

L'astronomie dans le monde

Hubble détecte de l'hélium primordial

Note d'information ESA Paris, le 7 juillet 1994

Une équipe internationale d'astronomes a pu, grâce à la caméra pour objets de faible luminosité (FOC) de l'Agence spatiale européenne, qui équipe le Télescope Spatial Hubble (HST), confirmer la prévision critique découlant de la théorie cosmologique du Big Bang selon laquelle l'hélium devait être largement répandu dans l'univers primitif.

L'observation de cet élément chimique par le HST pourrait correspondre à la découverte d'un plasma ténu remplissant les vastes espaces qui séparent les galaxies — le milieu intergalactique si longtemps recherché.

Cette découverte jette également une lumière nouvelle sur les conditions physiques qui régnaient dans l'espace intergalactique au moment où l'univers était dix fois plus jeune qu'aujourd'hui et où les quasars et galaxies venaient juste de se former.

Ce résultat est le fruit des travaux menés par une équipe d'astronomes européens sous la direction du Dr Peter Jakobsen, scientifique responsable du projet FOC de l'ESA. La FOC a servi de spectrographe pour analyser la lumière ultraviolette en provenance d'un quasar très éloigné.

Dans un article publié le 7 juillet par la revue scientifique britannique *Nature*, ces astronomes expliquent comment ils sont parvenus à détecter de l'hélium en étudiant le spectre lumineux d'un corps céleste éloigné, un quasar situé dans la constellation de la Baleine, à une distance telle que sa lumière a mis quelque 13 milliards d'années pour nous parvenir, ce qui équivaut à 90 % de l'âge de l'univers.

En mettant en évidence l'existence de quantités non négligeables d'hélium dans l'univers primitif alors que celui-ci était dix fois plus jeune qu'il ne l'est aujourd'hui, ces observations confirment la théorie expliquant la formation des éléments chimiques dans

l'univers. L'hydrogène et l'hélium se sont formés au cours des trois premières minutes qui ont suivi le Big Bang à la faveur de réactions entre les protons et neutrons primordiaux. Les éléments plus lourds (carbone, oxygène, silicium, fer, etc.) ne sont apparus que plus tard par l'intermédiaire des réactions nucléaires à l'œuvre au cœur des étoiles.

« C'est avec une grande satisfaction que nous voyons toutes nos prévisions théoriques aussi bien confortées » déclare le Dr Jakobsen. « D'une part, nous avons effectivement trouvé de l'hélium — comme la théorie du Big Bang le prévoyait, et d'autre part, nous avons constaté qu'il s'agissait d'hélium une fois ionisé — en parfait accord avec les conclusions auxquelles nous étions parvenus en ce qui concerne les conditions physiques qui régnaient dans l'univers à ses débuts ».

En étudiant les raies d'absorption des quasars, les astronomes en sont venus à soupçonner que les conditions physiques qui régnaient dans les premiers temps de l'univers étaient beaucoup plus rudes que celles que nous observons aujourd'hui dans le cosmos. Il semble en particulier que la matière intergalactique ait été fortement ionisée par un flot de rayons ultraviolets émis par les quasars et les jeunes galaxies.

Ces observations pourraient également nous aider à résoudre une énigme de longue date, celle du vide apparemment complet régnant dans les immensités séparant les galaxies et des nuages d'hydrogène primordial interposés (les nuages de la forêt de Lyman). Les observations faites avec la FOC font penser qu'en fin de compte l'espace intergalactique n'est peut-être pas vide mais rempli d'un plasma brûlant de très faible densité. Ce plasma aurait jusqu'ici échappé aux détecteurs étant donné que l'hydrogène qu'il contient est fortement ionisé, et donc invisible.

« La véritable surprise », explique le Dr Jakobsen, « c'est l'intensité des raies d'absorption de l'hélium détecté qui ne s'explique pas par la seule présence des nuages.

« Peut-être y a-t-il encore autre chose. L'une des possibilités les plus vraisemblables serait que l'absorption ait également lieu dans l'espace séparant les nuages. Si c'est le cas, nous avons découvert le milieu intergalactique si longtemps recherché ».

