de plus de trente milliards de nos francs (750 millions d'euros), ils ont prévu de le mettre en orbite autour de ce point. Sur cette trajectoire, appelée "orbite de halo", les forces d'entraînement dues à la rotation de l'objet sont à nouveau équilibrées par l'attraction du Soleil et de la Terre, ce qui n'empêchera toutefois pas SOHO de suivre, sur quelque cinq mois et dans un plan perpendiculaire à l'axe Terre-Soleil, une route qui, à certains moments, l'en éloignera à plus de 600.000 kilomètres. Cela est cependant parfaitement compatible avec sa mission (les observations réalisées sont là pour le prouver) et comme SOHO possède d'importantes réserves de combustibles, il sera toujours possible si cela devenait impératif pour sa sécurité ou pour une raison opérationnelle, de l'éloigner définitivement du point de Lagrange où il se trouve depuis mars 1996.

← Différentes phases du vol de SOHO. Pour pouvoir observer le Soleil 24 heures sur 24, le satellite a été installé sur une orbite de halo autour du point de Lagrange L1. (ESA)



solaire et de la cartographie à grande échelle de sa structure. Le véhicule spatial communique avec le sol par l'intermédiaire du Réseau pour l'espace lointain (DSN) de la Nasa et qui comprend trois antennes radio installées en différents points du globe: l'une à Goldstone (aux Etats-Unis), l'autre à Madrid (en Espagne) et la troisième à Canberra (en Australie). Lorsque le DSN a enregistré les données transmises par SOHO, celles-ci sont acheminées vers le Centre spatial Goddard de Greenbelt (dans le Maryland, aux Etats-Unis) d'où SOHO reçoit les instructions formulées par les chercheurs. Les données provenant de toutes les observations y sont stockées, archivées et les





← Deux des quatre satellites Cluster. (ESA)

scientifiques du monde entier y ont accès par voie électronique.

Dresser déjà le bilan des progrès réalisés grâce à SOHO dans notre connaissance du Soleil et des phénomènes qui l'agitent est impossible car il ne se passe guère de semaine sans que telle université ou tel centre de recherche ne vienne faire part d'une nouvelle découverte.

Mais SOHO, de sa position privilégiée, ne se contente pas de révolutionner notre connaissance du Soleil, il observe également les comètes qui passent et notamment celles qui jouent les "kamikaze" en plongeant dans l'atmosphère solaire. En février 2000, il en était au centième objet

céleste de ce type découvert, devenant ainsi le plus important découvreur de comètes de l'histoire. Ces images sont fournies par un instrument dénommé LASCO (pour Large Angle and Spectrometric Coronagraph) constitué d'un ensemble de coronographes qui permettent d'observer l'espace entourant le Soleil jusqu'à une distance de 20 millions de kilomètres, tout en masquant le disque solaire lui-même pour éviter l'effet d'éblouissement. Conçu par une équipe multinationale placée sous la direction du laboratoire de recherche de la marine américaine, LASCO surveille principalement les rejets de matières solaires susceptibles de constituer une menace pour l'environnement spatial terrestre. La découverte de ces comètes représente en quelque sorte pour lui "la cerise sur le gâteau".

Vaisseau amiral de la flotte internationale d'observatoires solaires, la prolongation de la mission d'observation de SOHO permet d'observer actuellement l'intense activité du Soleil.

Le futur

Avec l'explosion du lanceur européen Ariane 5 le 4 juin

1996, on aurait pu croire que la mission CLUSTER qui consistait à mettre quatre sondes jumelles sur une trajectoire polaire excentrée le long de laquelle elles devaient évoluer en formation tétraédrale pendant deux ans afin de saisir en trois dimensions les phénomènes physiques complexes qui résultent de la rencontre entre les flux de particules en provenance du Soleil et l'environnement magnétique de la Terre, se terminait dans une immense gerbe de flammes. Ce programme européen unique par ses objectifs et sa configuration, et qui de plus était attendu avec impatience par plus de deux cents chercheurs à travers le monde, ne pouvait être ainsi abandonné. C'est pourquoi le Comité des programmes scientifiques de l'ESA décida en avril 1997 de lancer une nouvelle mission Cluster II complète vers la mi-2000. Un consortium européen a construit quatre nouveaux satellites (Salsa, Samba, Rumba et Tango). Salsa et Samba ont été lancés le 16 juillet, Rumba et Tango le 8 août par deux fusées russes du type Soyouz depuis le site de Baïkonour (au Kazakhstan).

Chaque satellite d'un poids de 1.200 kg emporte un ensemble identique de onze instruments fournis par des institutions scientifiques de différents pays. Lorsqu'ils auront été placés sur leurs orbites polaires fortement elliptiques, allant de 19.000 à 119.000 km au-dessus de la Terre, ils feront, au cours des deux années suivantes, des allers-retours entre la magnétosphère et l'espace interplanétaire et se retrouveront parfois à quelques centaines de kilomètres l'un de l'autre mais aussi parfois à 20.000 km selon le phénomène à étudier.

Cette mission arrive à point puisqu'elle se déroulera lors du pic d'activité de l'actuel cycle solaire, au moment où les taches solaires et le rayonnement sont à leur maximum.

A l'armada de satellites qui proviennent de nombreux pays et qui procèdent déjà (ou qui le feront dans le futur) à l'étude du Soleil et des relations physiques Terre-Soleil, devrait encore venir s'ajouter l'expérience Picard (montée sur un micro-satellite français dont le lancement est prévu vers la mi-2003) et dont la mission est d'effectuer des mesures précises du diamètre solaire, de la rotation différentielle, de la constante solaire et de leurs variations et variabilités. Ces mesures devraient être exploitées pour améliorer la connaissance de l'influence des facteurs solaires sur l'évolution du climat de la Terre.

Dossier Le Soleil, tout feu tout flammes

Outre les nombreux scientifiques appartenant à des universités et des astronomes-amateurs intéressés par les mystères du ciel, des chercheurs étudient le Soleil, et plus particulièrement son activité, son rayonnement et les variations de sa "constante". Ils appartiennent à trois des dix établissements scientifiques fédéraux placés sous l'autorité du Ministre de la Recherche scientifique. Ces trois établissements sont : l'Observatoire Royal de Belgique (ORB), l'Institut Royal Météorologique (IRM) et l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB).

Les Belges scrutent le **Soleil**

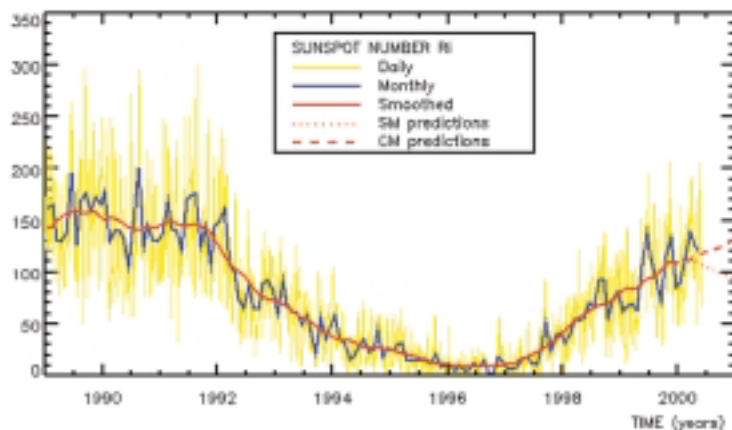
A l'Observatoire Royal de Belgique

La physique solaire est pratiquée depuis plus d'un siècle à l'ORB. A cette époque, il s'agissait d'observations visuelles des taches sur le disque solaire et, à la fin du siècle, le spectre du Soleil fut observé et des atlas en furent publiés. Aujourd'hui, le département de radioastronomie et de physique solaire, dirigé par Pierre Cugnon, a pour mission

l'observation optique du Soleil (principalement lors des éclipses totales), la radioastronomie (à la station de Humain) et dans l'ultraviolet extrême (téléscope EIT qui est monté sur SOHO), de la couronne solaire et la modélisation de celle-ci. Il réalise également l'observation visuelle de la photosphère (dessins des taches solaires et facules) et de la chromosphère.

