

SYSTÈME SOLAIRE ET UNIVERS LOINTAIN

MICHEL BLANC

Président de la section

JAMES LEQUEUX

Rapporteur

Annie Baglin

Jean-Paul Baluteau

Slimane Bensammar

Alain Blanchard

Jacques Colin

Roger Ferlet

Marie-Claire Gazeau

Maryvonne Gerin-Laslier

Georges Helmer

Jean-Pierre Lemonnier

Michelle Loulergue

François Pajot

Guy Pelletier

François-Xavier Schmider

Guy Serra

Guy Simon

Laurent Vigroux

INTRODUCTION

L'univers offre des conditions extrêmes de température, de densité, de rayonnement et de champ de gravitation. Il est donc riche d'enseignements pour la physique, la chimie et la biologie. La nature et l'origine de l'univers et les phénomènes extrêmes qu'il révèle ont un intérêt culturel et philosophique considérable, et sont des sources d'interrogations théoriques : on peut citer par exemple les questions concernant les particules élémentaires, la gravitation, la turbulence, le chaos, les lois d'échelle, etc. L'étude de l'univers physique, qui constitue le champ de l'astronomie et de l'astrophysique (la différence entre ce que représentent ces deux mots s'estompe), est donc par nature pluridisciplinaire.

Les progrès récents de l'astronomie sont spectaculaires. Des découvertes, comme celle de galaxies extrêmement lointaines ou de planètes extra-solaires, paraissaient improbables il y a seulement quelques années. Elles sont évidemment liées aux développements instrumentaux comme le télescope spatial Hubble, les télescopes géants, les interféromètres millimétriques, avec leurs instruments focaux performants. Après les sondes VOYAGER, GIOTTO ou MAGELLAN, l'exploration et l'observation spatiale et depuis la Terre ont conduit à un bouleversement de nos connaissances sur la formation et l'évolution du système solaire. Bien

entendu, ces découvertes ouvrent la porte à d'autres questions : il subsiste bien des problèmes non résolus, dont le plus ancien et le plus irritant est celui de la nature de la matière noire, cent fois plus abondante que la matière visible de l'univers, et qui n'a encore été détectée que par ses effets gravitationnels.

La dimension culturelle de l'astronomie est particulière : au centre des interrogations de l'Homme sur ses origines et sa place dans l'univers, l'astronomie s'intéresse à l'évolution de la matière, de l'univers primordial à l'émergence de la vie. À chaque niveau, l'astronome est confronté à l'organisation de l'univers, dont l'analyse et la compréhension font appel à diverses disciplines présentes au sein du CNRS.

- La physique des particules intervient aux premiers instants de l'univers, où les conditions physiques sont hors d'atteinte de l'expérimentation terrestre. Certains objets astrophysiques sont les plus puissants accélérateurs existants de particules élémentaires.

- La théorie de la gravitation rencontre dans la cosmologie et dans l'étude de certains objets (pulsars binaires) quelques-uns de ses tests les plus contraignants.

- La physique nucléaire est la clé de la compréhension de la formation des éléments chimiques. L'observation des étoiles fournit des contraintes très précises sur les paramètres des réactions nucléaires à basse énergie.

- La très grande majorité de la matière visible de l'univers est dans l'état plasma : il existe dans l'univers une extrême diversité de plasmas dont certains se rapprochent de ceux des réacteurs à fusion.

- La physique atomique et moléculaire est universellement présente en astronomie, à travers les diagnostics spectroscopiques et dans la description des milieux : atmosphères stellaires et planétaires, et milieu interstellaire.

- La chimie trouve dans ces milieux un terrain d'exploration particulièrement fertile, car il y existe une gamme énorme de pressions et de tempéra-

tures. On rencontre la chimie à toutes les échelles de la complexité de l'univers, pour s'arrêter aux gaz et grains interstellaires et à la matière primitive du système solaire, aux confins du vivant.

- Partie à la recherche des origines de la vie, la biologie a, depuis quelques décennies, grâce aux découvertes de l'astronomie, largement étendu ses investigations au-delà de notre planète. De cette rencontre des biologistes et des astronomes est née une discipline aux implications culturelles considérables : l'exobiologie.

- Enfin, l'étude du système solaire, tout en se préoccupant de l'origine de notre système planétaire, est fortement couplée au problème de la formation des étoiles au sein du milieu interstellaire. Les premières découvertes de systèmes planétaires autour d'autres étoiles, qui sont appelées à s'élargir au cours des années à venir avec les techniques d'observation à très haute résolution spectrale et spatiale (interférométrie en particulier) et l'arrivée des télescopes géants, ont considérablement élargi les perspectives de ce domaine. Par l'étude comparative des planètes et de la Terre, l'astronomie et la géophysique s'enrichissent mutuellement : la planétologie est un domaine d'interface au sein des Sciences de l'Univers.

La démarche de la recherche en astronomie a des caractères particuliers, qu'elle partage avec la géophysique : c'est une science fondée sur la confrontation à des observations. Il n'est pas possible aux astronomes de créer des phénomènes physiques ni même de les influencer, mais seulement de les observer à distance, quelquefois *in situ*. Les découvertes sont donc plus imprévisibles que pour d'autres sciences, comme l'histoire l'a abondamment montré. Le progrès des connaissances résulte de la confrontation de modèles, élaborés à l'aide d'une physique parfois très complexe, à des observations de plus en plus contraignantes. Au plan pratique, l'astronomie partage avec les sciences de la Terre une mission d'observation systématique des phénomènes naturels, dans le but d'en comprendre le fonctionnement, d'en suivre et éventuellement d'en prédire les effets sur notre environnement. Cette mission peut prendre un caractère contractuel : on citera, à titre d'exemples, l'élaboration des systèmes de référence du temps et

de l'espace, le suivi de l'activité solaire et de ses effets sur l'environnement spatial, et la prévision de la trajectoire des corps du système solaire.

Il faut aussi noter une convergence de l'astronomie avec la physique nucléaire et la physique des particules, par la taille des outils de la recherche. Ce n'est pas un hasard si ces deux disciplines, au sein du CNRS, sont dotées de structures d'Institut. Le développement de l'astronomie repose en effet, à côté d'instruments modestes qui permettent souvent de belles découvertes, sur la mise en œuvre de très grands équipements au sol ou dans l'espace, réalisés pour l'essentiel en collaboration internationale dans le cadre d'instituts ou d'agences de moyens spécialisés : Agence Spatiale Européenne (ASE), Observatoire Européen Austral (ESO), Télescope Canada-France-Hawaï (TCFH), Institut de Radio Astronomie Millimétrique (IRAM), radars ionosphériques (EISCAT), etc. La logique scientifique implique une forte synergie sol-espace, les observatoires au sol couvrant les fenêtres spectrales où l'atmosphère terrestre est transparente, tandis que les observatoires spatiaux couvrent le reste. Le prolongement naturel de cette logique est l'extension de l'astronomie aux particules non photoniques (neutrinos, particules exotiques, ondes gravitationnelles), dans le cadre de collaborations avec d'autres communautés de physiciens.