Le Dr Jakobsen insiste sur le fait que le plasma détecté est extrêmement peu dense et qu'il ne résout donc pas le problème de la « masse manquante » de l'univers. « Bien que l'absorption de l'hélium ne corresponde qu'à la partie visible de l'iceberg, il est probable que la quantité totale de matière intergalactique ne dépasse pas celle que nous savons exister au sein des galaxies ».

À la recherche de la matière primordiale

Avoir détecté l'hélium intergalactique primordial représente l'aboutissement d'une chasse au trésor entamée par les astronomes il y a dix ans et qui a demandé des investissements considérables en termes de temps d'observation du HST, tant avant qu'après les interventions techniques réussies dont il a fait l'objet en décembre 1993.

Les astronomes se sont servi d'un quasar très éloigné de forte intensité lumineuse comme d'un projecteur cosmique afin de sonder l'espace le séparant de la Terre. Cette technique permet de détecter des nuages gazeux éloignés — qui demeureraient sinon invisibles — par l'étude des caractéristiques des raies d'absorption présentes dans le spectre du quasar. De cette manière et en ayant recours aux très grands télescopes au sol ainsi qu'au HST, les astronomes ont ces dernières années passé au crible l'hydrogène présent dans l'univers jusqu'aux quasars les plus distants que nous connaissions.

Ces études ont révélé que l'espace intergalactique est parsemé de nuages d'hydrogène gazeux de très faible densité. « Étant donné que les observations ne montrent pas d'éléments lourds mais uniquement de l'hydrogène, nous pensons que les nuages dits de la « forêt de Lyman » se composent d'un reste de matière originelle issue du Big Bang », explique le Dr Jakobsen.

Il restait à prouver que les nuages contenaient également de l'hélium. La théorie du Big Bang prévoit en particulier que le quart

environ de toute la matière s'est transformé en hélium par fusion au moment où l'univers n'avait que trois minutes. C'est pourquoi « il fallait qu'il y ait de l'hélium sans quoi nous aurions été contraints de réviser certains de nos principes fondamentaux en matière de cosmologie », ajoute le Dr Jakobsen.

Le problème qui se pose au départ est que pour détecter de l'hélium situé à une grande distance, il faut un télescope fonctionnant dans l'ultraviolet. L'ion He^+ , forme la plus facilement mesurable de l'hélium intergalactique, se manifeste par une raie d'absorption dans l'extrême ultraviolet à une longueur d'onde de 30,4 nanomètres (1 nm = 1 milliardième de mètre). Cependant, en raison de l'expansion de l'univers et de l'effet Doppler, le rayonnement provenant des quasars lointains à l'étude parvient à Terre sur une longueur d'onde au moins quatre fois supérieure, dans l'ultraviolet moyen. Pour l'observer, il faut un instrument adapté à ces longueurs d'ondes et situé au-dessus de l'atmosphère terrestre.

Le deuxième problème réside dans le fait que la lumière ultraviolette nous parvenant des quasars lointains est extrêmement faible. Venue de l'autre côté de l'univers, elle doit traverser des centaines de nuages d'hydrogène, dont les plus grands sont extrêmement opaques à ces longueurs d'ondes. En fait, ils le sont tant que très peu de lumière filtre à travers et que la plupart des quasars lointains restent invisibles dans cette région du spectre.

« C'est un peu comme si l'on essayait d'observer les étoiles à travers de petites déchirures de la couverture nuageuse par une nuit sombre », explique le Dr Jakobsen « mais dans notre cas, la couverture nuageuse s'étend presque sur tout l'univers observable et il n'y a pas d'espoir que le temps s'éclaircisse ».

Pour atteindre son objectif, l'équipe de chercheurs a dû utiliser un télescope extrêmement sensible dans l'ultraviolet — le HST — et une source d'arrière-plan choisie avec soin. Les trois premières années de travail ont été consacrées à repérer un quasar approprié qui ne soit pas totalement voilé par les nuages d'hydrogène. Sachant qu'il existe des centaines et des centaines de quasars suffisamment distants, la difficulté était de savoir

lequel choisir.

