

2006

ACADÉMIE DES SCIENCES

LA RECHERCHE SPATIALE FRANÇAISE

Sous la direction de
JEAN-LOUP PUGET



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

La recherche spatiale française

RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE N° 22

Animateur : Jean-Loup PUGET

ACADÉMIE DES SCIENCES



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Rapports sur la science et la technologie

- *Sciences et pays en développement. Afrique subsaharienne francophone*
RST n° 21, 2006.

Conception de la maquette intérieure : Béatrice Couëdel

© 2006, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN 2-86883-887-1

Académie des sciences

Rapport Science et Technologie

Le Comité interministériel du 15 juillet 1998, à l'initiative du ministre de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, a confié à l'Académie des sciences l'établissement du rapport biennal sur l'état de la science et de la technologie.

Pour répondre à cette demande, l'Académie des sciences a mis en place en son sein le Comité « **Rapport Science et Technologie** » (RST), chargé de choisir les sujets d'étude et de suivre les travaux.

Chaque thème retenu est conduit par un groupe de travail animé par un membre ou un correspondant de l'Académie, entouré d'experts.

Chaque rapport est soumis au Comité RST, à un Groupe de lecture critique, et à l'Académie des sciences.

Entre 1999 et 2005, vingt rapports ont ainsi été édités et remis au ministre délégué à la Recherche.

COMPOSITION DU COMITÉ RST

Alain ASPECT

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique, professeur à l'École polytechnique

Jean-François BACH

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences — Professeur à l'université René Descartes

Jean-Michel BONY

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'École polytechnique

Christian BORDÉ

Correspondant de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

Édouard BRÉZIN

Président de l'Académie des sciences — Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie et à l'École polytechnique

Marie-Lise CHANIN

Correspondant de l'Académie des sciences — Directeur de recherche émérite au Centre national de la recherche scientifique

Geneviève COMTE-BELLOT

Correspondant de l'Académie des sciences — Professeur émérite de l'École centrale de Lyon

François CUZIN

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'université de Nice-Sophia-Antipolis

Jean DERCOURT

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences — Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Christian DUMAS

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'École normale supérieure de Lyon

Michel FARDEAU

Correspondant de l'Académie des sciences — Professeur au Conservatoire national des arts et métiers, directeur médical et scientifique à l'Institut de myologie (Hôpital de la Pitié Salpêtrière)

Jules HOFFMANN

Vice-président de l'Académie des sciences — Directeur de l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire de Strasbourg

Jean-Pierre KAHANE

Membre de l'Académie des sciences — Professeur émérite à l'université Paris-Sud Orsay

Daniel KAPLAN

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de la société Fastlite

Henri KORN

Membre de l'Académie des sciences — Professeur honoraire à l'institut Pasteur et directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale

Nicole LE DOUARIN

Secrétaire perpétuelle honoraire de l'Académie des sciences — Professeur honoraire au Collège de France

Jean-Louis LE MOUËL

Membre de l'Académie des sciences — Physicien à l'Institut de physique du globe de Paris

François MATHEY

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique, professeur à l'École polytechnique

René MOREAU

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'Institut national polytechnique de Grenoble

Olivier PIRONNEAU

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Jean-Pierre SAUVAGE

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

Moshe YANIV

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'Institut Pasteur et directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

Coordination éditoriale :

Jean-Yves CHAPRON

Directeur du service des Publications de l'Académie des sciences, assisté de **Joëlle FANON**

AVANT-PROPOS

JEAN DERCOURT

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

L'utilisation de l'espace exige des infrastructures très lourdes : la production des lanceurs et des satellites, des stations de lancement et de communication. De nombreux secteurs stratégiques en ont besoin : défense, télécommunications, navigation, surveillance terrestre, recherche spatiale. Certains états dont la France ont reconnu très tôt ce rôle stratégique. Plus récemment on a vu émergé dans ce secteur des états en développement rapide comme l'Inde et la Chine et la Commission européenne a commencé à y jouer un rôle qui ne pourra qu'être grandissant.

La recherche spatiale a joué un rôle clé dans le développement des techniques spatiales. Elle occupe une place très particulière au sein de la recherche française : elle résulte de la volonté de l'État, elle associe les domaines civils et militaires, elle est fortement structurée autour d'une agence de programmation et de moyens (le Centre national d'études spatiales) et d'une agence de recherche (le CNRS avec ses deux Instituts : l'Institut National des Sciences de l'Univers et l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique de Particules) associant des chercheurs de cet établissement et ceux des universités. Très créatrice d'innovations technologiques, elle est fortement associée au milieu industriel. Elle est intégrée aux structures analogues des autres pays européens, en une Agence spatiale européenne et elle collabore avec les pays historiquement leaders du domaine : les États-Unis, l'URSS puis, désormais, la Russie ; elle s'associe aujourd'hui aux puissances nouvelles dans ce domaine : Japon, Inde, Chine et Brésil.

La recherche spatiale est une source dominante des données dans plusieurs secteurs en particulier dans les sciences de l'environnement. Dans ce secteur, à la suite des satellites dédiés à la recherche arrivent des satellites opérationnels dont les satellites de météorologie ont été le premier exemple. La recherche spatiale contribue à la définition mais est aussi utilisatrice de ces satellites. L'imagerie de plus en plus fine de toute la Terre (avec la filière française des satellites SPOT) est un autre exemple d'utilisation conjointe de l'espace pour des besoins opérationnels et scientifiques.

La recherche spatiale a un très fort impact sur les opinions publiques qui voit grâce à elle l'état de la planète en temps réel et ouvre une nouvelle frontière à la tendance naturelle de l'humanité vers l'exploration.

Science lourde, très onéreuse, nécessitant des programmations pluri-annuelles, la recherche spatiale occupe, dans la recherche française, une place originale ; un ministère entier lui fut consacré. Elle ne peut être comparée qu'au domaine de la recherche nucléaire, avec ses applications civiles et militaires.

Aujourd'hui, un profond remodelage structurel de la programmation et du financement est en cours. En 2004, la Commission européenne a élaboré un Livre blanc, auquel le Comité de recherche spatiale de l'Académie des sciences a contribué par un avis.

La première partie de ce rapport expose la stratégie et la structuration de la programmation au sein de l'Europe, telles que les comprend l'Académie. La deuxième présente les forces et les faiblesses de la recherche spatiale française, analysées par disciplines, et propose des recommandations pour une bonne adaptation aux stratégies européenne et mondiale en cours d'élaboration, aux côtés des programmes nationaux de son propre ressort. Les documents analytiques élaborés peuvent être consultés sur le site de l'Académie (www.academie-sciences.fr). Compte tenu de son objectif, le rapport n'a pas ou peu examiné des pans importants du domaine spatial qu'on peut regrouper sous la rubrique « la recherche pour l'espace » et qui recouvre les apports d'autres secteurs de la recherche aux technologies spatiales, pas plus que les liens entre recherche civile et militaire.

Première partie

La recherche spatiale mondiale remporte aujourd'hui de très beaux succès, conséquences des travaux et des investissements importants qui, tous, ont été à la base de découvertes scientifiques et techniques largement disséminées hors du champ spatial strict. Néanmoins, en Europe, cette recherche traverse une crise profonde :

- le vieillissement des structures et des acteurs pionniers de la recherche spatiale et le problème de leur remplacement ;
- la compétition accrue avec les États-Unis où les moyens mis à la disposition de ce secteur augmentent face à une décroissance en Europe où le climat diplomatique et financier est peu favorable à une coopération équilibrée ;

- l'affaiblissement du partenaire russe, avec lequel des programmes bilatéraux ambitieux avaient pu être développés ;
- une faible volonté de concevoir des programmes européens, liés à la volonté pour chaque État, d'exiger le « juste retour » programme par programme qui affaiblit l'Agence Spatiale Européenne ;
- une surestimation des besoins commerciaux en lanceurs de satellites de télécommunications, et la conception erronée de satellites opérationnels financés principalement par le secteur privé qui a conduit à une politique de nouveaux lanceurs ne couvrant qu'une partie des besoins en particulier pour la recherche.

Des recommandations sont proposées pour établir une politique européenne fondée, d'une part, sur un accès autonome à l'Espace et, d'autre part, sur un rapprochement avec les pays accédant depuis peu à ce domaine (Japon, Inde, Chine, Brésil). Les recommandations de cette première partie précisent, pour la recherche française, celles du Livre blanc de la Commission européenne.

Seconde partie

La seconde partie du rapport s'attache à éclaircir ce que seront les principales questions des vingt prochaines années. Un exercice de prospective est toujours délicat et rarement réussi, à une échéance de vingt ans. Mais il est, néanmoins, crédible pour les recherches en sciences spatiales, car les délais techniques, organisationnels et financiers conduisent à des opérations longues à préparer et à interpréter : une dizaine d'années est un délai minimum. La prospective à 20 ans est donc raisonnable et significative.

Certes, les aléas de l'histoire bouleversent les prévisions. La disparition de l'URSS et son évolution vers des États indépendants a réduit considérablement l'effort spatial russe, avec lequel les équipes françaises étaient liées. Les retards successifs mis à construire la station spatiale internationale se sont accumulés. Conçue en 1984, son premier module fut mis en place en 1997. L'accident de la navette Columbia, le 1^{er} février 2003, aboutit à l'arrêt des vols habités américains vers la plate-forme, bouleversant la programmation des champs disciplinaires utilisateurs (physique des matériaux, biologie, physiologie et médecine). L'Union européenne ne peut pas, ni ne doit, reprendre les coûts de fonctionnement induits par le désengagement américain.

