

# L'apport de l'espace à la science de demain

X. Pellat\*



Indissociable de l'histoire de l'humanité, la recherche scientifique a commencé par l'observation de l'univers (le cosmos des Grecs). L'infiniment grand a toujours été l'objet des recherches passionnées d'une minorité et objet de curiosité et d'angoisse pour tous. Les grandes théories de la physique se sont développées dans ce contexte : la gravitation, l'électromagnétisme, les relativités restreinte et générale, la mécanique quantique. Il est apparu en effet que la compréhension de l'infiniment grand ne pouvait se dissocier de celle de l'infiniment petit.

Dans le lent cheminement du savoir humain les moyens spatiaux permettent de progresser plus vite plus loin. Il apparaît déjà que notre environnement proche est inerte : l'exploration des planètes n'a pas permis de rencontrer les « petits hommes verts ». Les livres et films d'anticipation ont reculé leurs mondes fantastiques loin dans la Galaxie ou dans d'autres Galaxies : le module d'atterrissage de la mission américaine Viking qui doit se poser le 4 juillet 1976 sur Mars confirmera vraisemblablement l'absence de vie sur cette planète d'atmosphère très raréfiée. Si les recherches ultérieures démontrent que nous sommes seuls dans le système solaire, un grand pas aura été franchi : avant d'aller explorer d'autres systèmes (ce qui n'est pas pour notre siècle), il faudra bien que les hommes apprennent à vivre entre eux et seulement pour eux. Cet impact philosophique de la science, auquel auront contribué de façon définitive les moyens spatiaux est bien plus important que le prodigieux spectacle des missions lunaires Apollo.

Dans la connaissance de l'univers, les moyens spatiaux sont devenus indispensables pour deux raisons. La première peut être illustrée par une boutade : comment connaître, sans au moins tourner autour, la face cachée de la lune\*\* ! Ce qui est vrai de la lune l'est a fortiori des planètes, nos appareils au sol n'ayant pas toujours, même lorsque l'observation est possible, le seuil de mesure nécessaire. L'autre raison nous permettra de répondre à la question naïve : si l'on veut observer une étoile lointaine, s'en rapproche-t-on de façon significative en plaçant l'instrument adéquat sur un satellite ? A l'exception des météorites et des rayons cosmiques de grande énergie qui franchissent l'atmosphère (et pour les particules chargées, la barrière du champ magnétique terrestre) l'essentiel de notre information est portée par le rayonnement électromagnétique : à son égard, l'atmosphère joue le rôle d'un filtre (indispensable à

notre vie) au détriment de notre connaissance. Elle n'est transparente, en effet, aux ondes électromagnétiques que dans les domaines optique et radio ; l'infrarouge et le submillimétrique d'une part, les ultra-violet, X et  $\gamma$  d'autre part sont absorbés.

Pour terminer cette brève analyse, il est clair que les moyens au sol et spatiaux sont complémentaires ; sans oublier que par moyens spatiaux on désigne aussi bien les avions, ballons et fusées sondes que les satellites ou laboratoires habités. Il n'y a de succès scientifique que dans les résultats obtenus et non les lancements réussis.

Nous allons maintenant expliquer dans leur contexte les résultats principaux obtenus à ce jour par des moyens spatiaux en deux parties : l'une consacrée au système solaire, l'autre à l'univers. Nous conclurons par « l'horizon 1980 ».

## Exploration du système solaire

Depuis le début de l'expérimentation spatiale, c'est la connaissance de notre environnement proche qui a progressé le plus rapidement. Nous considérons successivement la géophysique\*\*\*, les planètes, la lune, le soleil et nous conclurons par les idées actuelles sur la formation du système solaire.

### 1980 : La Navette Spatiale

On distingue traditionnellement les géophysiques interne et externe.

A partir de stations de poursuite par laser au sol on peut faire une trajectographie très précise de satellite munis de réflecteurs\*\*\*\* et en éliminant les perturbations autres que gravitationnelles, améliorer ainsi notre connaissance du champ gravitationnel terrestre : on en déduit une meilleure prévision des orbites et, inversement, on espère déterminer de façon de plus en plus précise les irrégularités correspondant en partie à l'hétérogénéité du manteau dont les mouvements sont supposés être les moteurs de la tectonique des plaques (la précision espérée des expériences futures permettra d'observer la dérive des continents).