Nous allons résumer les tendances de l'astronomie d'aujourd'hui, en suivant l'histoire de l'univers, et montrer comment la communauté nationale y contribue. Nous analyserons ensuite ses stratégies d'observation et décrirons brièvement les moyens d'observation accessibles à la communauté nationale, avant de conclure par des remarques sur l'organisation de la discipline.

1 - LES GRANDES THÉMATIQUES DE L'ASTRONOMIE D'AUJOURD'HUI

L'univers est en évolution. Le but de l'astronomie est de comprendre comment se sont organisées, à partir de la matière primordiale, les structures complexes qui nous entourent : grandes structures de l'univers, amas de galaxies, galaxies, milieu interstellaire, étoiles, planètes, êtres vivants. Nous suivrons donc cette évolution, sans prétendre être exhaustifs.

1. 1 LA COSMOLOGIE

Les premières étapes de l'évolution de l'univers relèvent de la spéculation. Cependant, contrairement à certaines affirmations journalistiques, il n'y a actuellement aucune raison sérieuse pour remettre en cause le modèle classique du Big Bang. Mais les grandes problématiques sont toujours là. L'univers primordial était opaque aux ondes électromagnétiques : il nous est donc à jamais caché. Nous ne pouvons observer de l'univers que ses parties plus évoluées, donc plus proches, qui sont devenues relativement transparentes. Le satellite COBE a permis de cartographier grossièrement leur rayonnement millimétrique, rayonnement remarquablement uniforme mais qui présente cependant de faibles fluctuations spatiales, traces de celles qui existaient aux époques précédentes. Ceci offre une vue sur la physique de l'univers primordial, y compris celle qui demeurera à jamais inaccessible à l'expérience avec les plus grands accélérateurs. On assiste actuellement à de nombreuses tentatives d'amélioration de cette cartographie, à partir du sol ou par des observations spatiales : la mission COBRAS-SAMBA doit apporter un progrès décisif. Il existe d'autres indices de ce qu'était l'univers primordial, par exemple la présence d'éléments comme le deutérium, l'hélium et le lithium formés peu après le Big Bang, dont l'abondance permet d'estimer la densité baryonique (densité de matière

ordinaire) de l'univers. On peut aussi espérer connaître la densité de la matière noire, qui se manifeste par ses effets gravitationnels et est peut-être constituée de particules "étranges" éventuellement détectables sur Terre ; ces particules ayant été créées lors du Big-Bang, la cosmologie est à l'interface avec la physique des particules, et participe aux interrogations sur la nature de la matière. Enfin, l'observation de la géométrie de l'univers observable doit nous dire si une constante cosmologique non nulle existe. Il est toutefois indispensable, pour déterminer cette géométrie, de connaître la relation entre la distance des objets de l'univers et le décalage spectral des ondes électromagnétiques qui nous en parviennent (constante de Hubble). Enfin, les ondes gravitationnelles de basse fréquence sont des traceurs potentiels des conditions qui régnaient dans l'univers primitif.

La cosmologie primordiale est en voie d'émergence en France. Ce développement s'inscrit dans un renforcement de la cosmologie théorique, point de rencontre privilégié entre astronomes et physiciens des particules. L'étude des bases de la cosmologie (relativité générale, en particulier ondes gravitationnelles avec de remarquables travaux sur leur génération par les pulsars binaires, et maintenant le projet VIRGO de détection de ces ondes gravitationnelles, travaux sur la constante de Hubble) est très active, de même que celle des indices de ce que pouvait être l'univers primitif : on peut citer des travaux sur l'abondance des éléments primordiaux (hélium dans les galaxies, lithium dans les étoiles), sur la nature de la matière noire baryonique ou non, par exemple des tentatives de détection de particules exotiques avec des bolomètres très performants, etc.

Les galaxies ne sont pas distribuées au hasard dans l'univers, mais occupent la surface de grandes bulles jointives, dont l'intérieur paraît vide. Ces grandes structures émergent à partir des fluctuations primordiales et conditionnent l'évolution future des galaxies. Mais la distribution observée de la lumière des galaxies est-elle représentative de celle de l'ensemble de la matière, ou bien la matière noire, bien plus abondante, a-t-elle une distribution différente ? Les galaxies se sont-elles formées avant les grandes structures et les amas où elles se sont rassemblées, ou est-ce l'inverse ? À quelle époque

dans l'histoire de l'univers les galaxies se sont-elles formées ? Se sont-elles formées toutes en même temps ou progressivement, et s'en forme-t-il encore aujourd'hui ? À quel moment leurs étoiles sont-elles nées et ont-elles fabriqué et rejeté les éléments lourds qui se condenseront en poussières interstellaires ? On ne pourra répondre à ces questions que par la conjonction d'études théoriques, d'observations très diverses et de modélisation qui fait intervenir des simulations numériques d'autant plus importantes qu'on tente d'englober les phénomènes dans leur totalité.

Nous n'avons pas encore abordé, en France, ces simulations de façons extensive, mais apporté des contributions d'importance aux différentes questions-clés qui viennent d'être énumérées. On peut citer, par exemple :

- la découverte longtemps attendue du fond de ciel en ondes submillimétriques, qui est dû à l'émission thermique intégrée de la poussière interstellaire dans les galaxies à très grande distance. Elle a été faite par des chercheurs français à partir des données du satellite américain COBE ;

- les progrès considérables faits sur l'imagerie gravitationnelle d'objets lointains : leurs images sont déplacées, déformées et leur intensité fortement affectée par la déviation des rayons lumineux par des masses plus proches (effet Einstein). On sait ainsi cartographier la masse des amas de galaxies grâce à l'étude des distorsions gravitationnelles qu'ils produisent sur les galaxies lointaines, et l'on devrait pouvoir de la même manière cartographier à grande échelle l'ensemble de la masse dans l'univers.

- la découverte avec les instruments de l'IRAM de molécules interstellaires dans les galaxies et les quasars les plus lointains connus.

- la découverte d'un grand amas de galaxies caché en grande partie par l'absorption de la poussière de notre galaxie. Son existence conforte l'idée d'un "Grand attracteur", concentration de masse qui affecterait la dynamique locale de l'univers.

1. 2 LES GALAXIES

Pour comprendre les galaxies lointaines, leur formation et leur évolution, il faut d'abord comprendre les galaxies proches, qui sont observables avec bien plus de détail. L'étude de notre propre galaxie, la Voie lactée, de ses compagnons, les deux nuages de Magellan et une dizaine de galaxies naines, de la galaxie d'Andromède, etc., est toujours une source inépuisable d'informations.