En 1990, après le lancement du HST, et jusqu'en 1992, les astrophysiciens ont enregistré des spectres UV exploratoires de 25 candidats soigneusement sélectionnés au moyen des instruments d'observation astronomique les plus demandés au monde qu'ils ont mobilisés à cet effet pendant des dizaines et des dizaines d'orbites. Ils ne trouvèrent pas trace de lumière UV provenant de ces quasars, à une exception près. Fin 1992, les membres de l'équipe pensèrent avoir enfin découvert ce qu'ils cherchaient - un quasar dénommé Q0302-003 dans la constellation de la Baleine. Son spectre, observé au moyen de la FOC, présentait une faible trace de rayonnement UV à la bonne longueur d'ondes.

La dernière étape, essentielle, consistait à enregistrer un spectre plus détaillé et à chercher des traces de nuages d'hélium devant le quasar. Pour cela, il fallut attendre que le télescope fonctionne au mieux de ses capacités grâce à l'installation du dispositif de correction de son défaut optique. « Ce dispositif ne nous était pas indispensable, mais le coup d'œil terriblement alléchant que le télescope nous avait permis de jeter sur le quasar Q0302-003 en dépit du défaut optique a encore affermi notre forte motivation en faveur du COSTAR », rappelle le scientifique de l'ESA responsable du projet.

En décembre 1993, les astronautes (dont Claude Nicollier de l'ESA) ayant réussi à installer le dispositif COSTAR, la sensibilité de la FOC de l'ESA s'est trouvée multipliée par 4 du jour au lendemain. La qualité des mesures désormais possibles au moyen de cet instrument s'est améliorée de façon spectaculaire.

Le 26 janvier 1994, peu après sa remise en service, l'observatoire orbital, pointé une nouvelle fois sur le quasar Q0302-003, a montré exactement ce qu'attendaient les astronomes : un creux d'absorption marqué au-dessous de 131 nm — longueur d'onde caractéristique, compte tenu du décalage Doppler, de l'absorption ultraviolette par des ions He^+ à 30,4 nm. Du côté des longueurs d'ondes supérieures à cette limite et jusqu'à 600 nm, dans le visible, la lumière du quasar était intacte. En revanche, du côté des longueurs d'onde plus courtes, au-

cun rayonnement ultraviolet ne filtrait, comme s'il avait été entièrement absorbé par une multitude de nuages d'hélium interposés entre la source et le télescope.

« Bien que nous soyons presque certains d'avoir détecté de l'hélium, nous ne pouvons déterminer directement, sur la base des seules données fournies par la FOC, quelle est la part de l'absorption due aux nuages et celle de l'absorption imputable au milieu intergalactique », précise le Dr Jakobsen. « Nous aimerions enregistrer un meilleur spectre avec l'un des autres instruments du HST mais ce ne sera pas facile étant donné que nous travaillons déjà à la limite des capacités offertes par le télescope même avec son optique correctrice. Heureusement, un spectrographe de deuxième génération qui devrait faire l'affaire est en cours de construction et devrait être installé sur le HST un peu plus tard dans la décennie ».

Les chercheurs espèrent aussi confirmer la détection d'hélium intergalactique dans le quasar Q0302-003 en procédant à des mesures similaires avec d'autres quasars situés dans des régions différentes du ciel. « Cela ne sera pas facile. Il nous a fallu plusieurs années et 25 tentatives avant de trouver un passage dans les nuages intergalactiques qui voilent le quasar Q0302-003 mais il devrait y en avoir d'autres. Nous sommes décidés à poursuivre nos recherches », ajoute l'astrophysicien de l'ESA.