C'est en géophysique externe cependant, que les progrès les plus significatifs ont été faits en ce qui concerne la composition, l'origine et la dynamique de l'environnement neutre (atmosphère) et ionisé (iono-

\* Directeur de Recherches au Centre National de la Recherche Scientifique.

\*\* C'est ce que fit pour la première fois la sonde soviétique Luna 3 en 1959.

\*\*\* La géophysique est la physique de la planète Terre.

\*\*\*\* Le dernier en date est le satellite français Starlette lancé en 1975.

sphère et magnétosphère). Selon les idées les plus répandues, l'atmosphère de la terre (comme celle de Mars et Vénus) se serait formée par un dégazage (pouvant résulter d'une activité volcanique?). Les atmosphères des planètes géantes (Jupiter, Saturne...) se seraient au contraire formées directement par capture gravitationnelle, ce qui explique que leurs compositions sont proches de celle de la nébuleuse solaire primitive. Nous reviendrons sur ce point.

Jusqu'à environ 100 km d'altitude, l'atmosphère terrestre est en équilibre de mélange (sa composition est uniforme : 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 1 % d'argon et de constituants mineurs). La basse atmosphère, au-dessous de 50 km, est le domaine de la météorologie : son objectif actuel\* est la détermination du mouvement instantané de l'atmosphère avec une précision suffisante pour faire ensuite (essentiellement par modèle sur ordinateur) la prévision de la circulation générale. Cela nécessite la mesure des profils de température et de vents soit par ballons in situ soit par des moyens optiques sur satellites. Lorsque l'on comprendra la météorologie dynamique, on pourra ensuite étudier les facteurs physiques qui conditionnent l'équilibre climatique : notamment les aérosols et les constituants mineurs (l'ozone est l'exemple le plus connu) qui jouent un rôle primordial dans l'absorption de la lumière ultra-violette solaire. Ces constituants sont pour la plupart non mesurés, ce qui peut sembler paradoxal, étant donnée la proximité et l'importance de l'atmosphère. En fait de la stratosphère à 100 km aucun moyen spatial ne permet de faire des mesures systématiques in situ : c'est trop haut pour les ballons, trop bas pour les satellites. Les mesures se feront dans les années 1980 depuis la Navette Spatiale.

#### Le "vent solaire"...

Au dessus de 100 km, l'atmosphère est en équilibre de diffusion, sa composition et son dynamique sont pour l'essentiel bien connues. Les gaz les plus légers, hydrogène et hélium, peuvent s'échapper du champs de gravité terrestre.\*\*

A la même altitude, l'atmosphère commence à être ionisée par la lumière U.V. solaire et les rayons X, la proportion de particules chargées augmentant avec l'altitude; on appelle cette région l'ionosphère (elle permet la propagation des communications radio à l'échelle planétaire). Elle se poursuit par la magnétosphère qui résulte de l'interaction entre le champ magnétique terrestre et le « vent solaire » : le « vent solaire » désigne poétiquement le gaz chaud ionisé supersonique qui s'évapore en permanence de la couronne solaire. Le champ magnétique terrestre crée une sorte de cavité d'une dizaine de rayons terrestres à l'intérieur du vent solaire, avec un sillage long de centaines de rayons terrestres dans la direction anti-solaire. Les processus de diffusion et d'accélération par lesquels le vent solaire pénètre cette cavité sont à l'origine des « ceintures de radiation » et des « aurores boréales ». Les ceintures de radiation\*\*\*

sont constituées de particules chargées énergétiques (leur énergie est de l'ordre de  $10^6$  électron-volt). Ces particules d'origine solaire sont accélérées par diffusion à travers le champ magnétique. L'irradiation des cellules vivantes est trop grande pour permettre les vols humains de longue durée dans les ceintures. (Au-dessous de 1 000 km, les particules chargées énergétiques sont détruites par échange de charge avec l'atmosphère résiduelle). On sait maintenant que les aurores boréales observées dans les régions polaires résultent de l'interaction avec la haute atmosphère de faisceaux d'électrons accélérés le long des lignes du champ magnétique. Avant d'être mesurés in situ, ces électrons étaient déjà invoqués comme étant à l'origine du rayonnement X découvert dans les aurores par des expériences sur fusée effectuées il y a une vingtaine d'années.