L'évolution d'une galaxie est dominée par le cycle de formation et d'évolution des étoiles qu'elle contient. Initialement, il n'y avait que du gaz ; des étoiles se forment à partir de ce gaz, puis, à leur mort, elles rejettent dans le milieu interstellaire une partie de leur matière, enrichie en éléments lourds dont une fraction s'est condensée en poussières. À cette évolution, que de façon restrictive on qualifie souvent d'évolution chimique (puisque la composition chimique de la galaxie est modifiée par la nucléosynthèse dans les étoiles), se superpose une évolution dynamique sous l'effet de l'attraction gravitationnelle mutuelle des différentes parties de la galaxie. Évolution chimique et évolution dynamique sont deux processus couplés, qui ne sont uniformes ni dans l'espace, ni dans le temps. Par exemple, les parties centrales des galaxies, très denses, évoluent très rapidement, ce qui se traduit de façon spectaculaire par l'apparition de quasars ou noyaux actifs. Enfin, les galaxies ne sont nullement des systèmes isolés : les rencontres entre galaxies sont fréquentes, et conduisent à des distorsions des partenaires, voire à leur fusion et au cannibalisme des petites galaxies par les grandes. Ces phénomènes dynamiques s'accompagnent de la compression de grandes masses de gaz dont il résulte des flambées spectaculaires de formation d'étoiles.

Ce qui vient d'être exposé comme un ensemble de faits comporte en réalité un nombre presque équivalent d'interrogations, qu'il serait fastidieux d'énumérer. Il est clair que le progrès n'est possible que par la conjonction des efforts de théoriciens, d'observateurs et de modélisateurs. Il existe en France une forte communauté sur l'étude des galaxies, qui occupe une excellente position internationale. L'instrumentation qui permet l'étude des

galaxies est bien fournie et diversifiée : c'est en fait l'essentiel de l'instrumentation au sol et dans l'espace. Aussi peut-on s'attendre à des progrès rapides.

1. 3 DE LA MATIÈRE INTERSTELLAIRE AUX ÉTOILES

Les étoiles, comme les êtres vivants, naissent, évoluent et meurent. L'étude des étoiles, autrefois statique et descriptive, s'est transformée en une approche évolutive qui s'intéresse prioritairement aux phases initiales et terminales de l'évolution stellaire.

La formation des étoiles est un des aspects les moins bien connus de l'univers. Il y a à cela des raisons à la fois observationnelles et théoriques. Les étoiles se forment au sein de nuages de matière interstellaire constitués de molécules et de poussières, nuages qui sont totalement opaques à la lumière. Ce n'est que par l'observation infrarouge et radio que l'on peut voir l'intérieur de ces nuages et espérer observer des étoiles s'y former. Par ailleurs, les travaux récents (notamment français) ont montré que le milieu interstellaire est extrêmement turbulent, avec une structure hiérarchique, peut-être fractale. Il se prête à une chimie active, présentant de la bi-stabilité et du chaos. Aussi les modèles simples habituellement utilisés de la formation stellaire ne sont qu'une approximation extrêmement grossière de la réalité. En fait, on ne sait même pas si les étoiles se forment par effondrement d'une structure unique ou par coalescence de fragments plus petits. Les observations d'étoiles en formation ou d'étoiles très jeunes ont de surcroît apporté une très grande surprise : ces objets expulsent de la matière sous la forme de deux jets symétriques. Ces jets rappellent ceux qui sont produits par les noyaux actifs de galaxies (les quasars) à une échelle évidemment bien plus considérable : ils représentent un phénomène physique fondamental encore mal compris. Sont-ils en relation avec le disque de matière qui paraît souvent entourer les jeunes étoiles, et qui pourrait être un disque protoplanétaire ? Il est évident qu'il y a dans la formation des étoiles un des champs d'investigation les plus importants de l'astronomie d'aujourd'hui.

Les astronomes de notre pays occupent dans ce domaine une place enviable, notamment parce qu'ils bénéficient d'une instrumentation particulièrement appropriée : les instruments de radioastronomie millimétrique de l'IRAM et des caméras à très haute résolution angulaire dans l'infrarouge sur les grands télescopes. Il y a aussi dans ce domaine une collaboration particulièrement fructueuse entre astronomes, physiciens et chimistes, stimulée par des actions interdépartementales au CNRS et inter-organismes. On assiste en ce moment même à un renouvellement de nos connaissances sur la matière interstellaire et circumstellaire et la formation stellaire, grâce au satellite Infrared Space Observatory (ISO), dans lequel nous tenons une part très active, et tout récemment grâce au vol ballon français PRONAOS.

En attendant l'imagerie directe des étoiles qui commence grâce à l'interférométrie, l'étude des phases ultérieures de l'évolution stellaire est dominée par une nouvelle méthode d'observation, l'astérosismologie. Les étoiles vibrent sous l'effet de perturbations dues à des phénomènes d'activité, et l'étude de leurs nombreux modes propres d'oscillation nous renseigne sur leur structure et leur rotation interne, de la même manière que la sismologie terrestre nous informe sur la constitution de notre globe. Grâce en particulier à des travaux d'héliosismologie réalisés en France, pionnière en la matière, l'étude de la structure interne du Soleil a énormément progressé ces dernières années, et progressera encore avec les résultats du satellite SOHO. Le problème du manque apparent de neutrinos solaires n'est cependant pas résolu ; au contraire, il est confirmé par de nouvelles expériences de détection des neutrinos solaires comme GALLEX. Il faut sans doute en trouver la solution en physique des particules (oscillations entre les différentes espèces de neutrinos). Quant aux étoiles, l'observation de leurs oscillations au sol reste difficile et est du ressort de futures missions spatiales. Malheureusement, la mission MARS 96, qui emportait un instrument d'observation des oscillations stellaires, vient d'échouer.

Les progrès de notre connaissance des dernières phases de l'évolution stellaire ont été considérables ces dernières années. On observe, dans ces phases, l'éjection de matière qui retourne au milieu interstellaire, sa composition chimique étant

profondément modifiée par son passage dans l'intérieur des étoiles. Les enveloppes des étoiles en fin d'évolution sont de magnifiques laboratoires de physique et chimie : elles sont un lieu de synthèse de très nombreuses molécules minérales et organiques dont beaucoup ont été découvertes à l'IRAM. Elles sont aussi les principaux producteurs de poussières interstellaires. On retrouve les poussières provenant de ces étoiles et des supernovae dans le système solaire.

On ne peut parler des étoiles sans dire quelques mots des objets exotiques que l'on rencontre dans la faune stellaire. Les plus spectaculaires sont les étoiles binaires productrices de rayons X. Dans certains de ces objets, une des composantes est une étoile à neutrons – un pulsar ; dans d'autres, elle semble bien être un trou noir. Les phénomènes qui se produisent là ont évidemment beaucoup d'intérêt pour les physiciens ; en outre, les pulsars binaires offrent une des possibilités les plus intéressantes pour tester la relativité générale. Même les étoiles isolées peuvent présenter des phénomènes d'activité généralement liés à leur champ magnétique : le Soleil en est un exemple modeste.