Afin de continuer le travail entrepris par l'Observatoire de Zürich lorsque celui-ci décida de cesser le calcul et la diffusion du nombre de Wolff, l'établissement belge créa en 1981 le *Sunspot Index Data Center* (SIDC). Depuis cette date, ce centre a assuré sous la direction de A. Koeckelenbergh d'abord, de P. Cugnon aujourd'hui, la délicate mission du calcul et de la diffusion du nombre de Wolff international journalier, mensuel et mensuel lissé, avec des prévisions à moyen terme (jusqu'à 12 mois) avec

↳ Le "Sunspot Index Data Center", situé à l'Observatoire Royal de Belgique assure la diffusion régulière d'informations relatives à l'activité solaire. (ORB)



la plus grande régularité, le premier de chaque mois (*). Ces informations sont très importantes car elles touchent la sécurité des radiocommunications terrestres et spatiales ainsi qu'à l'interprétation des fluctuations du champ magnétique de notre planète. Ce travail est basé sur les observations effectuées dans un ensemble de stations qui couvrent toute la Terre avec cependant des irrégularités dans sa distribution. Il est marqué par une forte concentration en Europe, au Japon et en Amérique du Nord, l'hémisphère Sud étant malheureusement relativement peu représenté.

Le SIDC calcule également le *Prompt Photo-metric Sunspot Index* (PPSI), un indice basé sur les aires des groupes de taches et calculé à l'aide d'une formule mise au point en 1982 par Hudson, Silva, Woodard et Wilson et qui est une estimation du déficit affectant la constante solaire et dû aux taches présentes sur le disque. Pour réaliser ce calcul, les chercheurs utilisent les données d'aire d'une dizaine de stations.

L'ORB participe également, en collaboration étroite avec l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège, à l'analyse spectrale du rayonnement solaire. C'est la mesure de son intensité en fonction de sa longueur d'onde, à l'aide de spectromètres installés au sol (notamment à partir du Jungfraujoch, en Suisse) mais aussi en participant depuis près de quinze ans au programme *ATMOS* (pour *Atmospheric Trace MOlecule Spectroscopy*) réalisé par la Nasa et le Jet Propulsion Laboratory. Il est en effet clairement apparu que les observations spectrales devaient être effectuées au-dessus des couches les plus absorbantes de notre atmosphère et le site de l'observatoire suisse est idéal pour la physique solaire par suite de la transparence du ciel. L'expérience *ATMOS* qui a volé quatre fois à bord de la navette spatiale américaine en 1985, 1992, 1993 et 1994, consistait essentiellement à mesurer des spectres

solaires à différentes hauteurs afin de déterminer la variation avec l'altitude de la concentration de divers composés moléculaires. Le dépouillement de ces spectres a permis d'identifier un grand nombre de raies qui n'étaient pas encore connues en laboratoire ou qui étaient totalement masquées dans les spectres obtenus du sol.

(*) Adresse électronique des données du SIDC : <http://www.oma.be/KSB-ORB/SIDC/>

A l'Institut Royal Météorologique

Depuis plus d'un siècle les scientifiques essaient de déterminer la valeur de la constante solaire, c'est-à-dire le flux du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur Terre. Ce rayonnement qui varie avec l'activité solaire et à plus long terme avec l'évolution du Soleil, provient essentiellement de la photosphère solaire. Il traverse donc successivement l'atmosphère solaire, l'espace interplanétaire et l'atmosphère terrestre pour finalement atteindre de manière atténuée la surface terrestre.

La première raison de vouloir mesurer cette constante est évidemment l'amélioration de la connaissance de la physique solaire, la seconde (et qui justifie l'intérêt de l'IRM) concerne le besoin de connaître ses variations à courte, moyenne et longue échéance dans le cadre des préoccupations actuelles relatives aux changements climatiques naturels. De plus, la connaissance précise de sa valeur procure aux expériences spatiales une source de rayonnement de référence pour l'étalonnage de certains instruments optiques.

L'histoire des mesures de la constante solaire à l'IRM a débuté avec l'installation de radiomètres au sol à Davos (Suisse), à bord de ballons et d'avions ensuite et enfin depuis l'espace avec le vol de *SOLCON I* (pour *SOLar CONstant*) à bord du module Spacelab 1 en novembre 1983 (STS-9). Cet instrument fut ensuite choisi par la Nasa pour faire partie de la charge utile de base du programme *ATLAS* (pour *Atmospheric Laboratory for Applications and Sciences*) qui aurait dû couvrir au moins un cycle solaire.

↓ Un des vols de *SOLCON II* a volé lors de la mission STS-95 de la navette spatiale. L'astronaute européen Pedro Duque faisait partie de cette mission. (NASA)



C'est ainsi que SOLCON II participa aux missions ATLAS 1 (24 mars 1992), ATLAS 2 (7 avril 1993) et ATLAS 3 (3 novembre 1994) avant que celles-ci ne furent arrêtées pour des raisons budgétaires.

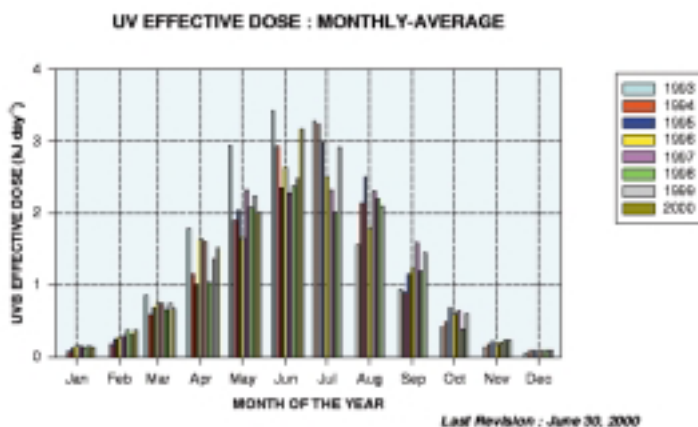
Au cours de la mission ATLAS 2, eut lieu la première comparaison radiométrique internationale spatiale de radiomètres absolus. En effet, du 31 juillet 1992 au 21 juin 1993, la plate-forme européenne Eureka emporta le dispositif SOLVA composé de deux types différents de radiomètres absolus qui ont permis de mesurer l'éclairement énergétique total avec une grande précision. En outre, les observations réalisées par divers satellites lancés à cette époque sont venus compléter les mesures de SOLCON II et de SOLVA. L'idée d'établir ainsi une "Référence Radiométrique Spatiale Absolue" qui permet d'assurer la continuité des observations de la constante spatiale revient à D. Crommelynck et sa conclusion suggère que la variation de base du cycle de onze ans sur lequel se superpose l'activité solaire n'est pas sinusoïdal mais présente l'allure d'une forme d'onde qui décroît du maximum au minimum, plus lentement que sa croissance qui du minimum au maximum est plus rapide.