Le champ magnétique terrestre qui joue un rôle important de protection de notre atmosphère vis-à-vis des particules chargées du rayonnement cosmique, est produit par une sorte de dynamo résultant de la rotation du noyau métallique liquide de la terre. On pense également que la composition de l'atmosphère terrestre pourrait être très différente sans le champ magnétique. La recherche spatiale nous fournit en tout cas sur ce point et sur d'autres des éléments de comparaison par l'exploration des planètes et de la lune.

#### Vénus sans océans

L'exploration des planètes sera certainement considérée dans les siècles à venir comme un événement scientifique important de notre époque. Les planètes les plus visitées par les sondes spatiales américaines et soviétiques sont Mars et Vénus\*. Ce sont les plus proches de la terre en distance (quelques dizaines de millions de km), en dimensions et densité. Elles en diffèrent cependant beaucoup par leurs atmosphères et les possibilités de vie qui en résultent.

L'atmosphère de Vénus, dont la sonde soviétique Venera 8 (1972) a mesuré le profil vertical, est essentiellement composée de gaz carbonique : la pression au sol est de 100 atmosphères et la température de 750° Kelvin! En fait, les carbonates de la croûte terrestre fourniraient une quantité équivalente de gaz carbonique; ils ont été formés par l'action du gaz carbonique sur les silicates primitifs en présence d'eau liquide; Vénus étant plus proche du soleil que ne l'est la terre, on peut expliquer pourquoi cette planète n'a pas d'océans. On n'a pas non plus trouvé d'eau dans son atmosphère, ce qui reste un mystère. On a, par contre, mesuré des acides chlorhydrique et sulfurique, ce qui n'a pas découragé les exobiologistes qui, invoquant l'extraordinaire résistance connue des bactéries, n'excluent pas des formes de vie rudimentaire dans la partie de l'atmosphère où pression et température sont celles de la terre\*\*. Cette altitude (30 km environ) correspond à la base d'un épais système nuageux (photographié par Mariner 10 en 1974) qui couvre cette planète jusqu'à 60 km