Beaucoup moins spectaculaires, mais aussi d'une grande importance, sont les étoiles de très petites masses, où les réactions nucléaires ne peuvent s'allumer : elles sont donc froides, peu lumineuses et très difficiles à observer. Ce sont les *naines brunes*. De très grands progrès ont été faits récemment en France dans leur difficile modélisation. Ce sont évidemment des candidats de choix pour la matière noire dans notre Galaxie. Pour vérifier cette idée, de grands programmes d'observations systématiques ont été mis en route pour tenter de les détecter par l'amplification que peut produire leur champ de gravitation sur la lumière d'étoiles plus lointaines. Plusieurs de ces programmes (EROS, DUO, AGAPE) sont français et réunissent physiciens de l'IN2P3 et astronomes. Les résultats sont positifs, mais il semble néanmoins que les naines brunes ne peuvent constituer qu'une partie de la matière noire. Ces programmes ont des sous-produits d'un extrême intérêt, et ont le potentiel de détecter des planètes extra-solaires par leurs effets d'amplification gravitationnelle.

1. 4 LES SYSTÈMES PLANÉTAIRES : DU SYSTÈME SOLAIRE AUX PLANÈTES EXTRA-SOLAIRES

Depuis les sondes VOYAGER, l'exploration du système solaire nous a conduit de surprise en surprise. Depuis le début de cette épopée, la communauté française de planétologie s'est développée de façon spectaculaire, en particulier grâce à l'action du CNRS (Programme national de planétologie de l'INSU), pour occuper actuellement le second rang après les États-Unis. Les trois thèmes prioritaires du Programme national reflètent les questions essentielles posées par la formation et l'évolution du système solaire. Comment le système solaire et ses différentes classes d'objets se sont-ils formés à partir du milieu interstellaire ? Quels sont les détails de la formation des objets individuels ? Comment, une fois formées, les planètes telluriques se sont-elles différenciées en croûte, manteau, noyau et enveloppe fluide, et pourquoi observe-t-on des objets aussi différents les uns des autres, de Mercure à Mars en passant par Vénus, la Terre et la Lune ? Enfin, dans quelle(s) région(s) délimitée(s) du système solaire y a-t-il eu des conditions propices à l'apparition de la vie ? Cette question est éclairée par l'étude comparative de l'évolution atmosphérique de Vénus, la Terre et Mars, mais aussi par celle de Titan avec son atmosphère chargée en molécules organiques dont les observations avec les grands télescopes allongent régulièrement la liste.

Les planétologues français sont actifs sur tous ces sujets. Voici pêle-mêle quelques résultats récents où la contribution française a été importante :

- Des travaux théoriques ont mis en évidence l'importance du chaos dans le système solaire, et ont permis de déterminer si les axes de rotation des planètes sont stables ou instables, et de décrire les mouvements orbitaux des astéroïdes qui peuvent parfois les conduire au voisinage de la Terre.
- La mise en évidence directe de l'atmosphère d'origine volcanique de Io, satellite de Jupiter, a été obtenue à l'IRAM ; ce sont aussi des observations en ondes radio millimétriques qui, conjointement à

des observations infrarouges, ont permis la construction des meilleurs modèles de l'atmosphère des planètes géantes. La chute sur Jupiter de la comète Shoemaker-Levy, que nous avons intensément observée, a été l'occasion d'un renouvellement de nos connaissances sur l'atmosphère de Jupiter.

- L'arrivée près de la Terre de plusieurs comètes brillantes a suscité de nombreuses campagnes d'observations, notamment en France (Pic-du-Midi, IRAM, Nançay, OHP). Elles ont apporté de grands progrès dans la connaissance de la composition des comètes, objets dont l'intérêt vient de ce qu'ils sont des fragments peu altérés de la matière primitive du système solaire, qui présentent des analogies frappantes avec les glaces interstellaires.
- Des poussières très vraisemblablement d'origine interstellaire (de par leur composition chimique et isotopique) ont été repérées dans des météorites et aussi collectées sur les glaces antarctiques ou dans la haute atmosphère.

Au-delà même du système solaire, la planétologie connaît une nouvelle révolution : celle de la découverte et de l'étude de systèmes planétaires autour d'autres étoiles. L'événement récent le plus remarqué de l'astronomie est sans doute en effet la découverte de la première planète extra-solaire, autour de l'étoile "ordinaire" 51 Pegasi. Cette découverte a été faite par un groupe suisse à l'Observatoire de Haute-Provence. Cette observation n'est plus unique. Le raffinement de la méthode utilisée devrait permettre la détection de planètes nettement plus petites que Jupiter. Il existe d'autres possibilités de détection. Des objets de plus faible masse orbitant autour d'un pulsar ont été découverts par un chronométrage extrêmement précis. Nous avons parlé de l'effet de lentille gravitationnelle sur des étoiles d'arrière-plan, mais il faut aussi mentionner la possibilité d'observer des occultations d'étoiles par leurs planètes ; surtout, l'astrométrie ultra-précise avec des interféromètres au sol ou dans l'espace doit aussi permettre de découvrir des planètes extra-solaires.

L'observation directe de ces planètes, et *a fortiori* de traces de vie sur leur surface, est considérablement plus difficile. C'est un objectif à long

terme de l'interférométrie dans l'espace. Il faut noter cependant que la lumière réfléchie de l'étoile 51 Pegasi sur sa planète vient d'être directement détectée par une collaboration franco-suisse. Un disque pré-planétaire autour de l'étoile jeune

Pictoris a été très bien étudié ; il pourrait contenir des comètes, et des planètes sont peut-être en train de s'y former. L'interférométrie dans les domaines millimétrique et infrarouge est en train de détecter d'autres disques circumstellaires où se formeront plus tard des planètes.

La découverte de nouveaux systèmes planétaires a évidemment un impact indirect sur notre compréhension du système solaire. Elle doit permettre de savoir si le système solaire a une structure "générique", avec des petites planètes rocheuses au centre et des géantes gazeuses à l'extérieur, ou si cet arrangement est tout simplement fortuit, sans contrepartie systématique dans les autres systèmes planétaires. La seconde question brûlante est à l'évidence celle de l'existence de formes de vie sur d'autres planètes. Elle induit des recherches à la fois sur les conditions propices à l'apparition de la vie et sur les tests observationnels qui pourraient trahir l'existence de la vie sur une planète lointaine. Ces recherches sont elles-mêmes couplées à une nouvelle discipline, qui cherche à savoir comment se sont fabriquées les molécules prébiotiques : l'exobiologie.

L'exobiologie est inséparable de l'étude des planètes et de la Terre. C'est un domaine très pluridisciplinaire en évolution rapide. L'étape un peu naïve des expériences de type Urey-Miller, où l'on essayait de synthétiser des molécules "vivantes" à l'aide d'étincelles dans un mélange gazeux, est dépassée. Un tel mécanisme ne semble d'ailleurs pas pouvoir s'appliquer à la Terre. L'hypothèse d'une origine extra-terrestre de la matière organique, apportée par des météorites issues de la fragmentation de comètes, attire de plus en plus l'attention. L'analyse de certaines météorites met d'ailleurs en évidence des produits aromatiques complexes qui pourraient être de bons matériaux prébiotiques. On peut aussi essayer de comprendre le fonctionnement de réacteurs planétaires de chimie prébiotique. De ce point de vue, Titan est un objet d'étude privilégié : son atmosphère pauvre en oxygène contient des molécules

organiques qui existent aussi dans les nuages interstellaires ; or l'on perçoit, nous l'avons dit, des relations entre le milieu interstellaire et les comètes, qui pourraient contenir des grains interstellaires.