* * *

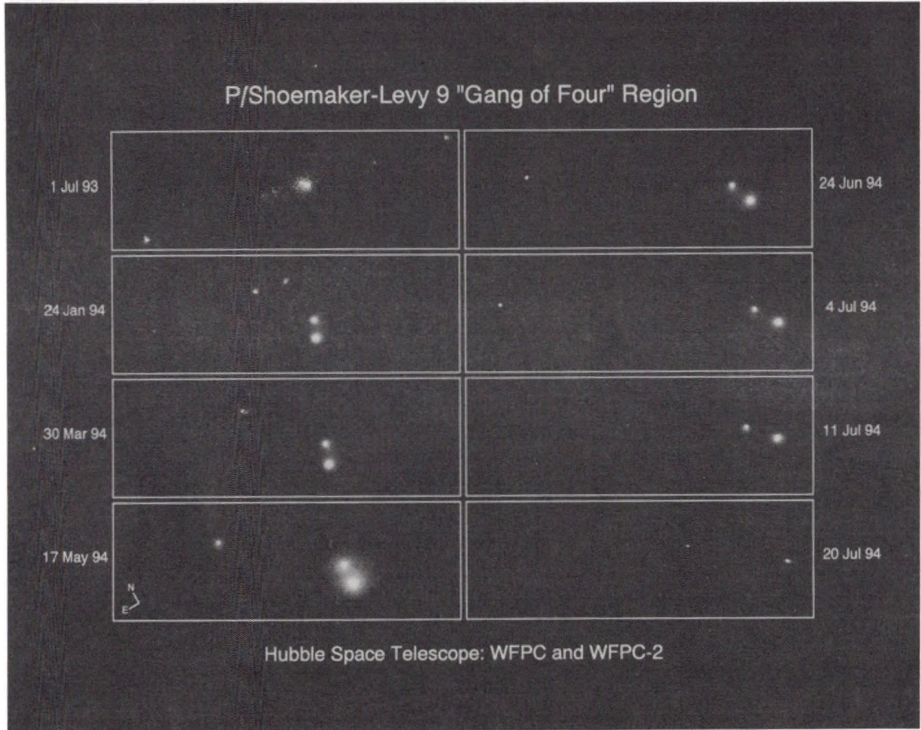
Shoemaker-Levy 9 et Jupiter

L'analyse et l'interprétation des observations réalisées à l'occasion de l'impact historique de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter continuent. Les scientifiques du Hubble Space Telescope ont donné une conférence de presse à la NASA, révélant quelques découvertes intéressantes qu'a permises leur instrument.

Les images à haute résolution obtenues peu de temps (une dizaine d'heures) avant les impacts ont prouvé que les noyaux avaient une

cohésion interne relativement forte. Il avait été suggéré que ces noyaux seraient brisés en une multitude de petits fragments par le champ gravifique intense de la planète lors de la phase finale de l'approche. Il n'en fut rien. Les noyaux restèrent intacts, et c'est ainsi qu'ils heurtèrent les hautes couches de l'atmosphère jovienne. La première figure ci-jointe montre le comportement du groupe $P - Q$ constitué de quatre blocs (la « bande

des quatre »). On assiste à un étirement du groupe, la distance $Q_1 - Q_2$ passant de 1100 kilomètres le 1 juillet, à 28.000 kilomètres le 20 juillet, juste avant l'impact ; mais les noyaux eux-mêmes ne sont pas affectés. La coma (« chevelure ») associée à ces noyaux, et constituée d'innombrables grains de poussières s'est également allongée considérablement.



Évolution du groupe de noyaux PQ entre juillet 93 et la date de l'impact

Quelque quatre jours avant l'impact, à une distance de près de quatre millions de kilomètres, le noyau G pénétrait la magnétosphère de Jupiter. La magnétosphère de la planète est si vaste que ses dimensions apparentes sont égales à celles de la Lune. Le spectrographe FOS (Faint Object Spectrograph) du HST a enregistré à cette occasion une puissante émis-

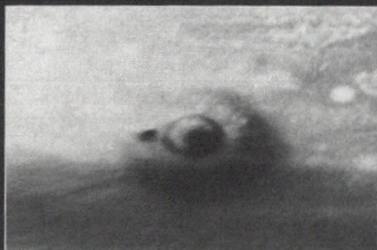
sion due à l'ion magnésium $MgII$, un constituant important des astéroïdes et des comètes. En revanche, si Shoemaker-Levy 9 avait été une comète digne de ce nom — et donc une « boule de neige sale » — on aurait dû y voir le radical hydroxyle OH . Ce ne fut pas le cas.

L'activité aurorale de Jupiter (voir notre bulletin de septembre) a également montré des

changements considérables lors de l'impact du fragment *K*. Il semble que l'arrivée de ce noyau bouleversa totalement les ceintures de radiation entourant Jupiter — ceintures qui s'étaient montrées d'une stabilité exemplaire durant vingt années de surveillance radio.