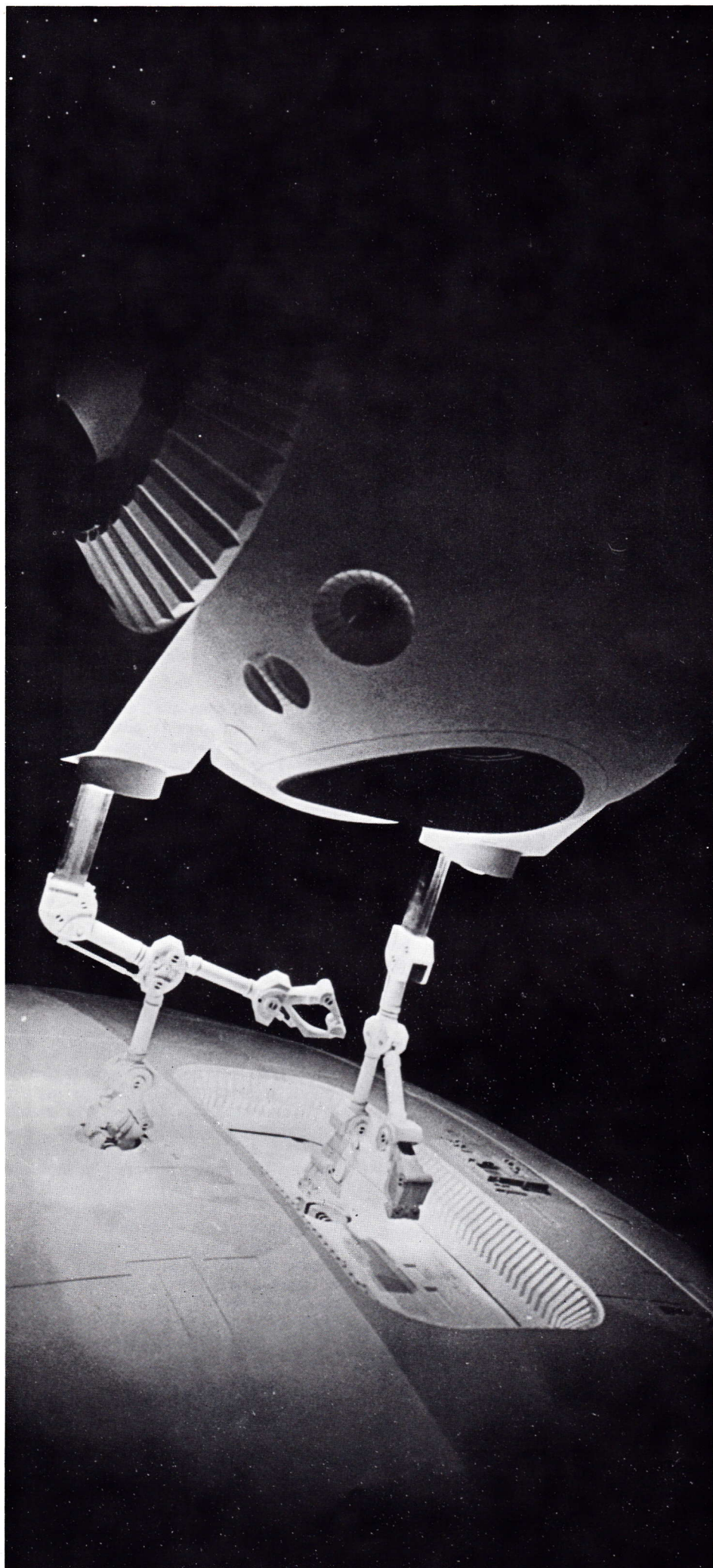
\* Les sondes américaines Mariner II (1962) pour Vénus et Mariner V pour Mars (1968) sont les premières sondes qui sont passées à proximité de ces planètes et ont transmis à la terre un début d'information scientifique.

\*\* Il existait un ambitieux projet franco-soviétique « eos-Vénus » qui consistait à déposer sur Vénus par une sonde soviétique un ballon français muni d'une nacelle scientifique commune.

\* Cet objectif devrait être atteint en 1977-1978 par la première exploration mondiale du GARP.

\*\* Des photographies de la géocouronne d'hydrogène ont été prises par Apollo 16 depuis la lune.

\*\*\* Elles ont été découvertes par le satellite américain Explorer I en 1958.



et tourne en quatre jours. Vénus tourne à peine une fois sur elle-même dans sa révolution autour du soleil, elle n'a pas de champ magnétique d'origine interne et pas de ceintures de radiations.

Ex-planète des « petits hommes verts », Mars a une atmosphère claire et très raréfiée (quelques millièmes d'atmosphère) essentiellement composée de gaz carbonique, avec des traces d'azote et de vapeur d'eau. Comme l'ont montré les remarquables photographies prises par Mariner 9 (1972), la géologie de Mars offre des perspectives très intéressantes (énormes volcans, failles géologiques, etc...). Le champ magnétique de Mars est trop faible pour la formation de ceintures de radiation; ce champ n'est que le 2/10 000<sup>e</sup> de celui de la terre, ce qui peut résulter de l'absence d'un noyau de fer fondu dans cette planète plus légère (densité de l'ordre de 4 grammes/cm<sup>3</sup>) que la terre (densité de 5,5 grammes/cm<sup>3</sup>).