A bord du satellite européen SOHO se trouve, dans le cadre de l'expérience VIRGO, un radiomètre du type SOLCON (amélioré) et qui a pris cette fois le nom de *DIARAD* (pour

Differential Absolute RADIometer). L'instrument continue à envoyer très régulièrement ses observations, et comme la réputation des appareils développés par l'Institut Royal Météorologique n'est plus à faire auprès des Américains, la Nasa a offert quatre vols gratuits de Solcon II à bord d'une navette spatiale dans le cadre de l'expérience *Hitchhiker*. Deux de ceux-ci ont déjà été effectués: le 8 août 1997 (STS-85) pendant onze jours et le 29 octobre 1998 (STS-95) pendant dix jours.

Enfin, l'expérience *Picard* montée sur un microsatellite français est actuellement en préparation à l'IRM. Du nom de l'astronome français de Louis XIV qui le premier a mesuré le diamètre du Soleil à une période où l'activité solaire était faible et à laquelle les climatologues associent généralement le "mini-âge glaciaire". Elle est prévue pour 2003. Le but de cette expérience est de corréliser les variations du flux énergétique du Soleil avec son diamètre durant la période descendante de son cycle. Comme il existe une série de mesures du diamètre du Soleil beaucoup plus longue que de la constante solaire (qui a débuté à la fin des années 70), il serait intéressant de voir s'il existe une relation entre les variations de celle-ci et celle du climat.

↳ Doses de rayonnements UV reçues par la peau humaine à Uccle (Bruxelles). (IASB)



A l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

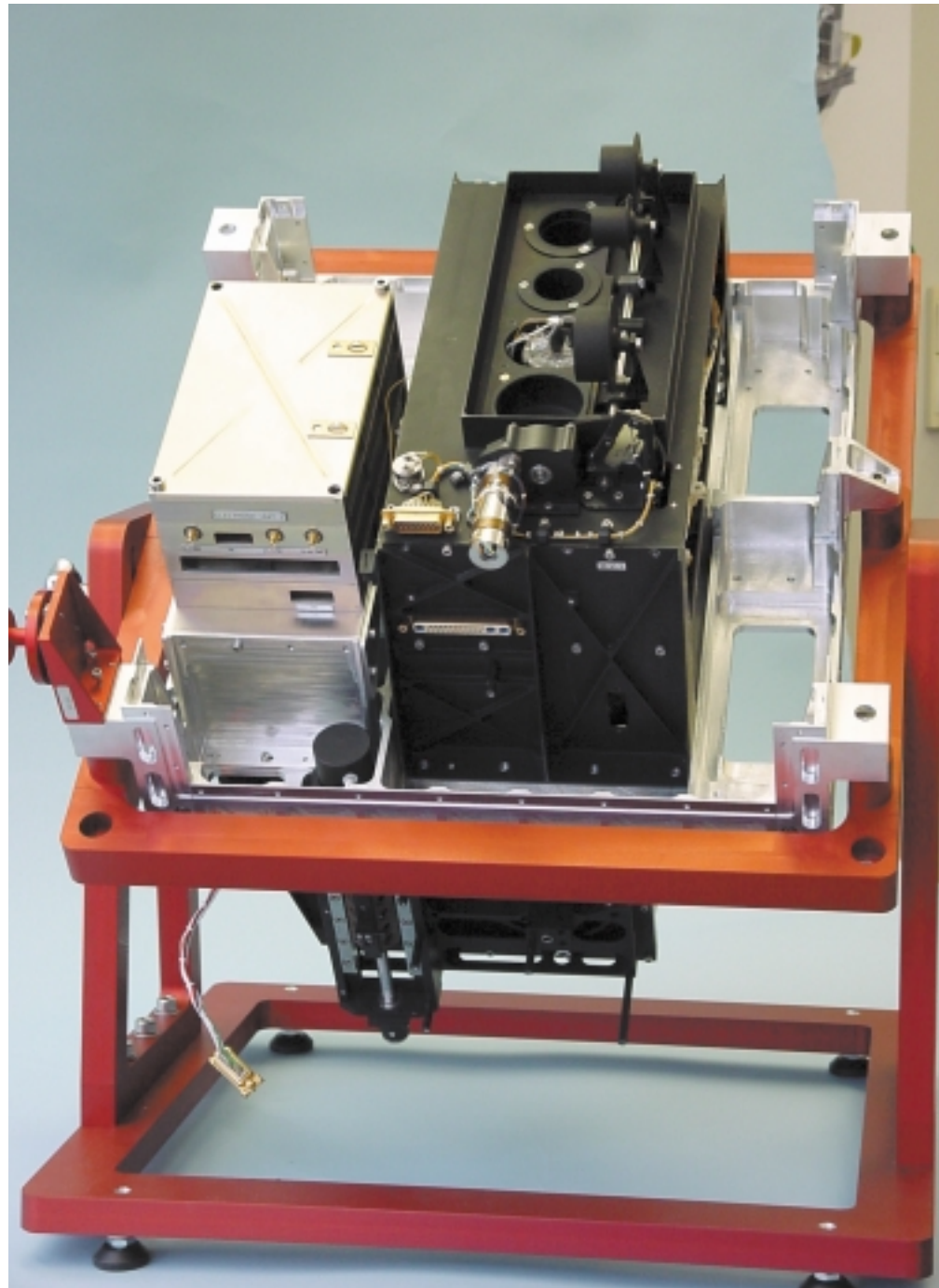
Créé en 1964, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) s'est notamment vu confier la tâche d'acquérir, d'interpréter et de stocker les données aéronomiques obtenues grâce à des mesures effectuées au sol ou acquises lors d'expériences spatiales effectuées à l'aide de ballons, de fusées et de satellites. Cette mission implique que l'IASB développe (ou participe au développement) des techniques instrumentales indispensables à ces expériences, une activité scientifique qui se divise notamment entre la mesure du rayonnement ultraviolet au sol et la mise au point d'un instrument baptisé *SOLSPEC* (pour *SOLar*

SPECTrometer) qui enregistre l'énergie rayonnée par le Soleil dans sa répartition spectrale de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Tout a commencé à la fin des années 80 lorsque les premiers résultats significatifs sur la décroissance de l'ozone stratosphérique dans l'hémisphère nord et aux latitudes hautes et moyennes, ont fait prendre conscience aux scientifiques de l'importance de la pénétration du rayonnement ultraviolet extrêmement énergétique UV-B et de son rôle dans toute une série de méfaits sur la santé (mélanomes), l'agriculture et la résistance des matériaux. C'est ainsi qu'en 1989 fut créé un réseau européen de stations de mesure des UV-A, UV-B et du rayonnement visible, réseau dans lequel la station installée à Uccle joue un rôle très important et qui a permis de mettre au point des modèles mathématiques fiables (sauf en ce qui concerne la couverture nuageuse) pour la représentation de la pénétration du rayonnement solaire.

En collaboration avec le Centre National français de la Recherche Scientifique et des centres de recherche allemands, l'IASB a également développé SOLSPEC, un instrument susceptible de mesurer le spectre solaire absolu, longueur d'onde par longueur d'onde, depuis l'ultraviolet jusqu'au proche infrarouge. Après avoir volé pendant une semaine en 1983 sur Spacelab-1, cet instrument (amélioré) a fait partie des expériences Atlas 1, 2 et 3 et fut également placé sur la plate-forme européenne Eureka en 1992/1993.