Le rapport évalue, tout d'abord, pour chaque discipline, les forces et faiblesses de la recherche française. On y verra que, si le nombre des professionnels de la recherche (chercheurs des établissements, enseignants-chercheurs,

ingénieurs et techniciens) peut être clairement défini là où l'outil spatial est le principal outil de recherche (sciences de l'environnement et du climat terrestre, astronomie, Soleil et systèmes solaire et planétaires), dans d'autres disciplines essentiellement non spatiales, l'espace joue un rôle spécifique (médecine, biologie, physique des matériaux) ou grandissant (physique fondamentale). Dans ces derniers, la communauté scientifique est plus difficile à quantifier. Après cette analyse des forces et faiblesses, une stratégie est présentée.

La société exige de mieux connaître l'état et la dynamique de la planète, et de mieux prévoir son évolution. Les États, ou groupements d'États (dont l'Union européenne) fondent sur ce questionnement des pans entiers de leur politique scientifique et technologique. La détermination, la part anthropique de la situation actuelle, de son dynamisme et de son évolution vraisemblable, doit être clairement identifiée au sein des processus observés, résultant de la géodynamique de la planète depuis des millions d'années, dès avant l'aube de l'humanité.

Cette exigence implique que, comme pour la navigation et la géodésie et pour la météorologie, de nouveaux engins spatiaux opérationnels soient conçus et financés à l'échelle européenne par des agences dédiées à partir des résultats des travaux scientifiques ayant permis un développement technologique.

La connaissance de l'origine de la vie et la recherche des planètes « habitables », font écho à des préoccupations fondamentales de l'humanité. C'est aussi par ces programmes que les opinions publiques des pays concernés s'attachent légitimement et avec force à la recherche spatiale.

Les investissements impliqués par cette recherche sont considérables. Les autorités devront avoir à cœur l'équilibre entre le financement des moyens envoyés dans l'espace et ceux mis en place pour le traitement, l'archivage à long terme et la distribution des données. Il apparaît en particulier que l'exploitation scientifique optimale de celles-ci reste sous dimensionnée en Europe par rapport aux efforts Nord Américains dans un contexte où les données sont, légitimement, mises rapidement à la libre disposition de la communauté scientifique mondiale.

De nouveaux champs s'ouvrent à la recherche spatiale pour résoudre des questions qui lui sont propres. L'espace est un des champs où l'analyse de systèmes complexes et les développements en mathématiques, informatique et automatique sont essentiels. Il importe d'en tenir compte dans les l'organisation de la recherche pour l'espace entre les organismes.

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Animateur – Coordinateur

Jean-Loup PUGET

Membre de l'Académie des sciences —
Directeur de recherche au Centre national
de la recherche scientifique
Directeur de l'Institut d'astrophysique
spatiale, Orsay

Rapporteur

Pierre LALLEMAND

Directeur de recherche au CNRS — Chargé
de mission à l'Académie des sciences

Membres du groupe

Jacques BLAMONT

Membre de l'Académie des sciences —
Professeur émérite à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

Pierre ENCRENAZ (partie I)

Membre de l'Académie des sciences —
Professeur à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

Jean-Louis FELLOUS

Coordinateur du programme ESA GMES
Earth Observation Office —
Agence spatiale européenne

Jean-Louis LE MOUËL

Membre de l'Académie des sciences —
Physicien à l'Institut de physique
du globe de Paris

Gérard MÉGIE † (partie I)

Membre de l'Académie des sciences —
Professeur à l'université Pierre-et-Marie-
Curie — Président du CNRS

Jean-François MINSTER

Correspondant de l'Académie des sciences
— Directeur scientifique général du Centre
national de la recherche scientifique

Coordonnateur :

Jean DERCOURT

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences — Professeure émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Ont également participé à la rédaction du rapport

Alain BERTHOZ

Membre de l'Académie des sciences — Professeur au Collège de France

François BOUCHET

Directeur de recherche au CNRS — Institut d'astrophysique de Paris

Yves LANGEVIN

Directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique spatiale, Orsay

René MOREAU

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'Institut polytechnique de Grenoble

Laurent VIGROUX

Directeur de l'Institut d'astrophysique de Paris — Directeur de recherche au CEA

NOTE LIMINAIRE

La première partie de ce rapport consacré à la recherche spatiale propose une série de recommandations sur l'organisation de la recherche spatiale et son financement.

La seconde partie analyse la recherche spatiale française en dégagant les forces et faiblesses, en s'appuyant sur des rapports préliminaires par discipline rédigés par les spécialistes impliqués dans ces recherches. La liste des coordinateurs de ces rapports préliminaires est donnée ci-dessous. Ces rapports sont accessibles sur le site de l'Académie des sciences : <http://www.academie-sciences.fr>

Pour chaque discipline, un rapport synthétique et des recommandations spécifiques issues des rapports préliminaires sont rédigés. Ces rapports synthétiques (partie A) et les questions stratégiques et recommandations générales présentées (partie B) ont été finalisés par le comité de rédaction.

Les activités spatiales dépassent aujourd'hui largement la recherche spatiale, même si celle-ci a été l'élément moteur de leur développement initial. Ce rapport se concentre sur la recherche utilisatrice de l'espace et ne traite des infrastructures spatiales, de leur technologie et des programmes opérationnels que dans la mesure où ils ont des liens et/ou implications forts avec la recherche spatiale.

Coordinateurs des rapports préliminaires à la seconde partie par discipline :

Jean-Louis Fellous	Les sciences de l'environnement et du climat
Jean-Louis Le Mouél	Les sciences de la Terre solide
Yves Langevin	Système solaire, systèmes planétaires, exobiologie
Laurent Vigroux	Astrophysique
François Bouchet	Physique fondamentale et cosmologie
René Moreau	Physique des fluides dans l'espace
Alain Berthoz	Biologie, physiologie et médecine

TABLE DES MATIÈRES

Rapport Science et Technologie	iii
Composition du Comité RST	v
Avant-propos	ix
Composition du groupe de travail	xiii
Note liminaire	xv

PARTIE I La recherche spatiale : stratégie et structuration de la programmation au sein de l'Europe	1
1. Le contexte général de la recherche scientifique spatiale en France et en Europe	3
1.1. La communauté scientifique et ses besoins en recherche spatiale face aux évolutions de l'organisation de l'Espace en Europe	3
1.2. La mise en œuvre du Livre blanc « L'Espace : une nouvelle frontière pour une Union en expansion »	6
2. Les évolutions nécessaires du dispositif de recherche spatiale français	12
2.1. La réalisation des expériences	13
2.2. Le rôle critique de la recherche et technologie amont dans la recherche spatiale	14
2.3. Le traitement, l'archivage, la distribution et l'exploitation scientifique des données	16

PARTIE II La recherche spatiale française : forces et faiblesses, analyse par discipline **19**

PARTIE A La recherche spatiale par discipline	21
1. Terre : les sciences de l'environnement et du climat	23
1.1. Contexte scientifique et programmatique	23
1.2. Les équipes de recherche en sciences de l'environnement	25
1.3. Effets de l'organisation actuelle sur la possibilité de réaliser les recherches, propositions d'adaptation	26
2. Les sciences de la Terre solide	28
2.1. Les projets actuels et futurs	29
2.2. Les équipes françaises	31
2.3. Forces et faiblesses	32
3. Soleil, Système solaire, systèmes planétaires, exobiologie	34
3.1. Contexte scientifique et programmatique	34
3.2. Forces et faiblesses de la communauté française	36
4. Astronomie	39
4.1. Cosmologie et univers lointain	40
4.2. Objets compacts	40
4.3. Physique stellaire et milieu interstellaire	41
4.4. Astrométrie	42
4.5. Rôle du spatial dans l'astronomie	43
4.6. Problèmes	45
5. Physique fondamentale et cosmologie	46
5.1. Cosmologie	46
5.2. Gravitation	48
5.3. La position de la communauté française	49
6. Physique des fluides dans l'espace	50
6.1. Physique des fluides	50
6.2. Résultats acquis et état actuel de la communauté	51
7. Biologie, physiologie et médecine	53
7.1. Les sciences de la vie dans l'espace	53
7.2. Les équipes de recherche en sciences de la vie	56
7.3. Effets de l'organisation actuelle sur la possibilité de réaliser des recherches	57

PARTIE B	Questions stratégiques pour la recherche spatiale française et européenne	61
1.	Sciences de la Terre, de l'environnement et du climat : nécessité des systèmes opérationnels d'observation de la Terre	63
2.	La fin de la construction de la station spatiale internationale et le désengagement américain	64
3.	L'exploration du Système solaire. Recommandation sur le programme Exploration	66
4.	Recommandation sur le mode de réalisation des expériences	67
5.	Mode de réalisation des expériences de physique fondamentale dans l'espace	68
6.	Physique en microgravité — Concertation entre scientifiques et ingénieurs	69
7.	L'exploitation optimale des données dans le contexte international	69
8.	Mathématiques et espace	70
PART B – English version	Strategic questions for French and European space research	73
1.	Environment, climate and Earth sciences: need for operational observation systems of the Earth	75
2.	The end of the construction of the International Space Station and the American desengagement	76
3.	Exploration of the solar system. Recommendation for the Exploration program	78
4.	Recommendations on the mode of building experiments	79
5.	Modes of realisation of fundamental physics experiments in space	79
6.	Physics in microgravity — Dialogue between scientists and engineers	80
7.	Optimal exploitation of data in an international context	80
8.	Mathematics and space	81
ANNEXE	Contribution de l'Académie des sciences au Livre blanc sur la politique spatiale européenne	83
	Groupe de lecture critique	85
	Composition du Groupe de lecture critique	87
	Intervention de Jean-Claude André	91
	Commentaire du Centre national d'études spatiales	93

Commentaire de l'Ifremer	97
Commentaire du ministère délégué à l'Enseignement supérieur	99
Commentaire de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales	103
Présentation à l'Académie des sciences, par Pierre Léna	105
Intervention de Pierre Buser, membre de l'Académie des sciences . . .	115
Intervention de Jean Kovalevski, membre de l'Académie des sciences	117
Intervention d'Yvon Le Maho, membre de l'Académie des Sciences	119

PARTIE I

La recherche spatiale :
stratégie et structuration
de la programmation au sein
de l'Europe

1 | Le contexte général de la recherche scientifique spatiale en France et en Europe

L'Espace a ouvert un ensemble d'applications d'ordre stratégique et industriel et a permis le développement de recherches scientifiques. L'organisation des recherches scientifiques utilisant les moyens spatiaux constitue le thème du présent rapport.