1. 5 L'ENVIRONNEMENT SPATIAL : COURONNE SOLAIRE, RELATIONS SOLEIL-TERRE, HÉLIOSPHÈRE

L'environnement spatial peut être défini comme celui dans lequel baignent les véhicules spatiaux, satellites et sondes interplanétaires. Pour cette raison, son étude a connu un essor extraordinaire, puisque c'était le premier milieu hors de la Terre à bénéficier de mesures *in situ*. Elle se poursuit avec avant tout des objectifs de compréhension fondamentale du milieu, mais aussi dans la perspective de modéliser et peut-être un jour de prévoir sa "météorologie" pour le bénéfice des utilisateurs spatiaux (agences et industriels).

L'environnement spatial se décrit essentiellement à partir des outils de la physique des plasmas : la couronne solaire et son extension dans l'espace interplanétaire, le vent solaire, les ionosphères et magnétosphères de la Terre, des planètes et des comètes sont en effet des plasmas. La physique de ces milieux est dominée par les interactions entre les différents plasmas produits par les différents corps, et le champ magnétique produit par les dynamos solaires et planétaires. Ces interactions ont le plus souvent des manifestations violentes et actuellement difficiles à prévoir, au cours desquelles des quantités importantes d'énergie magnétique sont dissipées pour chauffer le plasma ou l'accélérer : éruptions solaires, sous-orages magnétosphériques. Elles produisent notamment les aurores polaires.

C'est essentiellement sur les régions d'interfaces entre les différents domaines de plasmas et de champs magnétiques, les "régions critiques", que sont concentrés les échanges de matière, d'impulsion et d'énergie dans l'environnement spatial. L'essentiel des efforts de recherche actuels se concentre sur l'élucidation des mécanismes qui y

règnent, ce qui représente un point de passage obligé dans la perspective d'en prédire la météorologie.

L'un des principaux axes de recherche de cette discipline concerne l'étude des relations Soleil-Terre. On est encore loin de connaître le détail des mécanismes par lesquels l'activité solaire influence les phénomènes terrestres, mais les progrès sont sensibles et notre pays y prend une part importante. On commence en tous cas à bien comprendre l'origine de l'activité solaire globale, qui est liée au champ magnétique et donc au fonctionnement du cycle de la dynamo solaire. Par contre, les mécanismes des éruptions et les éjections de matière, et l'accélération du vent solaire sont encore mal connus. Les efforts théoriques appuyés par les observations avec le télescope THEMIS et le satellite SOHO devraient amener des résultats majeurs dans ce domaine. Dans l'environnement terrestre, les observations visent à l'étude globale et détaillée des "régions critiques" au sein desquelles sont concentrés les échanges : choc amont de la Terre, magnétopause, queue magnétique et son feuillet de plasma, zones aurorales. Ces études s'enrichissent de la planétologie comparée, qui concerne ici les enveloppes de plasmas des planètes et des comètes, avec ou sans champ magnétique.

La physique de l'environnement spatial se trouve donc à un carrefour entre la physique des enveloppes fluides de notre planète, l'astronomie solaire et l'étude du système solaire. Elle est également liée à la physique des plasmas, car les atmosphères ionisées de la Terre et des planètes constituent de superbes laboratoires naturels où règnent des conditions impossibles à reproduire par nos expériences. Notre communauté nationale est particulièrement active et très bien reconnue au plan international dans cette discipline.

2 - LES STRATÉGIES D'OBSERVATION DE L'ASTRONOMIE

L'apport des observations nouvelles, sources permanentes de découvertes et de surprises, est déterminant dans la marche de l'astronomie. Dans les cinquante dernières années, les stratégies d'observations ont été bouleversées par deux faits majeurs : l'apparition de la radioastronomie, puis celle de l'astronomie spatiale qui a élargi, pour l'exploration de l'univers lointain, le spectre accessible à l'ensemble du spectre électromagnétique et permis l'exploration *in situ* du système solaire.

2. 1 L'EXPLORATION DE L'UNIVERS LOINTAIN : UNE APPROCHE MULTI-LONGUEURS D'ONDE

Jusqu'à il y a 50 ans, l'observation en astronomie ne se faisait que dans le domaine visible : il en est résulté une vision partielle (on pourrait même dire partiale) de l'Univers. L'avènement de la radioastronomie, de l'astronomie infrarouge et de l'astronomie spatiale a permis de découvrir de nouveaux objets insoupçonnés (rayonnement micro-onde de l'univers, quasars, pulsars, proto-étoiles, nuages moléculaires, sources de rayons X et gamma, etc.) ; mais surtout, conjointement avec les progrès de la physique et de la modélisation numérique, il a permis une approche multi-longueurs d'onde des objets astronomiques qui s'est traduite par une compréhension approfondie de leur nature et une accélération vertigineuse de nos connaissances. C'est dire l'importance des techniques d'observation. Ces techniques sont nécessairement spécialisées par domaine de longueur d'onde, les détecteurs n'étant en général sensibles qu'à un intervalle spectral étroit (cette situation pourrait cependant changer avec l'introduction de nouveaux détecteurs supraconducteurs à très grand spectre). Nous allons maintenant parcourir le domaine des longueurs d'ondes, en allant des plus courtes aux plus longues.

L'astronomie des hautes énergies

L'atmosphère terrestre est opaque au rayonnement gamma et X ; en conséquence, l'observation se fait ici à partir de l'espace. Une exception : les rayons gamma de très haute énergie sont détectables du sol par l'observation des gerbes de particules chargées qu'ils engendrent dans l'atmosphère terrestre. Le point commun de tout ce domaine spectral est que les sources observées sont à haute température.

Il existe en France plusieurs programmes de détection de rayons gamma de très haute énergie, en cours ou proposés par des groupes de physiciens : CAT pour des énergies supérieures au TeV, et le projet CELESTE aux énergies intermédiaires (20-300 GeV). Dans un domaine voisin, il existe aussi de grands projets de détection de particules cosmiques chargées (projet international AUGER) et de détection de neutrinos après GALLEX, les projets HELLAZ et NESTOR. La communauté astronomique proprement dite ne s'est pas encore beaucoup intéressée à ces programmes, pour lesquels des discussions ont heureusement commencé entre astronomes et physiciens. Une large fédération entre astronomes et physiciens est également nécessaire dans le domaine de la détection des ondes gravitationnelles (projet VIRGO en cours de réalisation, qui justifie à tout le moins la création d'un groupe de réflexion et de concertation). À très long terme, l'ASE envisage un programme de détection d'ondes gravitationnelles de très basses fréquences par interférométrie entre plusieurs satellites, qui présente un très grand intérêt pour la cosmologie.