L'activité aurorale décelée par le HST a ceci de particulier qu'elle n'est pas située à l'emplacement normal de ce phénomène. Notons que des observations en rayons X par le satellite Rosat ont également révélé une activité intense lors de l'impact *K*.

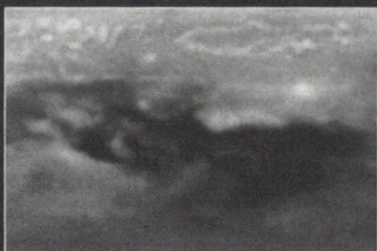
Evolution of D/G Comet Impact Sites on Jupiter



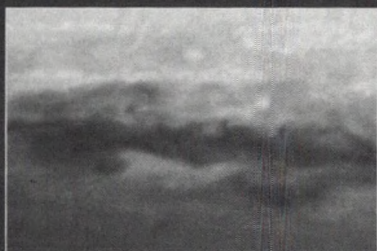
July 18, 1994



July 23, 1994



July 30, 1994



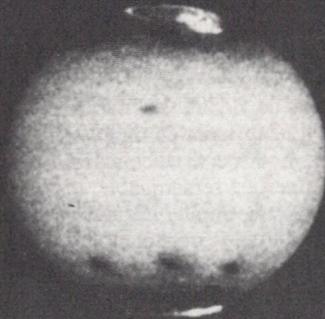
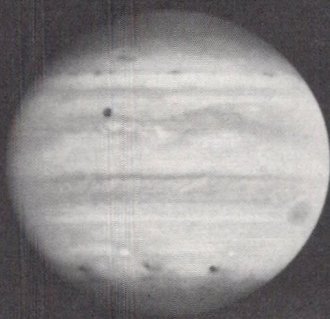
August 24, 1994

Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

Évolution de l'impact *G* (et de son petit compagnon *D*) pendant le mois qui a suivi l'impact. L'étalement se fait principalement en latitude sous l'influence des vents d'est qui prédominent aux altitudes où flottent les nuages sombres.

Jupiter

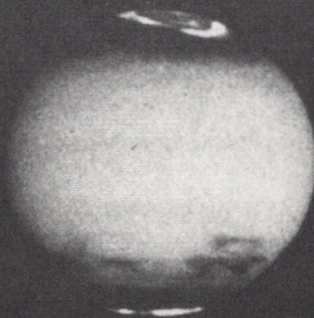
July 17, 1994



Violet (3660 Å)

Far UV (1600 Å)

July 29-30, 1994



Violet (3660 Å)

Far UV (1600 Å)

Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2

La direction des vents dominant est révélée par les photos prises en violet et ultraviolet par le HST. Les images de gauche correspondent à des altitudes plus basses que celles de droite car les poussières s'élevant dans l'atmosphère absorbent plus efficacement les courtes longueurs d'onde. On voit que, dans l'intervalle de deux semaines séparant les images du bas de celles du haut, les nuages bas se sont déformés d'est en ouest, tandis que les nuages hauts ont dérivé vers l'équateur.

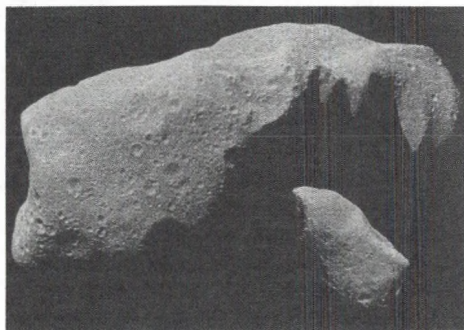
En suivant les marques sombres laissées par les nuages de débris, les scientifiques ont également pu tracer de façon précise les trajectoires des vents dans la haute atmosphère jovienne. Ceux-ci montrent un forte composante des pôles vers l'équateur, et seraient poussés par l'activité aurorale. Par contre, en basse altitude, les vents sont essentiellement d'est, et mus par le Soleil et la chaleur interne de la planète.

D'arrondies au début, les marques d'impact se sont transformées en figures allongées et festonnées. Leur persistance après de nombreuses semaines est remarquable, mais il est maintenant clair que Jupiter ne gardera aucune trace permanente de l'événement de juillet. Il n'y aura donc point de nouvelle Grande Tache Noire ou Rouge, ni de nouvelle bande australe.