Aujourd'hui, l'IASB travaille à la mise au point d'un nouveau spectromètre (toujours sous le nom de Solspec) destiné cette fois à être monté sur un des éléments de la future Station Spatiale Internationale vers la fin de 2003 et au développement, en collaboration avec des chercheurs japonais, d'un dosimètre individuel pour pourrait faire des mesures directes en terme d'action des UV-B sur la peau.



↑ Spectromètre "SOLSPEC" mis au point par l'IASB pour enregistrer l'énergie rayonné par le Soleil dans sa répartition spectrale de l'ultraviolet à l'infrarouge. (Photo IASB)

Observatoire Royal de Belgique

avenue Circulaire 3,
B-1180 Bruxelles
tél : 32(2)/373.02.11
fax : 32(2)/374.98.22
<http://www.oma.be/KSB-ORB/>

Institut Royal Météorologique de Belgique

avenue Circulaire 3,
B-1180 Bruxelles
tél : 32(2)/373.06.11
fax : 32(2)/375.12.59
<http://www.meteo.oma.be/IRM-KMI/>

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

avenue Circulaire 3,
B-1180 Bruxelles
tél : 32(2)/373.04.04
fax : 32(2)/375.93.36
<http://www.oma.be/BIRA-IASB/>

Actualités belges

Le concours EDUPROBA

Le satellite belge **PROBA** effectuera des

PROBA (Projet for On-Board Autonomy) est un satellite belge qui sera lancé début 2001 par une fusée indienne PLSV. PROBA sera contrôlé par la station de poursuite de l'ESA de Redu et sera placé à 820 km d'altitude sur une orbite polaire héliosynchrone. Trois mois après le lancement, PROBA sera transféré à l'ESA. Son espérance de vie est de trois ans.

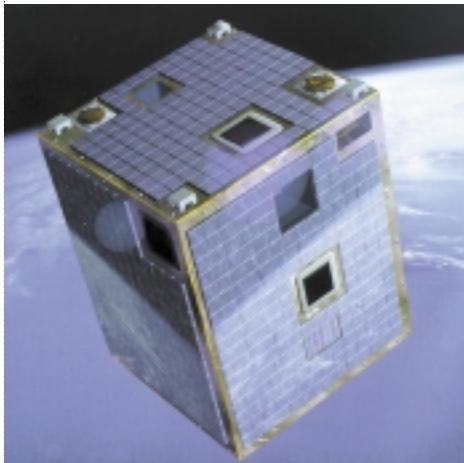
PROBA est un satellite d'observation (800mm X 600mm X 600mm) commandé par l'ESA, pesant 100 kilos et développé par la firme Verhaert. C'est la première fois qu'une firme belge obtient la direction d'un projet, à partir de sa phase conceptuelle jusqu'à son développement final. PROBA fonctionnera de façon autonome avec l'intervention minimale de la station de poursuite. L'utilisateur aura accès aux fonctionnalités du satellite via Internet.

D'autres firmes belges sont également impliquées dans le projet : Spacebel pour les logiciels, SAS pour les opérations de contrôle au sol.

Le concours Eduproba

L'Euro Space Foundation organise ce concours pour toutes les écoles belges du niveau secondaire. Verhaert met à disposition son satellite PROBA.

Le satellite PROBA (Verhaert).



Le but de ce concours est de développer une idée originale pour l'utilisation de PROBA en suscitant l'intérêt des jeunes pour l'exploration de l'espace et en faisant appel aux sciences modernes et à la technologie. Les professeurs et les élèves intéressés peuvent s'associer (géographie, biologie, physique, informatique, chimie, langues, technologie, arts plastiques, mathématiques, etc.). De plus, certains aspects du satellite peuvent être abordés dans d'autres cours. La conquête de l'espace est donc un exemple de multidisciplinarité.

Les projets et le bulletin d'inscription doivent être envoyés, par e-mail, au coordinateur du concours Pierre-Emmanuel Paulis (pepaulis@euospace.zzn.com) pour le 30 novembre 2000.

Un jury désignera 20 classes belges qui seront invitées en février 2001 à une Classe de l'Espace Eduproba de trois jours à l'Euro Space Center de Transinne. Lors de ces classes, des ingénieurs de Verhaert et l'équipe éducative de l'Euro Space Foundation informeront les élèves sur le satellite PROBA.

Enfin, après le lancement de PROBA, les classes gagnantes se verront offrir un accès direct au satellite via Internet pour réaliser leur projet. Les critères d'évaluation sont basés sur la créativité, la valeur éducative et la praticabilité technique du projet.

C'est avec l'appui des Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles (SSTC, éditeurs du Space Connection), du ministre de la Recherche et des Technologies

nouvelles de la Région wallonne, du ministre en charge de la Politique Scientifique de la Communauté flamande et de leurs administrations, ainsi que de l'ESA et de Verhaert, que ce concours peut être organisé.

Quelles expériences peut-on envisager avec les instruments de PROBA ?

PROBA contient trois instruments utilisables par les écoles : deux caméras, des détecteurs de radiation et un instrument pour répertorier les impacts sur le satellite.

Les caméras pourront photographier n'importe quel point sur Terre. La résolution de la caméra est de 25 et 10 mètres (chaque point sur la photo représente un point d'une longueur et largeur de 25 ou de 10 mètres).

La caméra à haute résolution HRC serait également capable de photographier des corps célestes, des étoiles, des comètes et même d'autres satellites. Elle enregistre en une fois une image bi-dimensionnelle. L'autre caméra, CHRIS, est une sorte de scanner qui enregistre l'image ligne par ligne. Grâce à la rotation du satellite, on peut faire défiler les lignes qui seront assemblées ultérieurement pour constituer l'image finale.

De ce fait, il est difficile de photographier des objets non terrestres avec ces deux caméras, car le mouvement de rotation du satellite est fonction de la rotation de notre planète. Etant donné qu'il faudra introduire les coordonnées du lieu à observer en longitude et latitude (éventuellement aussi la hauteur au-dessus du niveau de la mer), l'aide d'un opérateur s'avérera indispensable pour effectuer des manoeuvres si vous désirez observer un objet extra-terrestre. Il est évident que malgré la complexité de cette manoeuvre, cette possibilité ne pourra pas être exclue...

Actualités belges

projets d'écoles

L'instrument de mesure de la radioactivité (SREM) servira principalement à mesurer la radiation à laquelle PROBA est soumis. En période de forte activité solaire, le champ magnétique terrestre est perturbé par l'action du vent solaire, l'électronique à bord des satellites fonctionne mal à cause de ce phénomène et l'ESA tient à étudier ce problème.

Le dernier instrument, DEBIE, tentera de répertorier le nombre de collisions avec des particules et les impacts sur PROBA afin de mieux connaître l'environnement spatial dans lequel le satellite devra séjourner ...

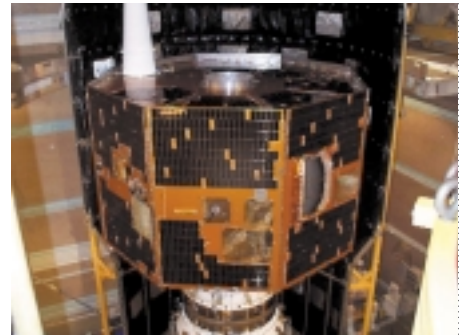
Exemple d'un programme de recherche ...