1.1 La communauté scientifique et ses besoins en recherche spatiale face aux évolutions de l'organisation de l'Espace en Europe

L'Espace offre à la communauté scientifique un certain nombre de capacités d'investigation uniques et essentielles pour certaines disciplines ou sous-disciplines aussi bien en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée :

- observation de l'Univers hors de l'atmosphère terrestre : astronomie, cosmologie, physique fondamentale utilisant l'Univers comme laboratoire, exobiologie ;
- observation globale de la Terre sur de longues périodes, aussi bien ses enveloppes fluides que sa surface ou la Terre interne : géophysique, sciences de l'environnement, agronomie, risques naturels, pollution ;
- observation *in situ* du Système solaire : physique des plasmas, planétologie comparée, interactions Soleil-Terre (météorologie de l'Espace), exobiologie ;
- expérimentation en microgravité : physique expérimentale, médecine spatiale.

Il faut noter qu'une grande partie de la recherche fondamentale ayant un besoin impératif de l'Espace se rattache à quelques questions fondamentales liées aux origines : origine de l'Univers, formation des étoiles, existence et formation des systèmes planétaires extrasolaires, existence de formes de vie extraterrestre et origine de la vie, origine et évolution de la Terre.

Pour une description détaillée des domaines de recherche spatiale, on se reportera à la partie II du rapport.

Les sciences de l'environnement et la géophysique qui ont un besoin impératif de l'Espace sont par ailleurs liées à d'autres questions essentielles pour l'humanité : développement durable, préservation de l'environnement, surveillance contre les catastrophes naturelles.

La France a joué un rôle pionnier dans le développement des premières recherches spatiales en Europe avec la création, dans les années 1960, du Cnes et des laboratoires spécialisés dans la recherche spatiale travaillant sur les plasmas interplanétaires, l'astronomie avec les radiations inobservables du sol (ultraviolet et rayons X et gamma), et l'aéronomie. Il convient aussi de rappeler les importants développements dans le domaine de la géodésie spatiale et de souligner le rôle des développements instrumentaux et des techniques d'analyse de données associées.

Le rôle de la France a été important grâce à des missions spatiales dirigées par le Cnes et à des collaborations bilatérales avec les deux grandes puissances spatiales des années 1960 à 1980 (États-Unis et URSS). La France a aussi contribué fortement aux missions spatiales de l'Agence spatiale européenne, qui ont pris une importance croissant rapidement à partir du milieu des années 1980 avec l'augmentation des ressources du programme scientifique dit « obligatoire ».

Des disciplines nouvelles ont dans la même période commencé à utiliser l'Espace principalement pour l'observation de la Terre. La France a, dans ce domaine comme dans le précédent, joué un rôle pionnier avec le programme exemplaire Topex-Poséidon en collaboration bilatérale Cnes-Nasa. Le rôle de l'Agence spatiale européenne (Esa) a crû rapidement à partir du milieu des années 1980 avec les grands programmes optionnels en environnement (ERS 1 et 2, Envisat) et le nouveau programme Earth Explorer — Living Planet, fondé sur les méthodes de sélection du programme obligatoire. Du fait du fort lien avec les applications et les satellites opérationnels, la recherche spatiale s'est développée sur un mode différent des premières disciplines, les expériences étant réalisées plutôt dans l'industrie sous la maîtrise d'ouvrage et parfois la maîtrise d'œuvre des agences spatiales (Cnes et Esa). L'utilisation des mêmes techniques instrumentales dans des observations spatiales destinées soit à la recherche, soit à des missions opérationnelles devant être régulièrement renouvelées (météorologie, surveillance des océans ou des surfaces continentales, sécurité), justifie une participation accrue des industriels par rapport à celle des laboratoires.

C'est ainsi que, pour la météorologie et les études de climat, les satellites opérationnels fournissent des données qu'utilise la recherche soit pour ses besoins propres, soit pour contribuer à l'amélioration des modèles de l'atmosphère. Dans ce cas, les applications opérationnelles nécessitent un apport constant de données sur de longues périodes, ce qui conduit à des séries de satellites que fournissent les industriels après la mise au point d'un premier exemplaire sous maîtrise d'œuvre des agences spatiales (Esa, Cnes) en étroite concertation avec le groupement Eumetsat. Notons que réciproquement les instruments conçus pour la recherche fournissent dans certains cas des données que la météorologie opérationnelle utilise à titre expérimental.

Au cours de ces années, les besoins propres du spatial ont conduit à des développements technologiques importants, tandis que des domaines de recherche spatiale nouveaux ont pu apparaître grâce à des technologies produites dans d'autres contextes. Cet aspect « secteur technologique de pointe de la recherche spatiale » est à souligner.

L'utilisation de la microgravité à bord des vaisseaux Soyouz et Mir (URSS), de la navette spatiale américaine et maintenant de la Station spatiale internationale s'est développée différemment avec des moyens d'accès à l'Espace décidés pour des raisons politiques ou de prestige et non pas pour répondre à des besoins scientifiques. Cela a permis de disposer de conditions expérimentales permettant de développer certaines recherches déjà entamées en situation de microgravité (avions, tours de chute libre ou fusées sondes). Des résultats nouveaux ont été obtenus sur les propriétés statiques et dynamiques de systèmes comportant des phases fluides qu'il serait très difficile sinon impossible d'obtenir en présence de gravité. Dans le domaine des sciences de la vie, la recherche spatiale s'est orientée vers des objectifs plus appliqués liés aux contraintes de la vie en apesanteur et aux effets importants constatés sur les premiers cosmonautes. La perspective de vols habités vers des destinations lointaines impose de poursuivre les recherches et de disposer de spécialistes de haut niveau. Sur le plan fondamental, l'influence de la gravité sur le développement et le fonctionnement des organismes vivants est étudiée en coopérations internationales et des résultats de premier plan ou prometteurs ont été obtenus aussi bien chez l'homme (neurosciences et physiologie des systèmes sensorimoteurs, bases neurales des fonctions cognitives, physiologie cardiovasculaire, physiologie osseuse) que chez l'animal (biologie du développement, fonctions d'orientation).

L'analyse détaillée des forces et faiblesses de la recherche française dans chacun de ces secteurs fait l'objet du second rapport (partie II, avec des rapports préliminaires présentés en ligne sur le site de l'Académie). La place de la France dans les disciplines pionnières est évidente dans les statistiques sur la démographie de la recherche spatiale en Europe (Réf. [3]). Cependant, la population de chercheurs et ingénieurs ayant conduit les premiers développements spatiaux part massivement à la retraite dans la période actuelle, posant de façon cruciale la question de la pérennisation de la place de la France dans cette recherche.

Malgré des réussites largement reconnues et des développements scientifiques bénéficiant des satellites opérationnels (environnement, climat, etc.) la recherche spatiale en Europe traverse actuellement une crise profonde liée :

- au vieillissement des structures et des acteurs ayant été à l'origine de ce secteur ;

- à une compétition accrue due à l'accroissement des moyens pour cette recherche aux États-Unis alors qu'ils décroissent en Europe, avec un climat peu favorable à des coopérations équilibrées ;
- à la quasi-disparition du partenaire russe qui permettait de développer des programmes bilatéraux ambitieux ;
- aux contraintes dues aux règles de fonctionnement de l'Esa en particulier : juste retour, modalités de vote ou de sélection des projets ;
- à la diminution des moyens de l'Agence spatiale européenne pour les programmes d'observation de la Terre à la suite d'Envisat.

La politique de lanceurs menée en Europe, fondée quasi exclusivement sur des besoins commerciaux surestimés, met les scientifiques européens (ainsi que d'autres utilisateurs potentiels de l'Espace) dans une situation d'infériorité par rapport à leurs collègues nord-américains, qui disposent d'un ensemble de lanceurs variés bien adaptés à leurs besoins, malgré la mobilisation d'une très grande part des ressources en faveur des vols habités. Aux États-Unis, le secteur des lanceurs spatiaux est largement soutenu par les utilisateurs publics (civils et militaires). Cela permet de rentabiliser les lanceurs petits ou moyens adaptés aux lancements de mini-satellites en orbite basse alors que le secteur privé est surtout utilisateur de lancements de gros satellites en orbite géostationnaire.

En outre, les modalités dans l'utilisation des données des grandes missions comme Envisat n'ont pas toujours permis d'optimiser leur exploitation scientifique.

1.2 La mise en œuvre du Livre blanc « L'Espace : une nouvelle frontière pour une Union en expansion »

Le Livre blanc pour une politique spatiale européenne, élaboré par la Commission européenne et l'Agence spatiale européenne, affirme dans son préambule la nécessité d'une politique spatiale ambitieuse à l'échelle de l'Union européenne élargie, en raison du caractère stratégique de l'Espace et de la multiplicité de ses applications. Il affirme l'importance pour l'Europe de maintenir un accès autonome à l'Espace. Il reconnaît les contributions de la recherche spatiale dans le passé et son rôle dans la formation d'une communauté de haut niveau, mais il faut insister sur la nécessité de faire les efforts nécessaires, en moyens humains et financiers et évolutions de structures, afin que la recherche spatiale européenne puisse conserver sa compétitivité.