L'implication de la France dans l'astronomie gamma est très importante. Elle s'est traduite par la construction de l'expérience SIGMA pour le satellite soviétique GRANAT. L'ASE a décidé la construction du satellite INTEGRAL de spectroscopie gamma : son lancement est prévu en 2001, et l'implication française est forte. La communauté qui s'intéresse directement à l'astronomie X est pour l'instant plus réduite, bien que nous soyons des utilisateurs des satellites étrangers ROSAT, ASCA et SAX. Astronomes et physiciens s'impliquent dans XMM, la deuxième "pierre angulaire" du programme HORIZON 2000 de l'ASE, satellite d'imagerie et de spectroscopie X dont le lancement est prévu fin 1999.

Nous aurons par ailleurs une participation intéressante au satellite de spectroscopie en ultraviolet lointain FUSE/LYMAN de la NASA, qui sera lancé en 1998.

L'astronomie optique

Ici nous considérons l'astronomie optique au sens large, en englobant le télescope spatial Hubble et les observations au sol dans l'infrarouge. Ce domaine traditionnel de l'astronomie connaît une profonde et rapide évolution, en raison des possibilités ouvertes non seulement par l'astronomie spatiale, mais aussi par l'apparition des télescopes géants, de l'optique adaptative, et de l'interférométrie au sol.

Il existe dans le monde de nombreux télescopes d'un diamètre voisin de 4 mètres. Mais la tendance actuelle est au gigantisme, avec des instruments de l'ordre de 8-10 m dont deux exemplaires sont déjà en service aux États-Unis (les deux télescopes Keck). Cependant les télescopes de 4 m ont encore de beaux jours devant eux à condition d'être relativement spécialisés, par exemple pour faire des études statistiques ou pour repérer les candidats pour l'observation avec les très grands télescopes : on peut par exemple les munir comme le télescope Canada-France-Hawaï d'un détecteur mosaïque de très grand format permettant de couvrir un champ de l'ordre du degré, MEGACAM. Les télescopes plus petits, de la classe des 1-2 mètres, peuvent encore permettre de belles découvertes si ils sont munis d'instruments très performants fonctionnant pour des programmes de longue haleine (cf. la découverte de la première planète extra-solaire avec le télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute-Provence). L'exploitation d'énormes quantités de données obtenues de façon systématique avec de petits télescopes (projets EROS ou DUO) inaugure une nouvelle façon de faire de l'astronomie. Il importe donc de préserver un équilibre entre les différentes classes de télescopes.

De ce point de vue, notre situation est satisfaisante. Nous aurons accès aux quatre télescopes de 8 m du Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire Européen Austral (ESO) au Chili, où notre

participation est d'environ 25 %. La mise en service de ces télescopes s'échelonne entre 1998 et 2000 ; il est seulement dommage que le VLT arrive nettement après les télescopes Keck. Nous utilisons le télescope de 3,60 m de diamètre Canada-France-Hawaï (CFHT ; 45 % pour la France) qui est un des meilleurs instruments du monde dans un site exceptionnel et présente une instrumentation focale unique (grande mosaïque de détecteurs, spectro-imageurs visible et infrarouge, etc.). Nous avons également accès pour 25 % aux télescopes de 3,60 m et 3,50 m de l'ESO. En ce qui concerne les plus petits télescopes, il y a notamment en France le 1,93 m et le 1,52 m de l'Observatoire de Haute-Provence, tous deux munis d'une excellente instrumentation auxiliaire, et les télescopes de 2 m et de 1 m (planétaire) de l'Observatoire du Pic du Midi, qui resteront utilisables grâce au programme de restructuration et de diversification touristique en cours. Nous utilisons plusieurs petits télescopes à l'ESO, dont le télescope de 1 m spécialisé dans un inventaire systématique du ciel austral dans l'infrarouge proche (projet DENIS piloté par la France). Enfin le télescope solaire spécialisé THEMIS vient d'être mis en service aux Canaries. Tous ces télescopes sont munis d'une instrumentation auxiliaire dans laquelle la France a souvent pris une grande part, car il existe une forte tradition nationale en instrumentation optique. Il manque cependant une instrumentation à finalité cosmologique, qui est une vocation prioritaire des grands télescopes. Le spectro-imageur multi-objets VIRMOS pour le VLT, largement issu de la communauté française, devrait combler ce manque.

La France n'a pour l'instant pas accès à un télescope de la classe des 10 m dans l'hémisphère Nord, alors que la plupart des autres pays où l'astronomie est très développée auront accès à des télescopes géants dans les deux hémisphères. Il faut cependant noter que les latitudes du VLT de l'ESO et du télescope CFH sont suffisamment voisines pour garantir qu'on ne laissera pas aux 10 m américains l'apanage du suivi spectroscopique des objets faibles repérés au CFH.

L'autre grande tendance de l'astronomie optique est l'amélioration du pouvoir séparateur. Deux voies sont ouvertes à cette fin. Pour les observations à un seul télescope, c'est l'optique adapta-

tive, imaginée dans notre pays en même temps que par les militaires aux États-Unis. Cette technique permet de corriger en temps réel les irrégularités de la propagation de la lumière dues à l'atmosphère terrestre et de bénéficier du pouvoir de résolution angulaire théorique du télescope. Des progrès importants restent à faire dans son développement, qui est une priorité instrumentale française. Si l'on veut faire encore mieux, et dépasser le pouvoir séparateur théorique d'un télescope unique, il faut recourir à l'interférométrie optique, qui permet d'accéder à des pouvoirs de résolution angulaire de l'ordre du millième de seconde d'arc en combinant la lumière collectée par plusieurs télescopes. Notre pays est pionnier en la matière, et nous possédons sur le sol national une réalisation expérimentale mais qui fournit de beaux résultats, l'interféromètre GI2T de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Après une longue attente, le projet interférométrique de l'ESO VLT-VISA vient de démarrer, avec un financement spécial de la France et de l'Allemagne.

On pourrait penser qu'il est inutile d'observer de l'espace les longueurs d'ondes qui parviennent au sol. Ce serait oublier le fait que la turbulence de l'atmosphère détériore beaucoup les images astronomiques. Même en tenant compte des progrès de l'optique adaptative, l'observation spatiale restera toujours plus sensible et plus facile. Les résultats magnifiques obtenus par le Télescope Spatial Hubble (dont nous sommes de bons utilisateurs) sont là pour en témoigner. Pour l'astrométrie, le satellite européen HIPPARCOS nous a montré l'extrême précision que l'on pouvait atteindre sur les positions des étoiles, qui représente un gain de plus de deux ordres de grandeur par rapport à l'observation au sol (de plus HIPPARCOS a mesuré l'éclat d'un million d'étoiles avec une précision extrême). Cependant l'astrométrie au sol peut, dans une certaine mesure, compenser l'imprécision des observations par leur durée, et les deux méthodes sont complémentaires. Dans le futur, d'autres gains sont à attendre en astrométrie grâce aux méthodes interférométriques, que ce soit au sol ou dans l'espace. C'est entre autres le but d'un des grands projets de l'ASE pour son plan HORIZON 2000+, le satellite astrométrique GAIA. Un autre domaine où l'observation spatiale offre des avantages considérables est la sismologie solaire et stellaire. C'est pourquoi le satellite SOHO comporte plusieurs ins-

truments optiques d'héliosismologie ; pour l'astérisismologie, après l'échec de la sonde MARS 1996 qui emportait l'instrument EVRIS, l'espoir réside dans un petit satellite proposé au CNES : COROT.