La sonde américaine Mariner 10 est également passée en 1974 près de Mercure; la plus proche planète du soleil n'a peu ou pas d'atmosphère mais, à la surprise générale, on a observé des ceintures de radiation énergétiques (10<sup>5</sup> électron-volts). Jupiter est un émetteur puissant d'ondes radio que l'on attribuait au rayonnement d'électrons relativistes dans un champ magnétique d'un ordre de grandeur plus élevé que celui de la terre. Ces hypothèses ont été vérifiées par Pioneer X (1973) et XI (1974). La planète géante du système solaire (11 fois le diamètre de la terre et 300 fois sa masse) est presque une étoile « avortée » : sa composition devrait être très proche de celle du soleil (essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, ce qui explique sa très faible densité 1,3). On le saura lorsque la sonde américaine MJS\* (1977) atteindra la planète. Cette même sonde passera ensuite près de Saturne. Cette planète qui a des caractéristiques voisines de celles de Jupiter, a de nombreux satellites, dont l'un d'eux Titan possède une atmosphère de méthane qui devrait avoir des propriétés très voisines de celle utilisée en laboratoire par Miller lors de son expérience de création de molécules prébiotiques.

L'exploration de la lune est certainement celle qui a le plus frappé l'imagination du public. Rappelons en les dates essentielles des grandes premières réussies par les sondes automatiques soviétiques : Luna 3 transmet les premières photographies de la face cachée de la lune en 1959, Luna 9 atterrit en 1966 et Luna 10 se satellise la même année. Le bouquet de ce feu d'artifice est le programme américain Apollo avec les premiers pas sur la lune de N. Armstrong en 1969. Le bilan scientifique de cette exploration est important même s'il n'est pas à la dimension du spectacle. La rareté des échantillons lunaires a imposé de nouvelles méthodes de travail au sein d'une large communauté internationale formée de deux cents groupes de chercheurs. Les échantillons lunaires complètent nos connaissances de la matière primitive de la nébuleuse solaire acquises auparavant par l'étude des météorites : la couche superficielle des grains de poussière lunaire est comme un

*L'homme dans l'espace... "2001", film de Stanley Kubrick (1973).*

\* M comme Mars, J comme Jupiter, S comme Saturne.

nouvel état de la matière solide. Ces grains ont été exposés aux rayons cosmiques et au vent solaire : les dégâts d'irradiation ont pu permettre le collage des grains entr'eux et à l'implantation de nouveaux éléments ont succédé des phénomènes de synthèse. On pense que des mécanismes analogues ont dû jouer dans la formation de la lune et des planètes par condensation des grains et des poussières de la nébuleuse primitive. Encore un acquis de l'exploration lunaire : les cratères lunaires vieux de 4 milliards d'années ont été produits par l'impact de météorites dont on a ainsi appris que le flux était très intense. Terminons en citant l'exemple des réflecteurs déposés sur la lune qui permettent ainsi de faire la géodésie du système terre-lune par écho laser depuis la terre.

### Le soleil et la nébuleuse de Laplace

Le soleil est « notre étoile » et, bien qu'étant aux yeux de certains suffisamment exploré (le soleil calme est connu) ou incompréhensible (les éruptions solaires sont des phénomènes trop compliqués), il a fait l'objet de nombreuses expériences spatiales. Les expériences ont permis de mesurer le flux lumineux solaire jusqu'à l'ultra-violet (indispensable à l'étude des atmosphères). Elles ont surtout permis d'aborder l'étude de la couronne (en ultra-violet et X) et celle du « vent solaire » gaz chaud ionisé qui s'en échappe. Les observations optiques ont été faites par la série des satellites OSO\* et le Skylab (1973), en orbite terrestre. Les mesures de vent solaire\*\* se font in situ par les sondes planétaires.