La composition chimique des matériaux constituant ces nuages sombres reste l'objet de spéculations. Les observations spectrographiques ont révélé des composés sulfureux (soufre diatomique S_2 , sulfure d'hydrogène H_2S , disulfure de carbone CS_2) qui ont persisté quelques jours. La présence d'ammoniac (NH_3) s'est manifestée durant un mois entier, tandis que des émissions de fer, de silicium et de magnésium ont été aperçues brièvement au limbe de la planète et sont certainement dues à la comète.

Ida et Gaspra

Cette vue est une mosaïque d'images, prises par la sonde Galileo, des astéroïdes Ida et Gaspra, représentés à la même échelle. Ida, avec quelque 56 kilomètres dans sa plus grande longueur paraît un géant à côté de Gaspra. Fait remarquable, Ida possède un petit satellite (Ida 2) d'1,5 kilomètre de diamètre orbitant à une centaine de kilomètres de lui (non visible sur cette mosaïque). La stabilité de cette association, et la similitude de surface entre Ida et sa lune, suggèrent une origine commune. Quant à Gaspra, les images de Galileo suggèrent qu'il est peut-être constitué de deux pièces accolées l'une à l'autre.



Les astéroïdes Ida et Gaspra (Cliché NASA)

Horizon 2000 Plus

Note d'information ESA

« Visionnaire et hardi, le futur programme scientifique de l'ESA a reçu l'appui des scientifiques européens »

À la conférence ministérielle de Grenade de 1992, le Conseil de l'ESA avait demandé que soit échafaudé un plan dessinant des objectifs de science spatiale à mettre en oeuvre au-delà du programme Horizon 2000. Les travaux menés à ce sujet ont abouti à une réunion qui s'est tenue à Rome du 29 septembre au 1 octobre 1994 et a rassemblé l'Exécutif de l'Agence et un Comité d'étude composé de scientifiques européens et présidé par le Pr Lodewijk Woltjer. Le plan arrêté à Rome fait suite à une intense activité préparatoire — qui a associé des scientifiques venant de toute l'Europe, différents groupes de travail de l'Agence et cinq « équipes thématiques » — menée dans les domaines de l'exploration du système solaire, de l'astronomie et de la physique fondamentale. En juin 1993, la communauté scientifique (en l'occurrence, plus de 2500 chercheurs européens) avait répondu

massivement à un appel aux concepts de missions et proposé quelque cent-dix idées nouvelles illustrant les tendances de la science spatiale à l'horizon du prochain millénaire et représentant les principaux domaines d'intérêt de cette communauté. Notons que quatorze propositions ont été soumises par des chercheurs américains.

Le programme, dénommé Horizon 2000 Plus, s'étendra sur une dizaine d'années et portera sur des missions débutant en 2006. Il est conçu comme un programme à enchaînements successifs, assurant ainsi continuité et cohérence avec les objectifs d'Horizon 2000.

Le programme élaboré par le Comité d'étude s'efforce de combiner esprit visionnaire et réalisme. Il met en évidence les grandes tendances scientifiques et fait plein usage des moyens spatiaux européens et des progrès prévisibles des nouvelles applications technologiques. Il porte sur des domaines aussi passionnants que :

- la cosmologie, autrement dit l'origine de l'univers ;
- la nature de la gravitation, de la relativité générale et l'observation des ondes gravitationnelles ;
- la détection de planètes, satellites d'autres étoiles ;
- l'exploration du système solaire, avec un accent particulier sur Mercure, Mars et le Soleil.

Pour faire en sorte que les missions atteignent leurs objectifs ultimes et soient menées avec un maximum d'efficacité, le programme nécessitera la mise au point de certaines technologies très élaborées, en particulier en ce qui concerne la masse et l'énergie des véhicules spatiaux, les capacités de pointage, le traitement des données et les télécommunications.

En ce qui concerne l'étude du système solaire, le Comité recommande une mission de première grandeur (« pierre angulaire ») en direction de Mercure, la planète la plus proche du Soleil, qui est encore largement inexplorée. Cette mission devrait étudier les aspects planétaires et magnétosphériques.