L'astronomie infrarouge et submillimétrique

À partir de quelques milliers de nanomètres, les ondes électromagnétiques ne passent à nouveau plus à travers l'atmosphère et il faut les observer par des moyens spatiaux. L'intérêt du domaine est que l'essentiel de l'énergie du milieu interstellaire et même des galaxies tout entières y est rayonné. Le lancement par l'ASE du satellite infrarouge ISO en 1995 est en train de le renouveler. Il y a dans le monde d'autres projets de satellites infrarouges, dont certains sont approuvés. Ces satellites s'arrêtent à environ 0,2 mm de longueur d'onde. Le satellite cosmologique COBRAS-SAMBA puis le grand projet FIRST, la dernière "pierre angulaire" du programme HORIZON 2000 de l'ASE (lancement prévu en 2007) fonctionneront à des longueurs d'onde plus grandes. En attendant, le ballon français PRONAOS vient de fournir de très beaux résultats et sera peut-être relancé. Un autre ballon franco-suédois, PIROG, doit être lancé en 1997, suivi en 1998 par le petit satellite suédo-franco-canadien-finlandais ODIN.

La radioastronomie

Comme l'astronomie optique, la radioastronomie connaît une course au gigantisme. L'ère des grands radiotélescopes classiques à miroir orientable unique paraît terminée. Par contre, il existe un nombre croissant d'interféromètres, permettant à la fois une bonne résolution angulaire et une bonne sensibilité. L'événement le plus marquant de la conjoncture est la mise en service en 1997 du Giant Meter Radio Telescope (GMRT) indien, un interféromètre qui couvre les longueurs d'onde de 21 cm à plusieurs mètres. On constate par ailleurs une forte poussée vers les ondes millimétriques et submillimétriques.

Notre pays occupe une bonne position dans ce contexte international. Le grand radiotélescope décimétrique de Nançay va connaître un renouveau

après modernisation. La France a 45 % de participation dans un très grand équipement qu'elle partage avec l'Allemagne et l'Espagne : le radiotélescope de 30 m et l'interféromètre à 5 antennes de 15 m de diamètre de l'Institut de Radio Astronomie Millimétrique (IRAM). Ce potentiel est pour l'instant unique au monde, mais la compétition est sérieuse. L'addition d'une sixième antenne à l'interféromètre est reconnue par les différentes instances comme la principale priorité instrumentale de l'astronomie française. À plus long terme, il faut conserver la position de notre pays en participant aux projets qui fleurissent dans ce domaine, d'autant plus que les détecteurs et antennes développés pour ces instruments ont d'importantes applications (sondage de l'atmosphère, télécommunications civiles et militaires, etc.). En ondes centimétriques-décimétriques, un très grand instrument est proposé par les Pays-Bas, le Square-kilometer array. En ondes millimétriques, on trouve des grands projets d'interféromètre aux États-Unis, au Japon et en Europe. Un ou plusieurs de ces projets finiront certainement par aboutir en raison de leur grand intérêt pour la cosmologie (détection des galaxies jusqu'aux plus grandes distances concevables) et pour l'étude de la formation stellaire. Le projet européen, le Large Southern Array, est proposé par de nombreux pays dont le nôtre, sous l'égide de l'IRAM et de l'ESO : insistant sur le domaine millimétrique, il serait complémentaire du projet américain MMA, de moins grande surface collectrice et orienté vers le submillimétrique.

2. 2 L'EXPLORATION DE L'ENVIRONNEMENT SPATIAL ET DU SYSTÈME SOLAIRE

L'exploration de l'environnement spatial

L'exploration de l'environnement spatial de la Terre repose sur l'utilisation conjuguée de moyens au sol et de satellites dédiés à l'étude de la magnétosphère et de ses interfaces avec la haute atmosphère, l'ionosphère et le vent solaire. Elle se situe dans le cadre du Programme International sur les

Relations Soleil-Terre (ISTP). Au sol, le dispositif est organisé autour du radar européen à diffusion incohérente EISCAT, observatoire ionosphérique international implanté dans les trois pays nordiques pour l'observation des zones aurorales. Sa récente extension par le radar ESR au Spitzberg, bientôt complété par une antenne japonaise, ouvre le champ d'investigation à toute la calotte polaire boréale. On trouve aussi des moyens plus légers, notamment la chaîne SUPERDARN de radars cohérents, dont la France gère l'un des éléments. L'objectif futur prioritaire est la réalisation d'une chaîne SUPERDARN réduite en Antarctique, à laquelle pourrait participer l'Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaire (IFRTP).

Dans l'espace, la stratégie d'exploration de la magnétosphère était organisée autour de la mission CLUSTER. La stratégie d'observation multi-points proposée pour CLUSTER, mission composée de quatre satellites identiques effectuant des mesures simultanées, est une révolution méthodologique. L'échec du premier tir d'Ariane 5 a porté un coup d'arrêt à ce projet, mais l'ASE étudie actuellement différents scénarios permettant à CLUSTER de renaître de ses cendres.

À côté de CLUSTER, deux autres missions voient une forte participation française. La mission GGS de la NASA, consacrée au bilan global des échanges d'énergie dans la magnétosphère, compte plusieurs expériences à contribution française à bord de ses satellites WIND et POLAR, déjà lancés. La mission russe bi-satellitaire INTERBALL, qui vient d'être lancée avec succès, est consacrée à l'étude des mécanismes de couplage entre la magnétosphère externe et les zones aurorales. À l'horizon plus lointain, le projet européen IBIZA aborde la même physique par une stratégie proche de celle de CLUSTER, avec des capacités instrumentales qui seront très sensiblement supérieures à celle d'INTERBALL.

L'étude à grande échelle de l'héliosphère, des régions d'accélération du vent solaire jusqu'à l'héliopause, a été renouvelée avec la sonde ULYSSE de l'ASE, qui pour la première fois a exploré les hautes latitudes écliptiques et survolé les pôles du soleil. Elle a mis en évidence la forte anisotropie en latitude du vent solaire. À plus

grande distance, les deux sondes VOYAGER continuent à progresser vers l'interface du vent solaire et du milieu interstellaire, dont elles ont détecté des signes avant-coureurs. Au-delà de ces succès, la prospective se tourne vers l'exploration *in situ* de la couronne solaire : un projet de sonde solaire est étudié par plusieurs agences.