Le modèle plus plausible de l'origine du système solaire reste celui, vieux dans son principe de 200 ans, du mathématicien français Laplace : le soleil et les planètes se seraient condensés à peu près simultanément (il y a environ 4,6 milliards d'années) dans un nuage de matière interstellaire : ce nuage de gaz et de poussières se serait freiné et comprimé (d'où la condensation) en arrivant dans un bras de notre Galaxie. Des modèles numériques permettent de préciser dans ce processus de condensation les conditions de température et de pression. En s'appuyant sur ces modèles et sur les théories actuelles (et les mesures) des abondances primitives des éléments, on obtient un début d'explication quantitative des propriétés des planètes; un exemple : les silicates et le fer sont ceux qui se condensent à la température la plus élevée, ce qui est en accord avec le fait que la densité des planètes décroît lorsqu'on s'éloigne du soleil. En ce qui concerne les éléments, ils se sont produits (par masse atomique croissante) : pour les plus légers (ex. : l'hélium) dans le « big-bang » par nucléosynthèse ; dans les réactions de spallation nucléaire induites par les rayons cosmiques (ex. : le lithium) et par nucléosynthèse dans les étoiles (du carbone à l'uranium). Le rapport deutérium sur hydrogène est prévu comme devant être du même ordre ( $10^{-5}$ ) dans la matière interstellaire et les atmosphères primitives des planètes géantes, ce qui a reçu un début de confirmation par une mesure sur Jupiter : il faudra



La galaxie de « La Lyre ». En 1980 grâce à la Navette Spatiale on verra naître de nouvelles étoiles...

attendre les résultats des mesures effectuées par la sonde MJS pour avoir des résultats définitifs.

La compréhension du système solaire progressera certainement par l'observation fascinante de nouvelles étoiles en formation. En effet, les mesures effectuées par radio-télescopes ont mis en évidence des « nuages moléculaires très denses » ( $10^5$  particules par  $\text{cm}^3$  en comparaison de 0,1 particule/ $\text{cm}^3$  pour le milieu interstellaire) dans les bras des Galaxies spirales comme la nôtre. Au centre de ces nuages on observe d'intenses émissions infra-rouge, émissions que l'on attribue à des étoiles naissantes. Les premières observations faites sur avion seront poursuivies sur satellites et sur la « navette spatiale ».

### Des « Quasars » aux Galaxies géantes

Au cours des trente dernières années des progrès considérables ont été accomplis dans la connaissance de l'univers (le grand télescope de Hale du mont Palomar couplé à un télescope de Schmidt à grand champ est opérationnel depuis 1948). Les radiotélescopes (l'un des plus connus est celui de Nançay, en France) et les moyens spatiaux sont venus plus récemment compléter les grands instruments optiques : une source de rayonnement observée dans un domaine de fréquence non optique est identifiée en tant que source optique. Avant de mentionner certaines observations spectaculaires, expliquons brièvement la théorie cosmologique la plus populaire. L'univers homogène, isotrope peut être décrit par les équations de la théorie de la relativité générale d'A. Einstein. Il est en expansion permanente; l'échelle de temps caractéristique de cette expansion, qui donne un ordre de grandeur de l'âge de l'univers, est l'inverse de la constante de Hubble\*. Les meilleures estimations actuelles sont entre 10 et 20 milliards d'années. Les objets les plus

lointains sont ceux qui s'éloignent le plus vite et qui ont ainsi le plus grand décalage de leur spectre d'émission vers le rouge (par un effet analogue à l'effet Doppler) : ces objets sont les « Quasars ». Leur vitesse de fuite peut atteindre 0,95 fois celle de la lumière. Découverts par les radio-télescopes, ils ont été identifiés en 1963 par le télescope de Hale comme des objets quasi-stellaires, bleus pour la plupart. Ces objets pourraient être des noyaux actifs de Galaxies géantes. Les télescopes orbitaux des années 1980 permettront de reculer les limites d'observation de ces objets lointains jusqu'à des distances qui correspondront aux estimations actuelles de l'âge de l'univers.