La taille et le coût de certains projets scientifiques spatiaux les placent parmi les très grands équipements scientifiques ayant vocation à être réalisés dans un contexte et dans le cadre d'une politique européenne. L'accès indépendant à l'Espace, condition d'un programme de recherche spatiale ambitieux ne peut être acquis que dans ce cadre. Enfin, la recherche spatiale est un moteur essentiel du développement technologique dans ce secteur et un puissant attracteur de jeunes talents vers la science et la technologie dans une période de déclin de l'intérêt de nombreux jeunes pour ces activités.

Dans une période de concurrence accrue (croissance rapide du rôle du Japon, de la Chine, de l'Inde et du Brésil sur la scène de l'Espace et de la recherche spatiale) et face à une dominance très forte des États-Unis¹, il est indispensable de faire évoluer rapidement la structure de la recherche spatiale en Europe pour optimiser son organisation, renforcer ses moyens et intégrer les pays entrant dans l'Union européenne dans cet effort stratégique.

Le schéma général proposé par le Livre blanc répond à ces préoccupations et constitue une bonne base à partir de laquelle pourra se mettre en œuvre une telle politique à condition que la recherche spatiale puisse disposer de moyens suffisants.

Le présent rapport s'attache, pour ce qui concerne la recherche spatiale (et les autres aspects de la politique spatiale quand ils sont importants pour la recherche), à dégager des recommandations précises sur la mise en œuvre des principes généraux du Livre blanc parfois très (trop!) généraux et vagues. On trouvera dans le chapitre 2 des recommandations spécifiques sur les évolutions de l'organisation de la recherche spatiale en France dans le cadre d'une telle évolution.

Recommandations

Adapter les règles de fonctionnement du dispositif spatial européen

L'introduction de l'Union européenne comme acteur principal doit conduire à des révisions importantes dans les mécanismes actuels du dispositif spatial européen. Il est nécessaire de faire rapidement des propositions dans le cadre du mouvement créé par les initiatives de la Convention concernant l'Espace. Elles s'appuieront sur l'analyse des difficultés et des blocages auxquels conduisent des règles telles que le juste retour et les modalités de vote dans le cadre du programme scientifique obligatoire.

¹ Même si les différences de mécanismes de financement rendent les comparaisons précises difficiles, on peut estimer que le budget de la recherche spatiale des États-Unis est environ 4 à 6 fois plus élevé que celui de l'Europe.

Pilotage par l'Union européenne du transfert recherche-opérationnel

Dans plusieurs domaines, des programmes scientifiques ont conduit à des débouchés opérationnels. Des agences spécialisées ont alors été créées (exemple : Eumetsat). Il devra désormais appartenir à l'Union européenne de piloter la création de telles agences capables d'assurer la transition entre la recherche et le fonctionnement opérationnel puis l'exploitation de satellites et de centres de gestion des données. De tels processus sont en effet de nature politique et exigent des décisions et des arbitrages sur des points techniques et financiers. À ce titre, on peut évoquer le débouché, à définir et à exécuter, des programmes ERS puis Envisat. L'attribution des ressources financières nécessaires pour atteindre la phase opérationnelle doit se faire sans porter préjudice aux nouveaux programmes de recherche spatiale.

Organiser la prospective scientifique et technique

La prospective scientifique et technique effectuée aux niveaux des laboratoires et des agences doit conduire, au niveau européen, à un travail de synthèse par discipline dans un esprit d'émulation créative et en vue de limiter les redondances. Un organisme européen adéquat, par exemple l'ESF (European Science Foundation), pourrait servir de cadre à cette activité de prospective pour la recherche scientifique qui devrait s'appuyer sur une information précise concernant les capacités européennes sur les divers éléments des projets de recherche spatiale. Par ailleurs, des associations *ad hoc* sur le mode de celle sur la recherche hypersonique pourraient jouer ce rôle pour les secteurs cruciaux de recherche technologique. La participation du PCRD (programme ou l'un de ses instruments) permettra d'une part la réalisation d'études préliminaires et contribuera d'autre part à la formation de groupes de recherche à la base de consortiums capables de prendre en charge tout ou partie des projets de recherche spatiale.

Placer la réalisation des programmes de recherche spatiaux dans un contexte pluriannuel plurimissions

L'Union européenne doit élaborer la politique spatiale sous forme de programmes multimissions. Les programmes de recherche exigent au minimum un engagement pluriannuel, qu'ils soient gérés au sein d'un programme « obligatoire » (au prorata du PIB) ou d'un programme « enveloppe » optionnel. Ils doivent être mis en œuvre par l'Agence spatiale européenne et les structures nationales de façon coordonnée et dans un partage des tâches bien défini.

Les grandes missions scientifiques spatiales doivent être sélectionnées sur des critères scientifiques par l'Agence spatiale européenne. Ce critère de sélection n'est pas compatible avec des programmes optionnels où chaque pays décide de sa contribution à chaque mission.

L'organisation des grands projets européens

Il est important de bien identifier, d'une part la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre de l'ensemble de la mission, d'autre part le financement et les consortiums chargés de la maîtrise d'œuvre et de la réalisation des sous-ensembles (en particulier de la charge utile) et de l'exploitation. Pour les grandes missions, l'Esa doit être le maître d'ouvrage de l'ensemble y compris pour les charges utiles. Par exemple, le financement des coûts externes pourrait être couvert par l'Esa dans le cadre d'un appel d'offres vers les laboratoires et centres nationaux qui contribueraient en compétences et personnels. La situation actuelle, avec contrôle par les agences nationales qui en assurent le financement dans le cadre du programme scientifique obligatoire, conduit à un découplage inefficace entre contrôle du financement et pilotage du projet. Ces charges utiles peuvent être développées soit par des laboratoires de recherche, soit par des grands centres techniques d'agence spatiale, soit par l'industrie (ou une combinaison de ces acteurs comme il est pratiqué pour les lanceurs). La nature de la charge utile (technologie très nouvelle ou non, récurrente ou non,...) et la compétence des réalisateurs doivent seules guider le choix de ceux-ci. Une compétition ouverte doit impérativement rester la règle.

Établir un principe de subsidiarité pour la réalisation des projets spatiaux

Dans le cadre d'une compétence sur l'Espace partagée entre l'Union européenne et les États européens telle que proposée par la Convention, il faut élaborer un principe de subsidiarité pour la recherche spatiale définissant ce qui doit être piloté et développé à l'échelle européenne et ce qui doit rester au niveau national² ou multilatéral. La répartition entre niveaux européen, national et régional variera selon le sujet considéré : organisation de la communauté scientifique, missions scientifiques ou moyens à mettre en œuvre. Ainsi, les mini- et microsatellites de recherche pourront être développés par des agences nationales dans le cadre de programmes nationaux ou à l'occasion de coopérations à petit nombre de participants (2 ou 3). De même, les recherches sur de nouvelles technologies seront réparties selon le principe de subsidiarité.

²Les moyens nationaux variant très fortement d'un pays à l'autre, il convient d'appliquer la subsidiarité avec doigté.

Rechercher des financements européens

Les financements des charges utiles doivent pouvoir rester multiples. Dans certains cas, un financement de celles-ci par l'Union européenne (en particulier dans les cas où la composante technologie nouvelle est forte), avec gestion par l'Agence spatiale européenne, permettrait à la fois de lever les difficultés mentionnées ci-dessus (compétition ouverte, maîtrise d'ouvrage centralisée) et de renforcer le pouvoir d'achat de la recherche spatiale européenne face à la compétition internationale.

Parallèlement à l'augmentation des ressources du programme Earth Explorer — Living Planet recommandée par le Livre blanc, l'Union européenne devrait financer le programme Earth Watch, pour les éléments non pris en compte par les agences opérationnelles spécialisées, dans le droit-fil de l'initiative GMES (Global Monitoring for Environment and Security).

L'Esa et la Commission européenne se sont engagées dans la mise en œuvre de l'initiative GMES (Global Monitoring for Environment and Security), qui vise à doter l'Europe d'une capacité de surveillance globale de l'environnement, fournissant une base d'information rationnelle pour ses politiques et répondant à ses impératifs de développement et de sécurité. GMES englobe la contribution européenne au processus international GEO (Global Earth Observation) entamé en juillet 2003 à Washington. De son côté, l'Esa dispose d'un programme à long terme dont la composante recherche est assurée dans le cadre du programme Earth Explorer, et la composante opérationnelle devrait être remplie par le programme Earth Watch, qui reste à définir et devrait garantir la poursuite opérationnelle des missions expérimentales dont l'utilité à long terme a été démontrée.

Cette question présente un lien étroit avec la recherche. Pour être durable (et l'exemple de la météorologie est là pour le rappeler), toute application opérationnelle doit s'appuyer sur la recherche, qui est une source d'innovation et une démarche irremplaçable de validation, de qualification et d'amélioration des produits. De surcroît, la recherche est et restera l'un des premiers clients des systèmes d'observation opérationnels.

En l'absence de perspective crédible d'une couverture des investissements par des recettes d'exploitation, il apparaît essentiel que la plupart des investissements d'infrastructure pour GMES soient pris en charge par l'Union européenne. Cela permettra en outre le transfert des missions de recherche vers l'opérationnel, dans les domaines où les structures existantes comme Eumetsat n'ont pas pour responsabilité première d'effectuer des travaux de recherche.