L'exploration du système solaire

On a vu que l'exploration de notre système s'organise autour des trois thèmes prioritaires au Programme National de Planétologie, à chacun duquel correspond un programme spatial ambitieux, tandis que les études à partir du sol (Pic-du-Midi, OHP, Nançay, CFH et IRAM) sont nombreuses et diverses.

Le thème de l'étude comparative des planètes telluriques, qui a choisi Mars comme objet d'étude prioritaire, est organisé autour du programme d'exploration spatial de cette planète. L'exploration de Mars joue de malchance : après l'échec total de Mars Observer et l'échec partiel des deux sondes PHOBOS, le tir de la sonde russe MARS 96 (sur laquelle la participation française était forte) a échoué. La sonde américaine Mars Global Surveyor a par contre été lancée avec succès ; Mars Pathfinder devrait bientôt suivre. L'avenir est incertain, car des réorganisations du programme sont nécessaires. À côté de Mars, Vénus a fait l'objet d'une mission moins spectaculaire mais extrêmement fructueuse, l'orbiteur MAGELLAN de la NASA, avec des contributions remarquées des équipes françaises. À plus long terme, les regards se tournent vers Mercure, la moins bien connue des planètes telluriques. Le programme HORIZON 2000+ de l'ESA, prolongement du programme HORIZON 2000, a fait de la réalisation d'un orbiteur de Mercure l'une de ses deux nouvelles pierres angulaires. Quant à la Lune, la plus proche des "planètes" telluriques, explorée par l'homme dès la fin des années 60, elle conserve son intérêt : même si elle ne semble pas à l'ordre du jour dans le contexte économique actuel, l'émergence d'un nouveau grand programme lunaire est peut-être possible après la réalisation de la station spatiale internationale ALPHA.

L'étude du système de Saturne, et plus particulièrement de son satellite Titan, sera réalisée par la mission CASSINI avec la sonde HUYGENS qui descendra dans l'atmosphère de Titan (NASA et ASE). Cette mission d'inspiration initialement française contribue à souder la communauté planétologique européenne et à consolider une tradition de collaboration transatlantique déjà très forte. Elle sera lancée en juillet 2004 et atteindra Saturne après un périple qui lui aura fait survoler Vénus, la Terre, un astéroïde et Jupiter.

Enfin, l'étude de l'origine du système solaire a axé sa stratégie sur l'exploration des objets les moins évolués. Les noyaux cométaires et certains astéroïdes sont, de ce point de vue, les objets les plus intéressants. C'est pourquoi l'exploration d'un noyau cométaire a été choisie par l'ASE pour être la troisième pierre angulaire de son programme HORIZON 2000 : la mission ROSETTA devrait être lancée en 2003 pour se mettre en orbite autour d'un noyau cométaire (celui de la comète P/Wirtanen) en 2011 et y envoyer un atterrisseur.

L'exploration spatiale des petits corps du système solaire restera épisodique ; c'est pourquoi l'étude de ces objets par les télescopes terrestres, et la collecte et l'analyse des poussières extra-terrestres au sol (sur les grands glaciers polaires) et en orbite (par les collecteurs de poussières cométaires de la station MIR), en sont les compléments indispensables. La communauté française est présente et motrice dans tous les domaines.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES : VERS LE COLLOQUE DE PROSPECTIVE DE 1997

La situation du parc instrumental accessible aux astronomes français est globalement satisfaisante, grâce à l'ASE, au CNES, aux TGE de l'INSU réalisés en coopération internationale, mais aussi à la rénovation et au redéploiement partiel des sites nationaux et aux programmes en coopération avec les physiciens. Dans un contexte de stagnation des budgets et de réduction forcée de la population des ITA du CNRS, le premier souci est d'assurer une utilisation scientifique optimale des moyens programmés existants ou en cours de réalisation, tout en entamant de nouveaux projets au rythme des redéploiements. Cela implique un effort important de réflexion. Au sein du tissu des laboratoires relevant principalement de la section 14, il faudra créer, à côté des laboratoires spatiaux, des pôles de développements techniques capables de réaliser des instruments pour les foyers de la nouvelle génération de télescopes, dans le cadre de consortia internationaux et avec un mode de gestion des projets s'inspirant du spatial. Il faut aussi assurer l'utilisation optimale des données, en créant des centres d'analyse de données gérant des bases de données accessibles à toute la communauté. Le meilleur exemple de ce type d'activité est la base de données SIMBAD du Centre de Données Astronomiques de Strasbourg (CDS), qui est utilisée et appréciée dans le monde entier. D'autres composantes indispensables à l'utilisation optimale des données sont la théorie et la modélisation avec l'informatique appropriée, qui font progresser l'interprétation des observations ou en suggèrent de nouvelles.

En parallèle, le dialogue avec les autres disciplines doit être renforcé. On en a vu la variété et les motivations. Cette pluridisciplinarité n'est nullement incompatible avec la réaffirmation des liens privilégiés qu'entretient l'astronomie avec les sciences de la Planète Terre au sein des Sciences de l'Univers. Ces deux aspects seront favorisés par la création de

nouveaux programmes interdépartementaux au sein du CNRS, à condition qu'ils aient, quand c'est justifié, un caractère pluri-organismes.

Enfin, l'astronomie devra réaffirmer ses relations privilégiées avec la société, car elle répond ou doit répondre à deux attentes essentielles du public : le suivi systématique des phénomènes naturels (systèmes de référence spatio-temporels, activité solaire et ses effets sur l'environnement spatial ou terrestre, établissement de la trajectoire des corps du système solaire, etc.), et l'intérêt culturel considérable du public pour l'astronomie, en particulier chez les jeunes.

À ce second titre, la communauté se doit de renforcer sa participation à l'enseignement et à la vulgarisation de l'astronomie à tous les niveaux. Une réflexion a lieu à ce sujet, en particulier au sein du MENESR, et concerne tous les acteurs de la recherche astronomique. Son enjeu est très important, non seulement pour l'astronomie elle-même, mais aussi parce que cette démarche est susceptible de défendre et de développer la culture scientifique en général : les exemples empruntés à l'astronomie ont un impact particulièrement grand dans l'ensei-

gnement des sciences et de la philosophie. Il sera alors possible, sous cette condition, d'assurer de façon plus large et plus équitable la présence de l'astronomie au sein des établissements d'enseignement supérieur.

Enfin, un effort de longue haleine devra être poursuivi pour construire une véritable communauté astronomique européenne. Cet effort devra partir des sociétés savantes européennes, des agences de moyens (ESA) et des sociétés internationales (EISCAT, ESO, IRAM, ...), afin de doter les astronomes européens des moyens d'une réflexion prospective commune, et d'assurer une coordination efficace des différentes agences.

Voilà quelques-uns des thèmes que la communauté astronomique française commence à aborder, dans la réflexion prospective nationale qui vient de s'ouvrir sous l'égide de l'INSU, pour aboutir à une synthèse lors du colloque de la discipline qui se tiendra à l'automne 1997. Les enjeux scientifiques en sont aussi considérables qu'exaltants : souhaitons que la communauté française puisse préserver les talents et les moyens nécessaires pour leur faire face.