En raison du vif intérêt que suscite l'étude

de Mars dans le monde entier, le Comité recommande à l'Agence de participer, au niveau d'une mission de catégorie moyenne, aux occasions qui pourront se présenter dans le cadre des projets d'exploration martienne actuellement à l'examen.

Vu les exceptionnelles occasions de recherche en physique solaire qu'offrent plusieurs missions en cours et en projet, et eu égard au vif intérêt qu'ont exprimé les chercheurs en physique solaire, le Comité recommande à l'Agence de saisir les possibilités qui se présenteront et de participer aux futures missions solaires internationales. L'Agence devrait également profiter des possibilités qu'offrent la Station spatiale et les missions de moyenne et petite catégories d'Horizon 2000 Plus, et ce en tirant pleinement parti des instruments à très haute résolution qui seront alors disponibles, de la technique de l'observation stéréoscopique et des futures sondes in situ.

En astronomie, le Comité d'étude recommande à l'ESA d'engager un programme du niveau « pierre angulaire » dans le domaine de l'interférométrie, l'objectif principal étant de procéder à des observations astrométriques. Une mission d'astrométrie générale par interférométrie avec une précision atteignant 10 micro-secondes d'arc permettra de procéder à des recherches sur des planètes semblables à Jupiter et sur les naines brunes, compagnons d'étoiles de notre galaxie, et d'obtenir des informations détaillées sur ces objets. Elle confirmera les distances, les mouvements propres et les luminosités de dizaines de millions d'étoiles de la Voie Lactée et permettra d'étudier la répartition des masses dans les galaxies voisines. Cette mission donnera également la possibilité de confronter la théorie de la relativité générale et les autres théories en présence. De surcroît, le Comité recommande de faire des études au moyen de l'interférométrie dans l'infrarouge, l'objectif étant de détecter des planètes similaires à la Terre autour d'autres étoiles.

Étant donné que l'Europe a réalisé des percées spectaculaires en astronomie dans le rayonnement X, le rayonnement gamma et l'infrarouge, et que les missions actuellement

en projet dans ces secteurs pourront se prolonger jusqu'aux alentours de l'an 2010, le Comité recommande d'engager peu après l'achèvement du programme Horizon 2000 Plus le développement de missions de grande envergure (« pierre angulaire »).

Dans l'intervalle, il conviendrait d'étudier la possibilité de réaliser un grand projet astrophysique dans les hautes énergies à l'occasion du programme d'utilisation de la Station spatiale, mais aussi d'exploiter pleinement les possibilités d'accès à des missions de moyenne et petite catégories.

Finalement, le Comité d'étude recommande à l'Agence d'engager des études technologiques et des études systèmes en préparation d'un programme « pierre angulaire » consacré à l'observation des ondes gravitationnelles, en particulier aux basses fréquences. Une mission de cette nature permettrait d'explorer les tout premiers temps de la création de l'univers et d'observer les trous noirs massifs et leur coalescence, renforçant ainsi notre connaissance de la nature de la gravitation et de la relativité générale.

Le gros des activités destinées à assurer la continuité d' Horizon 2000, dans les domaines

où l'Europe a pris une position en flèche internationalement reconnue, peut être réalisé au niveau des financements actuels, même si les objectifs visés sont notablement plus ambitieux. Toutefois, l'entrée dans le domaine de la physique fondamentale, qui constituera pour l'ESA une voie de recherche entièrement neuve, et en particulier la recherche en matière de détection des ondes gravitationnelles à partir de l'espace, ainsi que l'urgence de s'atteler au développement de technologies nouvelles, nécessiteront un effort financier supplémentaire.

Mais le caractère pressant de ces études, si importantes pour notre compréhension de l'univers et des forces qui en assurent la cohésion, fait que le Comité est convaincu du bien-fondé d'un tel effort supplémentaire. Il propose donc que le budget scientifique de l'Agence soit maintenu à son niveau de 1994 jusqu'à l'an 2000, puis augmenté de 4 à 5 % par an pendant les 4 à 5 années suivantes.

Le contenu et les projections financières du programme Horizon 2000 Plus seront intégrés dans le plan à long terme de l'Agence qui sera présenté au Conseil siégeant au niveau ministériel au cours du second semestre 1995.