Inclure la chaîne complète de traitement des données dès la conception du projet

Le traitement des données doit être inclus et piloté au sein de chaque projet. En revanche, l'archivage à long terme et la distribution des données doivent être effectués dans un cadre assurant le meilleur accès à ces données pour l'ensemble de la communauté scientifique en Europe, indépendamment de la participation plus ou moins grande de leurs laboratoires ou industriels nationaux à la réalisation technique de la mission. Pour une bonne prise en compte des besoins des utilisateurs des données, surtout pour les phases les plus proches de l'exploitation, il est nécessaire d'intégrer l'ensemble de la chaîne allant de la spécification des objectifs au concept de la mission, puis à sa réalisation et enfin aux différents niveaux de traitement des données depuis le départ. Cela a rarement été fait dans le passé, du fait de la séparation des responsabilités sur les différents éléments. La mission Topex-Poséidon est un excellent exemple de l'efficacité de ces principes. De même le fonctionnement d'Eumetsat et du Centre européen de météorologie permet un très bon accès des laboratoires de recherche aux informations dont ils peuvent avoir besoin.

Conforter l'exploitation scientifique des informations générées dans les missions spatiales

L'efficacité de l'exploitation de ces grandes infrastructures scientifiques pendant la durée de vie du satellite est cruciale dans un contexte de compétition mondiale forte. Les agences académiques de recherche nationales éprouvent des difficultés pour assurer l'effort nécessaire concentré sur une période assez courte. Un financement européen temporaire doit donc être mis en place pour s'assurer que l'exploitation scientifique de ces données acquises par des missions européennes n'est pas dominée par la compétition internationale (en particulier les États-Unis où la Nasa joue un rôle important dans le financement, ce qui n'est pas le cas en Europe où ce rôle est réservé pour une large part aux organismes académiques). Un tel financement permettra en outre d'assurer l'accès à ces données pour les pays émergents en Europe ayant pour l'instant une participation limitée à la réalisation de ces missions.

Promouvoir l'emploi de mini- et microsatellites

Les agences spatiales ont la responsabilité de développer une politique industrielle cohérente. Une industrie à la fois performante et compétitive, nécessaire à l'indépendance de l'Europe dans l'accès à l'Espace, ne pourra se développer

qu'avec des programmes publics suffisants. On attend des agences qu'elles entretiennent en liaison avec des utilisateurs de satellites polaires défilant (télécom, surveillance) un cadre programmatique suffisamment visible. Cela permettra aux industriels d'en assurer le pilotage et d'équilibrer l'effort des agences spatiales entre les plates-formes et les charges utiles, à la différence de ce qui a pu se passer dans quelques cas, par exemple pour Proteus. Une instance européenne de concertation (par exemple sous forme de forum au sein de l'Agence spatiale européenne) permettra une certaine coordination, destinée entre autres à éviter les duplications d'infrastructures coûteuses.

Disposer de systèmes de lancement afin d'optimiser le couple lanceur-mission

L'accès à l'Espace pour la recherche conduit à rechercher l'utilisation d'une panoplie de lanceurs (européens ou non) compte tenu de la variété des missions. Cela concerne en particulier les besoins en lancement de satellites petits ou moyens en orbites basses, voisins du cas de nombreux satellites opérationnels, que ce soit dans le domaine de la sécurité ou celui de l'observation de la Terre et de la surveillance à des fins civiles. Un accès indépendant à l'Espace pour l'Europe est un objectif stratégique, mais les missions de recherche, étant minoritaires, ne peuvent pas avoir comme premier objectif de contribuer significativement au développement des lanceurs. Les responsables des missions scientifiques doivent pouvoir choisir sur le marché les lanceurs les mieux adaptés à leurs besoins. Dans le cas de coopérations internationales il est important que la contribution française ne se limite pas à la fourniture d'un lanceur ou d'une plate-forme, même si ces fournitures peuvent légitimement être un élément d'une politique industrielle.

2 | Les évolutions nécessaires du dispositif de recherche spatiale français

Ce chapitre est celui qui contient les recommandations concernant l'organisation de la recherche spatiale en France³. Il est articulé autour de trois grandes questions : la réalisation des expériences ; le rôle critique de la recherche et technologie amont ; le traitement, l'archivage, la distribution et l'exploitation scientifique des données.

³La référence [2] donne des informations sur l'ensemble des activités spatiales françaises.

2.1 La réalisation des expériences

La communauté scientifique appartenant à des laboratoires de recherche universitaire ou à des grands organismes de recherche joue un rôle spécifique qui doit être préservé pour :

- proposer de nouveaux programmes de recherche spatiale ;
- développer en amont de nouvelles technologies préparant ces nouveaux programmes ;
- développer les concepts des satellites et des charges utiles pouvant permettre d'atteindre les objectifs définis ;
- assurer la maîtrise d'œuvre de la réalisation et des sous-traitances industrielles nécessaires pour les plus petits projets. Ceci pose la question des « architectes » (ingénieurs de projet maîtrisant les méthodes d'organisation avancées) qu'on trouve plutôt au Cnes ou dans le monde industriel ;
- participer aux phases de tests et d'étalonnage des instruments. Ces fonctions ont leur place dans les laboratoires de recherche en particulier pour les prototypes pointus ;
- effectuer ou piloter le traitement des données (les contributions industrielles dans ces domaines sont potentiellement importantes), assurer l'exploitation scientifique, si possible pendant les phases d'exploitation des satellites afin de parer aux imprévus.

Assurer la maîtrise d'œuvre des charges utiles des plus grands projets revient au centre spatial du Cnes ou à des industriels. Les laboratoires suivront les phases de réalisation dans une interaction entre scientifiques et ingénieurs pour s'assurer de la compatibilité avec les objectifs. Les contributions des divers participants seront adaptées aux besoins des différentes missions.

Recommandations

Un accord interorganisme spécifique pour chaque grand projet

Pour chaque grand projet⁴, le partage des tâches devrait être précisé dans le cadre d'un contrat de coopération spécifique pour la durée du projet s'inscrivant

⁴On entend par « grand projet » toute mission impliquant des coûts, ressources humaines, de longue durée. . . nécessitant des contributions de plusieurs organismes, en particulier s'il s'agit d'une coopération internationale.

dans des accords-cadres interorganismes (Cnes, CNRS, CEA, Onera, Ifremer, Météo-France, Inra, Inserm,...). Ces accords, d'une durée suffisante (construction, phase active, exploitation scientifique des données), définiront les prestations de chaque organisme (finances, personnels) ainsi qu'une structure de pilotage qui puisse maintenir la cohérence des décisions des organismes, y compris dans le cas d'arrêt du projet. Ceci permettra de consolider les partenariats actuels. Ces grands projets spatiaux devraient faire l'objet d'une analyse par le ministère de la Recherche des moyens consolidés nécessaires au moment de leur engagement.

Regrouper les moyens de tests des laboratoires dans un réseau européen

Les moyens lourds de tests des laboratoires doivent être maintenus et intégrés rapidement dans un réseau européen, permettant d'assurer une panoplie complète d'outils nécessaires tout en évitant les duplications. Un financement européen de ces moyens permettrait de les mettre à disposition des autres laboratoires européens impliqués dans la recherche spatiale et d'y accueillir des personnels en formation, originaires en particulier des nouveaux pays de l'Union.

La mise en commun des compétences spatiales pour les phases d'étude

Il est par ailleurs important que les agences nationales ou même les laboratoires puissent faire émerger de nouvelles thématiques dans le cadre d'une programmation plus souple et réactive que celle des très grands projets. L'arrivée à maturité de microsattelites et, de façon plus prospective, les possibilités offertes par les nanotechnologies devraient conduire à l'apparition de projets de taille modeste mais à fort potentiel scientifique. Les mécanismes de sélection doivent pouvoir retenir et financer, pour les phases de développement du concept et de l'étude de faisabilité, des projets créatifs et ambitieux, en associant si nécessaire des équipes n'ayant pas encore d'activité spatiale à celles qui possèdent l'expertise des techniques spatiales.

2.2 Le rôle critique de la recherche et technologie amont dans la recherche spatiale

Les contraintes particulières des expériences spatiales en termes de masse, performances, fiabilité, etc., ont conduit dans le passé à des travaux intenses sur de nombreuses technologies. Or, la tendance actuelle est de consacrer les

efforts technologiques à la résolution de points durs apparus dans la préparation des missions spatiales décidées. Il importe de maintenir une capacité d'action sur des sujets révélés soit à l'occasion d'un travail de veille technologique, soit en réponse à des propositions issues de la communauté scientifique.

En se référant au passé, on peut évoquer quelques exemples, comme :

- l'accroissement de la précision des horloges à quartz utilisées en altimétrie ;
- l'adaptation au domaine spatial de détecteurs infrarouges destinés initialement à des fins militaires ;
- les accéléromètres de haute précision de l'Onera ;
- les horloges à atomes froids ;
- la compression d'image.

La compétitivité de la France dans la sélection des laboratoires, centres techniques et industriels pour la réalisation des charges utiles dépendra bien sûr de la capacité des équipes scientifiques à produire des projets compétitifs et des savoir-faire de ces équipes. Elle dépend donc beaucoup d'activités amont de recherche et technologie à long terme qui ne doivent pas être sacrifiées aux réalisations des projets à court terme. Les financements de cette activité ne doivent pas servir de variable d'ajustement au financement des programmes en cours, sous peine de sacrifier la compétitivité à long terme. Une sélection stricte sur des critères de qualité et de compétence doit rester la règle.