En application du cours de biologie, les élèves reçoivent comme tâche d'identifier deux régions ou terrains dont la plantation est différente (= différents dessins de couleurs), par exemple un bois et un champ de blé. Les longitude et latitude de ces zones pourront être calculées durant le cours de géographie et elles seront finalement transmises au satellite. Ceci s'effectue via Internet, un aspect qui pourra être développé dans le cadre du cours d'informatique. Enfin, les photos pourront être analysées lors du cours de physique. Les différences de couleurs apparentes sur les photographies indiquent une différence de plantation et un filtre couleur permet de mieux constater cette différence. On pourra éventuellement approfondir la notion de spectre ainsi que les caractéristiques de la caméra. En plus, l'étude des langues s'en verra certainement favorisée par l'échange de missions et/ou de photographies avec des écoles néerlandophones ou étrangères.

L'ESA prendra la décision finale quant à savoir quels projets seront retenus. Il va de soi que la réalisation technique du projet est importante mais l'aspect créatif et éducatif de celui-ci déterminera sans aucun doute le choix.

Importante participation belge au satellite américain *Image*

Le 25 mars, le satellite de la NASA *Image* (*Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration*) a été lancé depuis la base de Vandenberg. Le satellite doit observer les *auroras boréales* pendant deux ans au moins. La participation de notre pays au projet est substantielle. Huit instruments scientifiques voyagent à bord d'*Image*, parmi lesquels le spectrograph imager du Centre Spatial de Liège (CSL) et le LPAP, le Laboratoire de Physique Atmosphérique et Planétaire de l'Université de Liège. Cet instrument a été conçu en étroite coopération avec l'University of California. Il constitue une primeur: pour la première fois, il permet de visualiser l'aurore boréale dans l'ultraviolet lointain et d'observer la "tempête" entre électrons et protons provenant du Soleil, et les atomes composant l'atmosphère terrestre. Ce phénomène est fréquemment accompagné de tempêtes magnétiques dans la foulée des éruptions solaires. Elles peuvent perturber l'approvisionnement énergétique sur Terre et constituent également un danger pour les astronautes en orbite autour de la Terre. *Image* est la première des fameuses missions *Medium-class Explorer* (*MIDEX*) de la NASA. L'orbite du satellite sera

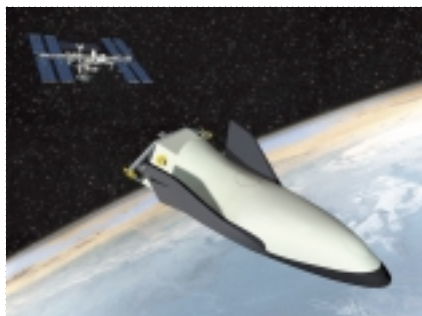


régulièrement corrigée au cours des deux prochaines années, afin de pouvoir dresser une carte tridimensionnelle de la *magnétosphère* terrestre et de la manière dont elle réagit aux changements du vent solaire, ces flux de particules électriquement chargées, projetées continuellement dans l'espace depuis le Soleil. Les experts sont surtout intéressés par le mode d'accélération des particules dans le vent solaire, les faisant débouler dans l'atmosphère terrestre où elles provoquent des aurores boréales. Ce sont les *Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles* (SSTC) qui ont libéré les moyens financiers nécessaires à la participation de la Belgique à ce projet captivant.

L'ESA et l'Union européenne ouvrent ensemble un *bureau Galileo* à Bruxelles

"Une nouvelle étape dans l'un des programmes spatiaux européens les plus prometteurs", voilà comment le directeur général de l'ESA, Antonio Rodotà, a qualifié l'ouverture du bureau de l'ESA et de l'Union européenne pour le programme Galileo à Bruxelles. Le bureau sera chargé de la coordination de la recherche actuelle, de la préparation politique et des activités d'appui technique, notamment pour les équipes industrielles parties prenantes à Galileo. Galileo deviendra un système européen, incluant des satellites de navigation, de positionnement et de mesure du temps sur Terre. L'Union européenne et l'ESA ont décidé la mise au point du système il y a un an à peine. Selon l'ESA, les nouvelles technologies Galileo vont révolutionner les transports et la sécurité et en accroître l'efficacité. Conséquences : une meilleure qualité de vie, une pollution réduite dans les villes, de meilleures récoltes, de meilleures informations pour les services de secours, davantage de sécurité en mer ...

Actualités belges



Le Crew Return Vehicle (ESA)

Frank De Winne impliqué dans le **Crew Return Vehicle**

Depuis janvier, le nouveau candidat astronaute belge *Frank De Winne* a rejoint l'équipe du projet X-38 alias *Crew Return Vehicle (CRV)* grâce auquel, en cas d'urgence, les astronautes de l'*International Space Station (ISS)* pourront être évacués. Il participe à la mise au point des displays pour le pilote et des sièges pour l'équipage. Pour l'ESA, il s'agit de nouvelles technologies. Les displays doivent être très conviviaux et surtout en cas d'urgence. Ces deux activités reposent sur la grande expérience acquise par De Winne en tant que pilote d'essai.

(cf. bulletin info de l'ESA On Station de mars 2000)

La Belgique demeure un important **contributeur** de l'ESA

Avec 2707,6 millions d'euros (près de 109 milliards de francs), le budget de l'ESA reste relativement stable par rapport à 1999. Ce montant inclut les contributions des Etats membres (2158,3 millions d'euros), complétées par d'autres recettes (549,3 millions d'euros). Comparé à 1999, la participation belge est passée de 5,3% à 5,1%, mais avec un total de 110,5 millions d'euros (près de 4,5 milliards de francs), parmi les petits Etats membres de l'ESA, notre pays reste le plus gros contributeur. Ce montant inclut 16,9 millions d'euros pour la participation au programme scientifique obligatoire. Notre pays est à la pointe de la recherche spatiale européenne et grâce à cette importante participation, a la chance unique de démontrer son savoir-faire dans les domaines de la technologie et de la recherche. Seuls les grands Etats membres de l'ESA, la France (29,4% du budget de l'ESA), l'Allemagne (25,7%), l'Italie (14%) et la Grande-Bretagne (7,4%) nous devancent. Plus de la moitié du budget est absorbée par des programmes de lanceurs

(529,5 millions d'euros), de missions habitées (486,7 millions d'euros) et d'observation de la Terre (491,0 euros). Le programme scientifique représente 357,6 millions d'euros. 2000 est pour l'ESA une année relativement importante, avec les premières observations du satellite à rayons X XMM (février), le lancement de quatre satellites Cluster 2 par les fusées russes Soyouz (juillet et août), le lancement du premier satellite Meteosat de la deuxième génération (octobre) et la première visite d'un astronaute européen, l'Italien Umberto Guidoni, à l'International Space Station plus tard cette année. La conférence des ministres de Londres de 2001 doit également être préparée. Une stratégie spatiale européenne devra être élaborée à cette occasion. L'ESA devra examiner comment étendre l'organisation à de nouveaux membres d'Europe centrale et orientale comme la Hongrie, la Pologne, la République tchèque et la Roumanie, prêtes à adhérer. Une adhésion de la Russie n'est pas actuellement à l'ordre du jour.