Dans le cadre de la même théorie, il y a nécessairement eu un « top de départ » à l'expansion de l'univers : cette explosion initiale à partir d'une boule de matière et rayonnement très dense et très chaude est appelée le « big-bang ». Deux tests essentiels à cette théorie sont considérés aujourd'hui comme positifs : en se détendant cette boule de feu a vu se séparer matière et rayonnement; en se détendant le rayonnement se « refroidit » et devrait avoir aujourd'hui, quelques milliards d'années après, une température de l'ordre de quelques degrés Kelvin : la mesure effectuée pour la première fois en radiotélescope en 1965 et confirmée depuis dans le domaine millimétrique a donné 3 °K! L'autre mesure est celle du rapport deutérium sur hydrogène : le deutérium étant très fragile, ce rapport est un test très sensible de la densité moyenne actuelle de l'univers; si l'univers est peu dense, la théorie montre qu'il est pour toujours en expansion. Les mesures faites par le satellite américain Copernicus (1972) dans l'ultra-violet ont donné un rapport de  $10^{-5}$ , qui implique avec nos connaissances actuelles que l'univers soit pour

\* Observatoire orbital solaire américain. Le dernier lancé (1975) comprend d'importantes expériences françaises.

\*\* Le vent solaire a été découvert par les premières sondes soviétiques.

\* Astronome américain du début du siècle qui a découvert les galaxies et l'expansion de l'univers.

toujours en expansion!

Observation et compréhension des différents états de la matière dans l'univers sont complémentaires de la cosmologie. Les étoiles ont, on le sait, des histoires différentes suivant leur masse initiale. Depuis les années 1930, deux états possibles de l'évolution stellaire étaient prévus qui correspondent à des objets de plus en plus denses : les « étoiles à neutrons » (une fraction de la masse solaire avec un rayon de quelques kms\*) et les « trous noirs » (quelques masses solaires pour des dimensions similaires); ces derniers sont si denses que selon la théorie de la relativité générale les rayons lumineux sont courbés à la dimension de l'étoile et ne peuvent en sortir. Le premier pulsar (étoile à neutron en rotation) a été découvert en 1968 dans la Nébuleuse du Crabe\*\* par le radiotélescope de Cambridge : un pulsar apparaît comme une véritable horloge astronomique par la régularité de ses pulses radio. Ces étoiles appartiennent à la catégorie plus générale des sources X dont le satellite Uhuru (1970) a commencé une observation systématique (plus de 100 sources ont été cataloguées). L'une des sources observées Cygnus. X.1 forme un système binaire avec une étoile de la catégorie des « supergéantes bleues » : les X mesurés sont produits dans l'accrétion par la petite étoile massive du vent stellaire de son compagnon. Les caractéristiques de Cygnus X.1 déduites des observations sont celles d'un trou noir!

#### En 1980 ?

Les moyens spatiaux ont déjà fourni de remarquables observations, bien que certaines mesures (dans l'infrarouge et les rayons  $\gamma$ ) soient encore susceptibles de progrès technologiques importants. Les années 1980 verront les débuts d'un nouveau véhicule : la navette en orbite terrestre des charges importantes\*\*\* et permettra d'assurer la maintenance d'instruments satellisés. Parmi les instruments en cours d'études on trouve notamment : un ensemble de lasers et d'instruments optiques (le Lidar) destinés à sonder l'atmosphère et ses constituants mineurs et un télescope de 2 mètres, le L S T). Ce dernier permettra de gagner plusieurs ordres de grandeur sur la magnitude des objets observables : peut-être atteindra-t-on ainsi les frontières de l'univers?

Il y a une ombre à ce beau tableau : l'essentiel de l'effort spatial est acquis grâce aux forces de « dissuasion » des pays « développés » et aux satellites de surveillance militaires. Le premier homme dans l'espace, le premier pas sur la lune et la poignée de main historique\*\*\*\* sont essentiellement des manifestations d'impérialisme, au-delà de l'exploit technique et humain et du spectacle extraordinaire qui nous aura été « offert ».

X. P.

*La nébuleuse du « Crabe » :  
des astronomes chinois y ont observé  
en 1054 l'explosion d'une étoile massive,  
une « Supernova ».*

\* Par comparaison le rayon du soleil est de 700 000 km.  
\*\* La nébuleuse du Crabe est célèbre car les astronomes chinois y avaient observé en 1054 l'explosion d'une étoile massive, une Supernova.

\*\*\* Un véritable laboratoire le « Spacelab », construit par l'Agence Spatiale Européenne fait partie des missions prévues.

\*\*\*\* Le rendez-vous Apollo-Soyouz en 1975.