L'existence d'industriels capables de contribuer à ces travaux technologiques, aussi bien dans les phases de recherche que dans les phases de développement, est importante et doit pouvoir bénéficier d'aides publiques, comme c'est le cas aux États-Unis. Il est souhaitable que des efforts similaires puissent être faits au niveau européen, en particulier pour favoriser l'émergence d'entreprises compétitives.

Recommandations

- Maintenir et renforcer le pilotage pluriorganismes et pluridisciplinaires de l'activité de recherche et développement pour le spatial en se plaçant si possible dans un cadre européen.
- Assurer qu'une fraction suffisante du budget est consacrée à ces activités amont (typiquement dans une fourchette de 5 à 10 %).

- Adopter un niveau de sélection entre les projets permettant d'assurer un financement correct de ceux qui sont retenus.
- Choisir des modes de gestion permettant d'assurer les engagements pluri-annuels pour ces activités.

2.3 Le traitement, l'archivage, la distribution et l'exploitation scientifique des données

Dans le traitement et la mise en forme des données, la France doit jouer un rôle proportionné à ses efforts dans la réalisation des satellites et des charges utiles. L'accroissement de la complexité des instruments scientifiques embarqués à bord de satellites nécessite de plus en plus de traitements sophistiqués mis au point par les spécialistes ayant développé les instruments. La maturation des disciplines et des technologies fait que la proportion de ressources devant être consacrée à cette activité tend à augmenter régulièrement avec le temps. En parallèle à ce mouvement, la production de relevés systématiques homogènes permettant des analyses statistiques et/ou d'évolution permet à des scientifiques non spécialistes des instruments spatiaux d'utiliser des ensembles de données archivées de différents types pour des recherches originales. Cette démarche a conduit par exemple au concept d'observatoire astronomique virtuel, ou dans le domaine de l'environnement à l'utilisation d'archives multimissions qui se généralise en associant dans la durée les spécialistes générant les données à différents niveaux de traitement avec les utilisateurs optimisant la définition de leurs besoins.

Ce double mouvement entraîne une mutation profonde du traitement et de l'archivage. Les données doivent être archivées à la fois avant tout traitement et après un traitement minimum (étalonnage, nettoyage des effets instrumentaux) sous une forme permettant de les utiliser même après un temps long. Il faudra aussi en extraire des informations synthétiques nécessaires pour le suivi du déroulement des missions ainsi que pour un certain nombre d'utilisations à des fins de recherche. Les résultats seront mis dans des bases de données facilement accessibles par une large communauté. Ceci pourra nécessiter des développements en informatique ainsi qu'une coordination internationale. Pouvoir accéder aux données brutes même anciennes est important en raison des évolutions des modèles et des méthodes d'exploitation de ces données : on peut faire allusion aux mesures de radiance infrarouge dont les contributions à la prévision météorologique ont fortement augmenté à partir du moment où on a pu disposer des techniques d'assimilation de données.

Recommandations

Diffuser les données

Pour optimiser l'exploitation scientifique des données fournies par les expériences spatiales, il faut qu'elles soient largement diffusées. Ceci conduit à vouloir archiver et distribuer des données interprétées intégrées dans un système de production d'information. Les tâches correspondantes engagent l'avenir sur une longue durée, donnant un caractère stratégique à la décision de constituer un tel système (très bien identifié par la Nasa). Lors de la définition d'un projet de recherche spatiale, il convient d'envisager tous les aspects de cette recherche, y compris la constitution éventuelle d'un tel centre d'exploitation des données, en bénéficiant s'il y a lieu de concours d'équipes initialement éloignées du sujet.

Définir des règles pour l'accès aux données

Il faudrait établir pour chaque mission des règles sur la mise à disposition de l'ensemble de la communauté concernée après une période de mise au point des instruments et de validation des données. Les équipes effectuant les travaux de mise en forme des données sont récompensées par un accès privilégié pendant cette période initiale du fonctionnement de l'instrument ou de la mission. Les disciplines et/ou les agences ayant mené une telle politique ont démontré son efficacité par rapport à des politiques limitant l'accès aux « payeurs ».

Poursuivre la création de centres thématiques élaborant des informations directement confrontables aux modèles⁵

La création de centres thématiques multimissions permet à l'utilisateur de s'adresser, pour une thématique donnée, à un portail unique pour rechercher les données. Le choix des thèmes tiendra compte des activités des autres pays d'Europe et pourra bénéficier du travail de prospective scientifique évoqué plus haut. Ces centres pourraient être des lieux privilégiés pour accueillir des personnels issus d'autres pays de l'Union, avec d'éventuels financements européens.

Prévoir des moyens adéquats pour la phase exploitation des données pour favoriser les équipes françaises

Pour les très grandes missions réalisées en collaboration mondiale par les agences spatiales, la compétition se concentre sur l'efficacité plus ou moins grande des partenaires dans l'utilisation de l'infrastructure commune. Dans ce

⁵Selon les recommandations de la référence [5].

contexte, les responsabilités de la Nasa s'étendent bien au-delà de celle de l'Esa. Il faut donc impérativement que l'Europe mette en place des moyens de soutien à l'exploitation scientifique de telles missions, sous peine de sous-exploiter les infrastructures qu'elle aura largement contribué à financer.

Bibliographie

- [1] Livre blanc de la Commission européenne « *L'Espace : une nouvelle frontière pour une Union en expansion* ». (Document COM(2003)673), disponible à <http://europa.eu.int/comm/off/white/index.fr.htm>
- [2] *Rapport de la commission de réflexion sur la politique spatiale française*, présidée par Roger Bonnet. On pourra trouver un résumé à <http://www.recherche.gouv.fr/discours/2003/rapcnes.htm>
- [3] *Demography of Space Science*, rapport du « European Space Science Committee » de la Fondation Européenne de la Science, produit à la demande de la direction de la Science à l'Agence spatiale, disponible à <http://www.esf.org/generic/72/FinalMaster2804.pdf>
- [4] Recommandation de l'Académie des sciences pour le Livre blanc Esa-Commission européenne (suite au Livre vert « *European Space Policy* ») adoptée le 27 mai 2003. <http://www.academie-sciences.fr>
- [5] *Les bases de données pour les géosciences*, rapport du groupe de travail Cnes-Insu « gestion des données », octobre 1999. Disponible à <http://medias.obs-mip.fr/www/Reseau/Documentation/rapport-final.pdf>

PARTIE II

La recherche spatiale française : forces et faiblesses, analyse par discipline

La partie A présente les grandes questions scientifiques des vingt ans à venir pour lesquelles l'Espace est essentiel. Pour chaque discipline, les succès et faiblesses de la recherche spatiale française (sur environ 40 ans) sont présentés, conduisant à des recommandations spécifiques. Pour la rédaction de ces sections, le comité de rédaction s'est appuyé sur des rapports détaillés dont les contributeurs sont mentionnés pour chaque section. Les coordinateurs par discipline sont Jean-Louis Fellous (Environnement et climat), Jean-Louis Le Mouél (Terre solide), Yves Langevin (Système solaire, planétologie), Laurent Vigroux (Astrophysique), François Bouchet (Cosmologie), René Moreau et Daniel Beyssens (Physique dans l'Espace), Alain Berthoz (Biologie, physiologie, médecine). Ces rapports détaillés préparatoires sont disponibles en ligne (<http://www.academie-sciences.fr>).

La partie B présente des recommandations générales.

PARTIE A

La recherche spatiale
par discipline

1 | Terre : les sciences de l'environnement et du climat

Contributions au rapport détaillé de Frédéric Baret, Pascale Delecluse, Laurence Eymard, Jean-Louis Fellous (coordinateur) et Jean-François Minster

1.1 Contexte scientifique et programmatique

Un grand nombre de disciplines (physique, chimie, biologie, etc.) sont mises en œuvre séparément ou de manière transversale pour l'étude de l'atmosphère, de l'océan, des surfaces continentales. Confrontées à une série de questions fondamentales touchant à l'évolution de la qualité de l'environnement de la Terre (qualité de l'air, occupation de l'espace, biodiversité, qualité et disponibilité des ressources en eau, en aliments, en énergie et d'autres ressources naturelles, changement climatique, etc.), les sciences de l'environnement ont trouvé dans la recherche spatiale un outil irremplaçable pour observer et comprendre l'état des grands réservoirs de la planète et leur évolution sous l'influence des activités humaines. Aux disciplines traditionnelles s'ajoute désormais, en réponse à la demande sociétale, une collaboration plus active des sciences sociales, dans le même temps que la préoccupation scientifique se double d'un effort accru pour le développement des applications.

Les sciences de l'environnement sont fondamentalement dépendantes des observations : la turbulence propre aux écoulements géophysiques, l'interaction avec la biologie, le caractère global des interactions, induisent la nécessité d'acquérir des quantités massives de données en continu, sur de longues périodes de temps, et à différentes échelles de résolution spatiale et temporelle. Ces sciences restent un domaine de découverte, à la fois par l'amélioration des observations, qui permet la mise en évidence d'effets ignorés, et par l'évolution du système Terre qui donne lieu à des phénomènes nouveaux ou à l'amplification d'interactions mineures.

Les progrès techniques se sont systématiquement traduits en progrès de la qualité des observations, et en progrès de la compréhension des phénomènes affectant les enveloppes superficielles de la Terre, qu'il s'agisse d'avancées en matière d'instrumentation (observation active par radars¹ ou lidars² — qui n'en

¹ Radars altimètres (Topex/Poséidon, Jason, ERS, Envisat, Cryosat), diffusiomètres (ERS, Metop), radars à synthèse d'ouverture (ERS, Envisat, Alos), radars de mesure des précipitations (TRMM), des nuages (Cloudsat).