Logiciel belge pour l'ESA

Ubizen Aethis de Louvain-la-Neuve, qui développe des logiciels de soutien aux réseaux, a conclu un contrat de 10 millions de francs avec l'ESA. L'ESA souhaite que le réseau Opsnet de l'ESOC à Darmstadt, responsable des communications avec les vaisseaux spatiaux, puisse être consulté à partir d'autres lieux, comme par exemple son domicile, via Internet. Tout cela doit bien entendu être sécurisé pour éviter les bidouillages des hackers. Aethis, récemment devenu Ubizen Aethis, va d'abord réaliser une version pilote et la tester sur un réseau fictif avant d'installer son logiciel sur Opsnet. Aethis a été créé par trois anciens étudiants de l'UCL, de la KUL et de l'ULB. L'entreprise a déjà travaillé pour différents départements de l'ESA.

Végétation opérationnel depuis plus d'un an

L'instrument Végétation, à bord du satellite français Spot 4 lancé en 1998 est depuis deux ans dans l'espace et opérationnel depuis plus d'un an. Végétation observe pratiquement quotidiennement, avec une résolution d'un kilomètre, la totalité du globe terrestre et contribue aux prévisions agricoles et à la prévention des famines. Il est nettement plus précis que d'autres instruments similaires lancés précédemment. Non seulement il observe les végétaux dans la lumière visible et l'infrarouge, mais il détecte en outre, depuis l'espace, les incendies de forêts, l'eau dans les zones arides et les nuages de sauterelles. Végétation a été financé par l'Union européenne, la Belgique, la France, la Suède et l'Italie. Du 3 au 6 avril, un colloque international a été consacré à son utilisation. Les images de Végétation peuvent être obtenues par l'intermédiaire d'un réseau de distributeurs commerciaux. La Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) à Mol a déjà fourni plus de 20.000 produits Végétation à des utilisateurs finaux. Le programme Végétation 2 a été adopté récemment, garantissant un accès aux images archivées jusqu'en 2008 et au-delà.

La politique des *droits intellectuels* dans l'Europe spatiale

L'Agence spatiale européenne (ESA) a entamé depuis peu une réflexion de fond sur sa politique en matière de droits intellectuels. Il s'agit surtout de remettre en question certains aspects du système contractuel qui la lie à ses partenaires industriels.

On ne s'étendra pas ici sur la description du régime de la propriété intellectuelle à l'ESA: celui-ci est relativement complexe et spécifique. Disons tout de même qu'il tend à développer un patrimoine technologique commun au sein duquel les États membres, y compris leurs chercheurs et industriels, peuvent puiser, dans le cadre de leurs contrats avec l'Agence. C'est la règle du *co-financement*.

En réalité, les inventions et données produites dans le cadre de ces contrats sont la propriété du cocontractant de l'ESA mais celle-ci se réserve les droits d'accès, d'utilisation et de communication, tant à son bénéfice qu'à celui des États membres et de leurs nationaux.

Un tel système cadre relativement bien avec l'esprit de la Convention ESA: la mise en commun de ressources permettant de financer des programmes et des activités dont les fruits sont logiquement partagés entre tous.

Cependant, si la recherche spatiale, mission dont l'Agence est investie, a effectivement vocation à faire profiter le plus grand nombre des découvertes et de la science, le secteur industriel, lui, a sa propre logique. Sans compter l'évolution exponentielle de la technologie spatiale et les profondes modifications du paysage industriel dans ce domaine, il apparaît de plus en

plus que les techniques et leurs débouchés sont avant tout des produits commerciaux. Les droits de propriété intellectuelle y relatifs sont dès lors considérés par l'industrie comme "des armes commerciales"...

Le développement industriel n'est pas à proprement parler une mission de l'ESA. Pas au sens de sa Convention, en tout cas. Néanmoins, une importance de premier ordre doit être attachée à la considération des entreprises et de leurs besoins. Ceci, non pas parce que l'industrie et le commerce sont des objectifs de l'Agence, mais bien parce qu'ils ont été, sont et seront plus que jamais des moyens de mener sa mission à bonnes fins.

Prenons un exemple. Construire un satellite destiné à l'étude du Soleil requiert une ingénierie de haute technologie. L'ESA pourra pour cela s'adresser à des fournisseurs européens très divers: certains seront des filiales de grands groupes, d'autres seront de petites entreprises employant quelques personnes. De nouvelles techniques seront développées et testées à cette occasion, un savoir-faire sera créé, une expérience générée... Les données récoltées en vol par le satellite seront, elles, analysées par les scientifiques, mises à disposition des chercheurs, vulgarisées et publiées. Mais qu'en est-il des "petits" four-

nisseurs ? Leur principale valeur ajoutée consiste précisément en de la haute technologie (une idée, un composant, un logiciel de pointe,...); ils n'ont ni les moyens, ni l'objectif de fabriquer à grande échelle des produits basés sur les inventions développées dans le cadre de leur contrat. Voir leur technologie, même financée en (majeure) partie par l'ESA, étalée au grand jour et utilisée librement par le reste de l'industrie européenne (notamment par des grands groupes) ne correspond assurément pas à leur intérêt.

C'est pourquoi une commune mesure doit être trouvée entre, d'une part, l'intérêt de l'Agence spatiale européenne de pouvoir utiliser les droits intellectuels développés dans le cadre du co-financement et, d'autre part, l'intérêt des industriels de se voir reconnaître l'exclusivité de droits pleins et entiers sur les technologies qu'ils ont produites. La réflexion en est à ce point...

Si le régime des droits intellectuels au sein de l'ESA n'est pas toujours simple, les règles de financement public et de concurrence de l'Union européenne sont loin d'être plus accessibles. La propriété intellectuelle est régie par le droit communautaire européen dans la mesure où elle intervient dans le fonctionnement économique du marché européen. Le régime de l'ESA et celui de l'Union sont plus ou moins compatibles si l'on tient compte du fait que le droit communautaire s'est, jusqu'à présent, surtout intéressé aux restrictions que les droits de propriétés intellectuelles pouvaient causer aux

exportations entre pays membres (ce qui n'est pas le cas du régime ESA), ainsi que de la nature spécifique de la propriété industrielle spatiale, développée principalement dans le cadre d'accords de coopération en matière de recherche et développement. Ceux-ci font l'objet de dispositions spécifiques (Règlements communautaires) en droit européen.

Toutefois, l'ESA et l'UE sont des organisations internationales souveraines et indépendantes. Le respect mutuel des normes de chacune est de rigueur.

Les Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles (SSTC) prennent une part très active dans la réflexion sur les droits intellectuels et pour cause: l'industrie spatiale belge est un fournisseur important de l'Agence spatiale européenne en technologie de pointe. L'intérêt de nombreuses PME belges est concerné.

Les SSTC organisent un Forum le 29 septembre, sur ce thème. Comment l'ESA et l'industrie peuvent-elles mieux répondre l'une à l'autre ? Comment la politique de l'Agence spatiale en matière de droits intellectuels peut-elle s'intégrer à la stratégie de l'ESA, particulièrement dans le cadre des nouveaux partenariats publics/privés, mais aussi et finalement, à la nouvelle stratégie spatiale européenne ?

Pour toute information complémentaire, contactez: Jean-François MAYENCE, Conseiller juridique et Chargé de mission, SSTC-Service de recherche et applications spatiales
tél.: 02 238 35 17
e-mail: maye@belspo.be

Actualités internationales

Deux pour le prix d'un

L'ESA a sélectionné six projets scientifiques parmi 49 propositions et deux seront retenus comme nouvelles missions-flexi, ne pouvant pas dépasser 176 millions d'euros chacune.