² Lidars altimètres (Alissa), sondeur (Calipso), Doppler (Aeolus).

sont qu'à leur début, interférométrie³, etc.), de technologie satellite (vol en formation, comme le *A-Train* — avec *Aura*, *Calipso*, *Cloudsat* et *Parasol* ou la roue interférométrique, constellations de microsatellites comme le projet international *GPM* — *Global Precipitation Mission*), complémentaire des observations *in situ* et des moyens de calcul, permettant la simulation numérique fine de la dynamique du système Terre et la prévision de son évolution à des échéances plus éloignées. L'Europe domine la plupart des technologies requises, tout en restant dépendante des États-Unis ou du Japon pour certains composants ou pour les supercalculateurs.

Le progrès des sciences de l'environnement revêt une importance sociale évidente, alors que des incertitudes persistantes pèsent sur l'évolution du climat à l'échelle des prochaines décennies, que la pression humaine sur les ressources (eau, nourriture, bois, sols) et les milieux naturels (milieu côtier, forêts) s'accroît de manière continue, que la production d'effluents et de déchets ne fait qu'augmenter à l'échelle globale. L'apport des observations et des connaissances à la gestion et l'exploitation raisonnée de la planète est multiforme : évaluation des ressources disponibles, aide à l'exploitation des ressources et contrôle du respect des réglementations. Ces possibilités ont donné lieu à une grande variété de nouvelles applications, dont le développement est aujourd'hui limité par l'incertitude sur la pérennité des systèmes d'observation dont elles dépendent. L'observation spatiale de la Terre donne aussi lieu à des retombées industrielles, dont bénéficie l'industrie spatiale européenne, par l'exportation des développements accomplis en matière de plates-formes ou d'instrumentation, ou par la vente de données, de produits ou de services issus de l'imagerie.

Les deux aspects de l'évolution du système Terre et du besoin d'information pour la gestion durable de notre planète impliquent l'acquisition de séries temporelles et le relevé systématique de nombreux paramètres environnementaux, en même temps que la conception d'expériences destinées à l'élucidation ou à la quantification de processus spécifiques. À l'heure actuelle, en dehors des satellites météorologiques opérationnels, de quelques « miracles » (altimétrie océanique) sans certitude sur leur répétition, et de l'émergence de systèmes à vocation commerciale (imagerie à haute résolution) plus ou moins réussie, force est de constater que l'observation spatiale de la Terre reste dominée par le volet expérimental, sans que la transition vers des « systèmes opérationnels », garantissant la continuité des données, ait trouvé les voies de sa réalisation.

Aux équipes scientifiques initialement seules capables de tirer parti des observations spatiales, de nouvelles équipes « non spatiales » sont aujourd'hui venues s'adjoindre. À mesure du progrès dans l'interprétation des données spatiales, et

³Interféromètre Doppler (*Windii*), sondeur infrarouge de température et d'humidité (*Iasi*), de CO_2 (*Oco*), imagerie de l'humidité des sols et de la salinité superficielle des océans (*Smos*).

des algorithmes d'inversion qui permettent de les traduire en données géophysiques et en « informations », le rapport entre le nombre de chercheurs, d'ingénieurs ou plus généralement « d'utilisateurs » capables d'exploiter des produits incorporant des données spatiales et celui des spécialistes capables d'exploiter les mesures « brutes » s'est inversé. Un élément essentiel à cet égard est le développement, actuellement engagé, de centres ou pôles thématiques d'analyse de données, regroupant autour de structures de recherche des systèmes de traitement et d'analyse de données multisources (satellites et *in situ*) contribuant à l'étude d'une classe de phénomènes environnementaux. Il en est ainsi de la chimie de l'atmosphère (Ether), de la circulation océanique (Aviso/Ssalto), des surfaces continentales (Postel), des aérosols, des nuages et du rayonnement (Icare). À ceci, il convient d'ajouter l'effort de mise en place de systèmes intégrés combinant la modélisation numérique et l'accès en temps réel aux sources de données satellite et *in situ*, l'assimilation des données permettant de produire une analyse de l'état du système à un instant donné et une prévision régulièrement rafraîchie de son évolution (comme en météorologie opérationnelle). Le groupement d'intérêt public Mercator Ocean a été conçu autour de cette approche qui pourrait être étendue à d'autres domaines.

1.2 Les équipes de recherche en sciences de l'environnement

Une évaluation détaillée des moyens consacrés à l'étude et à l'observation de la Terre depuis l'espace dans les laboratoires, organismes, instituts et observatoires français (CNRS, Universités, Météo-France, Ifremer, BRGM, Cerfacs, IGN, Inra, IRD, Onera, Shom), a été conduite pour l'année 2001. Les chiffres suivants en sont extraits. Un effectif total de 675 chercheurs et ITA permanents et temporaires ont été recensés, qui se répartissent approximativement en 235 chercheurs permanents (35 %), 155 chercheurs temporaires (23 %), 190 ITA permanents (28 %) et 95 ITA temporaires (14 %). L'effectif corrigé en personnels « équivalents temps plein » se monte à 375 personnes. La répartition par disciplines est la suivante : 46 % se rattachent aux disciplines de la recherche atmosphérique, 36 % aux sciences de l'océan et 18 % aux études sur la biosphère continentale. Cette population est un sous-ensemble d'une population beaucoup plus importante des personnels impliqués dans l'étude des sujets soulevés, avec qui elle est étroitement impliquée.

La démographie des équipes de recherche en sciences de l'environnement ne se différencie guère de la situation observée dans les autres domaines : pyramide des âges déséquilibrée vers le haut, départ massif de personnels scientifiques et techniques expérimentés dans les prochaines années, diminution ou perte de compétence inévitables dans de nombreux domaines sans une politique

active et stable de recrutements anticipés. Cette situation était prévisible et annoncée depuis de nombreuses années, sans que les signaux d'alarme à ce sujet eussent été entendus. Le recrutement de chercheurs n'est pas, tant s'en faut, au niveau requis, au regard des capacités d'observation et de recherche et d'accès aux données disponibles en France, et une plus grande ouverture européenne doit être recherchée.

Par ailleurs, l'évolution des disciplines et des techniques spatiales rend indispensable un effort de formation qui concerne en priorité plusieurs domaines : le management de projets ; la gestion des données (bases de données, modélisation, réseaux) ; l'acquisition des données (électronique, traitement du signal, etc.).

Qu'il s'agisse de missions spatiales en coopération bilatérale ou de missions de l'Agence spatiale européenne (Esa), les équipes françaises sont appelées à jouer un rôle de premier plan, par leur expertise et le haut degré de préparation auquel les a conduites la politique volontariste du Cnes dans les années 1980-2000, qui avait fait de l'observation spatiale de la Terre un axe prioritaire. Cette situation se heurte aujourd'hui aux problèmes de démographie et de manque de moyens humains, avec le risque de compromettre cette position acquise. Les premiers appels d'offres de l'Esa pour la sélection des missions Earth Explorer du Programme « Terre vivante » ont abouti à retenir les missions Goce, Aeolus, Cryosat et Smos, auxquelles se sont ajoutées depuis les missions Earthcare et Swarm (cette dernière concerne les sciences de la Terre). Quatre de ces missions sont d'initiative française, toutes exploitent des développements technologiques ou instrumentaux impulsés par le Cnes ou l'industrie spatiale nationale (micro-accéléromètres, radar altimètre, lidars, magnétomètres, etc.). Parmi les missions non retenues, mais qui ont bénéficié de compléments d'étude et restent en attente pour une prochaine sélection, plusieurs projets émanent encore d'équipes françaises, en collaboration avec des partenaires européens ou américains (Spectra, Swinsat, CarboSat, E-GPM, etc.).

1.3 Effets de l'organisation actuelle sur la possibilité de réaliser les recherches, propositions d'adaptation

Il est de toute première importance de conserver aux équipes françaises et aux organismes qui les hébergent la première place européenne durement acquise dans les dernières décennies, prééminence menacée par la faiblesse des recrutements et des moyens accordés à l'analyse et l'exploitation des données, disproportionnés au regard de l'effort consenti sur le volet spatial.

Par ailleurs, la recherche en sciences de l'environnement ne peut aujourd'hui progresser sans s'appuyer, comme indiqué plus haut, sur un ensemble de missions spécialisées à caractère de recherche et de missions optimisées à caractère de surveillance opérationnelle. L'absence d'institutions nationales ou européennes dotées d'un mandat et des moyens adéquats pour assurer ces missions pérennes fait peser une inquiétude certaine sur la possibilité d'accéder à des données de qualité climatique. L'initiative européenne GMES (Global Monitoring for Environment and Security) trouve une part de son origine dans ce souci, et elle est renforcée par l'initiative internationale pour la mise en place d'un GEOSS (Global Earth Observing System of Systems). Il reste à définir le contexte institutionnel, et les éventuels transferts de responsabilité et de moyens correspondants, qui permettront de résoudre ce délicat et urgent problème, qui apparaît actuellement comme la question la plus critique pour les sciences de l'environnement et la recherche spatiale.

Recommandations

Nombreuse et de grande qualité, la communauté des sciences de l'environnement (atmosphère, océan, surfaces continentales) et du climat se heurte à une pénurie de postes de chercheurs permanents et, du fait de l'évolution des disciplines et des techniques, à un déficit de spécialistes dans le domaine du management de projets, et dans ceux de la gestion et de l'acquisition de données. Elle pâtit également de la part excessivement faible des budgets de recherche dévolue à l'exploitation des observations de toute nature, au regard de celle (déjà insuffisante) consacrée à leur acquisition, comme de celle des moyens disponibles pour les réseaux d'observation *in situ* complémentaires des données spatiales. Ces déséquilibres doivent être corrigés.