Ces missions ont été introduites en 1997 et remplacent les anciens programmes à moyen terme comme la sonde *Huygens*, à bord de la sonde américaine *Cassini* et le satellite d'astronomie gamma, *Integral*. Grâce aux missions flexi, deux projets peuvent être réalisés pour le prix d'un projet à moyen terme. La sonde Mars Express qui partira en 2003 vers la planète rouge est le premier programme flexi. Les six propositions sont les suivantes :

1. Une participation européenne au **New Generation Space Telescope** (succédant en 2008 à Hubble ; il sera probablement approuvé).
2. **Storms** est un projet pour trois satellites analysant à 50.000 km au-dessus de l'équateur, les perturbations magnétiques après de violentes éruptions sur le Soleil.
3. Le **Solar Orbiter** volerait sur une orbite étirée autour du Soleil et s'en rapprocherait jusqu'à 30 millions de km (bien plus près que Mercure qui est la plus proche du Soleil et cinq fois plus près que la distance de la Terre au Soleil). Lors de ces approches, la sonde tournerait aussi vite autour du Soleil que le Soleil autour d'elle et resterait dès lors "suspendue" un moment au-dessus de la même région solaire. Solar Orbiter devrait fournir des images exceptionnelles du Soleil. Au fil du temps, son orbite devrait former un angle toujours plus grand avec l'équateur solaire.
4. Le projet **Master** prévoit une sonde Mars Express adaptée. Master passerait au large de Mars et rendrait visite à un ou plusieurs planètes de la ceinture de planètes entre Mars et Jupiter. Master pourrait emporter un atterrisseur martien. Master étudierait les

planétaires avec des instruments mis au point pour la sonde Rosetta de l'ESA et la sonde lunaire Smart 1. En fonction de la destination, le lancement interviendrait en 2005, 2007 ou 2009.

5. **Hyper** doit tester de nouveaux gyroscopes atomiques et des détecteurs de mouvements d'une précision inégalée. Tout cela est lié à l'effet quantique à la suite duquel même des atomes entiers se comportent comme des ondes plutôt que comme des particules. Les chercheurs estiment que les senseurs sont aussi révolutionnaires que les horloges atomiques pour la mesure du temps. Un gyroscope atomique serait 100 milliards de fois plus précis que les actuels gyroscopes optiques. **Casimir** est un second projet scientifique concernant la physique fondamentale. Il y a un demi siècle, le physicien hollandais Hendrik Casimir supputait qu'une force exceptionnelle devait pouvoir être mesurée entre deux plaques métalliques. Casimir mesurera cette force dans l'espace entre des surfaces à haute supraconductivité distantes d'un centième de millimètre avec une précision un million de fois supérieure à celle d'une mesure effectuée au sol. Cette expérience s'inscrit dans la théorie quantique selon laquelle un vide parfait ne l'est jamais, mais est agité par des particules et des forces très éphémères. A court terme, un choix sera fait entre Hyper et Casimir.

6. **Eddington** enfin est un projet astronomique. Depuis l'espace, grâce à un télescope d'un mètre de diamètre, le satellite observerait les vibrations des étoiles et chercherait des planètes. Les vibrations, provenant d'ondes sonores, peuvent apporter des informations sur l'intérieur des étoiles. Eddington observerait pas moins de 50.000 étoiles et se lancerait à la recherche de planètes à proximité de 700.000 étoiles. Cette présence se manifeste par une diminution de l'intensité lumineuse de l'étoile au passage d'une planète.

<http://sci.esa.int> (page scientifique de l'ESA)

Mesures de l'ozone à long terme dans l'atmosphère

Trois nouveaux instruments européens garantissent la prise de mesures permanentes de l'ozone dans notre atmosphère jusqu'à la fin de la décennie. Les instruments **GOME 2** (*Global Ozone Monitoring Experiment*) succèdent à GOME 1 à bord du satellite européen d'observation de la Terre ERS 2. GOME 2 s'inscrit dans le **Polar System** d'Eumetsat, exploitant du système Météosat de satellites météorologiques. Ce système comporte trois nouveaux satellites **Metop** et un segment terrestre pour l'envoi des missions au satellite et le traitement des données. Le premier satellite Metop partira à la mi-2003. Le **Polar System** d'Eumetsat et le programme Metop 1 de l'ESA constituent une coopération entre les deux organisations et doivent fournir des données météorologiques opérationnelles à partir des satellites en orbite polaire autour de la Terre. Les deux opérations font partie intégrante d'un système international de satellites polaires, exploités conjointement avec les Etats-Unis.

Schéma des trajectoires consécutives d'un satellite Metop de la Polar System d'Eumetsat. (Eumetsat)



Actualités internationales



Un aperçu différent de la Terre vue de l'espace. L'aérospatial procure aux jeunes une connaissance de base qui constitue un élément essentiel de leur formation. (NASA Goddard Laboratory for Atmospheres).

La recherche spatiale et l'*enseignement*

L'enseignement suit de près les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Au début de l'année, le programme **Espresso for Schools** a décroché le prix de l'innovation lors d'un des plus importants salons de l'enseignement au Royaume-Uni. Espresso a été développé dans le cadre du programme multimédia Artes 3 de l'ESA qui inclut pour l'instant 14 programmes. Espresso rassemble de nombreux services multimédia pouvant être utilisés pour l'enseignement des langues, des sciences et des mathématiques. Espresso comprend également des bulletins d'informations, un guide des programmes éducatifs télévisés et de sites Internet intéressants pour les écoles. L'ensemble est mis à disposition par satellite une fois par semaine et stocké pour pouvoir être consulté off-line. Après une phase d'essais dans 50 écoles primaires, Espresso est à présent commercialisé au Royaume-Uni et d'autres pays suivront.

<http://www.espresso.co.uk/>
<http://www.estec.esa.nl/artes3/index.html>

Les 3 et 4 avril s'est déroulé à Bischoffsheim (France), le symposium **Space and Education**. Il était organisé par l'*International Astronomical Federation (IAF)* en coopération avec les agences spatiales européenne et française, l'ESA et le CNES et l'*International Space University (ISU)*. Des représentants du secteur astronautique y ont rencontré enseignants, élèves et étudiants. Quels sont les besoins des élèves et étudiants de l'enseignement primaire jusqu'au supérieur ? Comment l'enseignement peut-il suivre cette évolution accélérée ? "*Les applications spatiales jouent un rôle croissant dans notre existence et montrent la voie vers l'avenir*" affirme-t-on à l'ESA. "*Nous comprenons mieux le monde qui nous entoure et la recherche spatiale permet aux jeunes d'acquérir les connaissances de base, essentielles à leur formation*". En résumé : l'industrie et les organisations spatiales peuvent contribuer aux systèmes scolaires nationaux de plusieurs pays et encourager les jeunes à poursuivre sur cette voie. Space Connection 33 y consacra un dossier complet.

Un *vol spatial* chinois *habité* en 2000 ?

Après le premier vol d'essai inhabité du vaisseau spatial chinois *Shenzhou*, lancé le 19 novembre de l'année dernière depuis la base de *Jiuquan*, on ignore encore si d'autres missions inhabitées suivront et ou si, en 2000, la Chine deviendra après l'ancienne Union soviétique et les Etats-Unis, le troisième pays à envoyer des hommes dans l'espace. *Shenzhou* ressemble au vaisseau russe *Soyouz*. Il compte trois parties : un *module orbital* où les futurs astronautes chinois ou *taiconautes* pourront travailler, un *élément commande*, qui revient sur Terre, et un *module de service*. Mais à l'intérieur, les instruments de *Shenzhou* sont très différents et le vaisseau spatial a une allure moderne. Contrairement à *Soyouz*, le module orbital est plus grand et est de forme cylindrique. Même si tout le monde n'est pas impressionné par les performances techniques de *Project 921*, nom du programme spatial chinois habité, le vol de *Shenzhou* montre que la Chine est prête pour des missions spatiales habitées et capable dans une dizaine d'années de disposer d'une belle infrastructure spatiale, y compris d'une station spatiale.

Actualités internationales

Fin de règne ou *renaissance* commerciale pour Mir

S'il ne tenait qu'à l'entreprise hollandaise *MirCorp*, la station spatiale russe Mir connaîtrait un brillant avenir commercial. Dans le cadre d'une exploitation commerciale, des chercheurs pourraient y travailler ou des touristes pourraient admirer notre planète depuis la station. D'après *MirCorp*, la publicité depuis l'espace est également une option envisageable.

Après avoir été désertée pendant plus de sept mois, la station Mir

est à nouveau occupée par deux cosmonautes, pour une mission financée par *MirCorp*. *Sergei Zaliotine* et *Alexandre Kaleri* ont quitté la base de Baïkonour le 4 avril, à bord d'un vaisseau *Soyouz* et reviendront sur Terre en août. La réalisation des projets de *MirCorp*, soutenus par plusieurs investisseurs américains et dont l'entreprise spatiale *Energia* est le principal actionnaire, est loin d'être assurée. Si les ressources financières s'avèrent insuffisantes, il faudra

laisser la station se consumer dans l'espace en octobre.

Les Américains quant à eux sont assez sceptiques à propos d'un nouvel avenir pour Mir. Ils estiment que la station hypothèque l'engagement de la Russie à la construction de l'*International Space Station (ISS)*. Selon les Russes, la station serait en assez bon état. Mir a dépassé depuis longtemps sa durée de vie prévue et la station a souffert de problèmes d'énergie et d'ordinateur,

d'un incendie et d'une collision avec un vaisseau d'approvisionnement *Progress*, incident au cours duquel l'un des modules a été sérieusement endommagé. Mais *MirCorp* trouve "*Mir trop précieuse pour être jetée*". Les éventuels *touristes spatiaux* intéressés devront toutefois disposer d'une tirelire d'un milliard de francs. Le projet visant à envoyer l'acteur russe *Vladimir Steklov* avec l'actuel équipage a échoué, car ses patrons n'ont pas proposé une somme suffisante.

Hubble Space *Telescope* depuis dix ans dans l'espace

La nébuleuse du sablier vue par le Hubble Space Telescope (STScI).



Le *Hubble Space Telescope (HST)* s'est envolé dans l'espace à bord d'une navette spatiale il y a dix ans, après une longue et pénible phase de développement (le projet avait été adopté dès 1977). Ce programme américano-européen est l'un des projets astronautiques les plus ambitieux et les plus réussis de tous les temps. Grâce aux résultats du télescope, plus de 10.000 textes scientifiques ont déjà été publiés. Un quart d'entre eux est de la plume de scientifiques européens.

Au début, l'avenir semblait plus sombre. Après avoir constaté des *aberrations sphériques* dans le miroir principal du télescope, donnant des images de moins bonne qualité, lors d'un premier entretien, Hubble a reçu de nouvelles "lunettes", et les clichés spectaculaires ont alors pu commencer. En juillet 1996, Hubble a effectué son cent millièmes enregistrement. Au cours de la décennie écoulée, Hubble a reçu la visite d'astronautes à trois reprises pour répara-

tions et entretien. Des astronautes européens ont été deux fois de la partie. Deux missions d'entretien sont encore programmées pour 2001 et 2003. Les dix prochaines années, Hubble continuera sans aucun doute ses observations inédites. Une "coopération" est également prévue entre le HST et de grands télescopes terrestres. En échange de la participation européenne, les astronomes européens bénéficient d'au moins 15% du temps d'observation du HST. L'Europe a notamment fourni deux paires de panneaux solaires et la *Faint Object Camera (FOC)*. 15 scientifiques européens travaillent au *Space Telescope Science Institute (STScI)* de *Baltimore (USA)*. Le *New Generation Space Telescope (NGST)*, successeur du Hubble Space Telescope, devrait être lancé vers 2008. Là aussi, l'Europe souhaite collaborer avec les Américains. Elle est disposée à fournir une caméra, un spectromètre à infrarouge et un troisième instrument encore à déterminer, en échange de 15% du temps d'observation.

Actualités internationales

Rencontre avec *Eros* le jour de la Saint Valentin

Le 14 février dernier, un nouveau chapitre de l'histoire de l'astronautique a été écrit. Plusieurs sondes spatiales avaient déjà survolé des planétoïdes, mais un mois après NEAR Shoemaker rebaptisée au nom du célèbre géologue et chasseur de comètes *Eugene Shoemaker*, pour la première fois, la sonde *Near Earth Asteroid Rendezvous (NEAR)* est arrivée en orbite autour d'un planétoïde. Et quel autre planétoïde qu'*Eros* pouvait s'imposer le jour de la St-Valentin? NEAR Shoemaker a ensuite envoyé des images impressionnantes d'un corps céleste long de 33 km en forme

de pomme de terre et révélant notamment un cratère de cinq km.

NEAR avait été lancée le 17 février 1996 et aurait dû graviter autour d'*Eros* dès janvier 1999. Mais des problèmes de moteur l'ont retardée. Au cours des prochains mois, NEAR se rapprochera encore d'*Eros* et réalisera des clichés encore plus détaillés de ce

surprenant corps céleste. *Eros* est probablement le reste d'un corps céleste plus grand qui s'est disloqué. Les planétoïdes sont des corps célestes qui gravitent par milliers autour du Soleil, généralement entre les orbites des planètes Mars et Jupiter. Ils peuvent fournir de précieuses informations sur la naissance de notre système solaire.

↓ Eros photographiée par Near Shoemaker le 29 février à une distance de 289 km. La photo montre des détails de 30 m. (NASA)



Tests et intégration d'*Envisat*

Envisat pourra effectuer des mesures atmosphériques, océanographiques, terrestre et polaires avec une précision jamais atteinte avant. (ESA)

"Le moment tant attendu de l'intégration complète de notre satellite. Même les ingénieurs qui y ont travaillé des années sont impressionnés par la taille du satellite". Une déclaration concernant *Envisat*, le satellite de l'ESA, de 10 m de haut et pesant 8 tonnes, actuellement intégré et testé à l'ESTEC (European Space Research and Technology Centre) à Noordwijk (Pays-Bas). *Envisat* doit être opérationnel durant cinq ans minimum et observer, grâce à dix instruments scientifiques, l'effet de serre, les changements climatiques, la destruction de la couche d'ozone, la composition de l'atmosphère, les océans, les calottes glaciaires et la végétation terrestre. Grâce à un radar,

Envisat peut effectuer des clichés de grande qualité jour et nuit, quelles que soient les conditions météorologiques. ESTEC dispose d'installations capables de simuler toutes les situations, d'écart thermique importants dans l'espace (de -190°C à +90°C) aux terribles vibrations lors du lancement. Et l'espace crée de l'emploi : près de 100 spécialistes participent aux essais d'*Envisat*. En mars prochain, le satellite sera préparé pour être acheminé par avion vers la base de lancement de Kourou et lancé dans l'espace en juin 2001. *Envisat* gravitera autour de la Terre sur une orbite polaire à 800 km d'altitude et tous les 35 jours, survolera un même endroit de la Terre.