Sur un plan organisationnel, les recherches climatiques souffrent d'une fragmentation excessive, qu'il s'agisse du pilotage scientifique, de la gestion des laboratoires et des personnels, ou de l'attribution des moyens. Une recherche d'envergure sur des problèmes à long terme ne peut sérieusement se concevoir sans un investissement cohérent dans la durée.

De même, le risque de discontinuité des observations spatiales, longtemps considéré comme une menace sans cesse conjurée, est en passe de se réaliser. Après le succès exceptionnel de la mission d'océanographie Topex/Poséidon, poursuivie par Jason à partir la fin 2001, avec une période de recouvrement permettant le calage des observations, et un doublement temporaire de la couverture spatiale, il est probable que la série ininterrompue depuis 1992 de mesures de la topographie océanique connaîtra une interruption avant le lancement de Jason-2, dont le lancement n'interviendra pas avant 2008 (alors que

la durée de vie nominale des satellites Jason est de trois ans). La même interruption affectera sans doute la série altimétrique en orbite polaire, assurée sans interruption depuis 1991 par les satellites ERS-1, ERS-2 et Envisat (lancé en 2002) de l'Agence spatiale européenne, qui ne prévoit pas de successeur avant la « Sentinelle-3 », un projet non encore décidé et qui ne pourra voler avant 2011 ou 2012 (à moins que le projet Altika du Cnes, en cours de décision en collaboration avec l'agence spatiale indienne, ne vienne combler ce « trou » de données). Les mêmes incertitudes pèsent sur d'autres séries temporelles de la plus grande importance (température de surface de la mer, couleur de l'eau, composition atmosphérique, couverture végétale). Seule une transition efficace de ce type d'observations effectuées par des satellites expérimentaux vers des systèmes opérationnels, sans préjudice de leur qualité pour les études climatiques, pourra résoudre cette grave question.

2 | Les sciences de la Terre solide

Contributions au rapport détaillé de Jean-Louis Le Mouél, Annie Cazenave, Vincent Courtillot

Introduction

Nous ne retenons dans le vaste éventail des disciplines relevant de la Terre solide que celles qui touchent à la recherche spatiale.

La géodésie spatiale est née aux États-Unis et en France, avec la recherche spatiale elle-même. Les tout premiers satellites français lancés à la fin des années 1960 étaient des satellites géodésiques. Historiquement, la géodésie avait pour but essentiel la détermination de la forme de la Terre et celle de son champ de gravité. Fondée à l'origine sur l'étude des orbites des satellites artificiels, la géodésie spatiale a aujourd'hui largement étendu ses techniques (exemple : GPS, Doris, Insar, altimétrie radar et laser, gravimétrie spatiale, gradiométrie, etc.) et ses champs d'applications scientifiques : mesure du champ de gravité et de ses variations spatiotemporelles, positionnement précis et déformations de la croûte terrestre, établissement des systèmes de référence céleste et terrestre, détermination des paramètres de la rotation de la Terre, déformations globales de la Terre, variations du niveau de la mer, étude du cycle de l'eau, etc. Les apports de la géodésie spatiale à la connaissance de la structure interne du Globe, à la tectonique des plaques, à l'étude des déformations de la croûte continentale, à l'hydrologie continentale et à certains aspects de la dynamique des océans sont essentiels.

La télédétection spatiale a été une avancée décisive dans les sciences de la Terre. L'apparition des premières images optiques Landsat (pixel ~ 30 m)

dans les années 1970, puis la révolution Spot dans les années 1980 (pixel ~ 10 m à la fin des années 1980 ; aujourd'hui 1-2 m avec SPOT5), ainsi que le développement de l'interférométrie radar (technique InSAR) par des chercheurs français au début des années 1990 à partir de l'imagerie SAR des missions ERS, Radarsat, JERS et aujourd'hui Envisat, ont apporté de nouvelles données essentielles à la compréhension de la mécanique des séismes, de la dynamique des volcans et du fonctionnement des grandes structures tectoniques actives.

Le géomagnétisme est, avec la géodésie, la discipline de la physique du Globe à laquelle les mesures à bord des satellites ont apporté et apporteront le plus. En 1980 est lancé le premier satellite, Magsat, permettant la mesure vectorielle précise et la couverture globale du champ magnétique de la Terre. La représentation du champ du noyau, où siège la dynamo terrestre, s'en est trouvée grandement améliorée et, pour la première fois, les anomalies de très grande longueur d'onde produites par l'aimantation de la lithosphère ont pu être cartographiées et étudiées. Les satellites récemment lancés, après une pause malheureuse de vingt ans, ont permis de mesurer avec précision la variation du champ principal (la variation séculaire) au cours de ces vingt ans, et de mieux décrire les champs d'origine ionosphérique et magnétosphérique.

Terre solide et ionosphère. Les méthodes actuelles de tomographie de la croûte et de la lithosphère sont limitées par le nombre de stations sismiques et par la complexité du problème inverse dès que les distances de propagation sont importantes. Il faut donc imaginer d'autres méthodes d'acquisition du signal sismique. Pourquoi pas une télédétection des signaux sismiques de l'espace ? Des signaux post-sismiques ionosphériques sont en effet associés aux ondes sismiques de surface (ondes de Rayleigh) et aux tsunamis, qui sont des ondes de gravité océaniques. On voit là émerger une thématique nouvelle, très prometteuse.

2.1 Les projets actuels et futurs

La période actuelle et la décennie à venir s'avèrent tout à fait propices à l'étude de la Terre solide et de ses enveloppes superficielles, en raison de plusieurs missions spatiales en cours, programmées ou proposées.

En géodésie, on peut mentionner : le projet germano-américain Grace (2002) de mesure des variations spatiotemporelles de la gravité, fournissant pour la première fois des informations sur les stocks d'eaux continentales et les bilans de masse des calottes polaires ; la mission Goce (Esa, à lancer en 2007) pour la mesure très précise du champ de gravité à haute résolution et ses applications à la géodynamique des régions continentales ; les missions IceSat

(États-Unis, 2003) et Cryosat (Esa ; malheureusement détruit au lancement en octobre 2005) d'étude de la cryosphère ; les missions altimétriques en orbite (Topex/Poséidon, Jason-1, Envisat GFO) et décidées (Jason-2) pour la dynamique océanique, le niveau de la mer et la surveillance des eaux continentales de surface ; la mission européenne Galiléo (2008) et ses applications au positionnement précis et à la mesure des déformations à haute résolution ; le projet de mission « roue interférométrique » pour la mesure de la topographie continentale, avec des applications possibles en hydrologie continentale (soumise à l'Esa en 2005) ; la mission WaTer de surveillance des eaux continentales de surface (soumise à l'Esa en 2005).

En télédétection, la communauté des sciences de la Terre est aujourd'hui de nouveau face à une grande avancée technique qui peut modifier profondément notre façon d'observer et de comprendre la Terre. Depuis le début des années 2000, deux nouveaux types de données sont apparus : d'une part les images satellitaires optiques à haute résolution, avec un pixel inférieur ou égal au mètre (Spot5 : 2,5 m, Ikonos : 1 m, Quickbird : 70 cm), d'autre part les modèles numériques de terrain (MNT) de haute résolution (pixel < 90 m). Les premiers résultats obtenus en utilisant ces nouvelles données montrent un énorme potentiel, qui doit être exploité. Deux utilisations principales pourront en être faites : d'une part la cartographie détaillée d'objets que l'on ne pouvait même pas identifier auparavant, d'autre part la détection et la mesure de changements (déplacements, changements de volume). Les applications à l'étude de la rupture sismique, de l'activité volcanique, des mouvements des glaciers, sont évidentes. Au-delà, l'ensemble de la communauté s'intéressant à la géomorphologie et à l'évolution des surfaces continentales est intéressé.

En géomagnétisme, la mission Swarm, proposée conjointement par les Danois du Dri, les Allemands du GFZ et l'équipe de géomagnétisme de l'IPGP, vient d'être acceptée par l'Esa. Elle comportera trois satellites qui mesureront le vecteur champ ; cette mission nous fait entrer dans une ère nouvelle où fonctionnera continûment un véritable observatoire magnétique spatial, si toutefois l'effort nécessaire est maintenu.

Demeter, premier d'une série prévue de microsattelites du Cnes, a été lancé le 29 juin 2004. Le satellite a déjà enregistré nombres de signaux fort intéressants ; il n'a pas encore été observé, de façon certaine, de perturbation présismique.

Une mission de télédétection spatiale des ondes de surface et des tsunamis est proposée. C'est le projet Isis, une constellation de satellites en orbite Meo équipés de radars bifréquences et permettant de faire la tomographie de l'ionosphère et de reconstituer le front des ondes ionosphériques en trois dimensions et dans le temps, afin d'en extraire les vitesses de propagation des ondes de surface et des tsunamis.

2.2 Les équipes françaises

La communauté relevant directement de la géodésie spatiale compte environ 200 chercheurs et ingénieurs de recherche répartis dans plusieurs organismes : observatoire de la Côte-d'Azur, observatoire de Paris, Institut de mécanique céleste (ex-Bureau des longitudes), Laboratoire de recherche en géodésie de l'Institut géographique national, observatoire Midi-Pyrénées — qui accueillent des géodésiens de divers organismes publics de recherche (CNRS, Enseignement supérieur, IRD, Cnes, IGN, Service hydrographique de la Marine, etc.). Ce premier ensemble constitue le Groupe de recherche en géodésie spatiale (GRGS), qui permet à la communauté concernée de travailler de manière coordonnée pour développer des projets d'envergure. Le nombre de publications des chercheurs du GRGS a été en moyenne de 100 par an de 1990 à 2000. Il s'est élevé à 150 en 2004. Avec l'extension des applications des techniques de la géodésie spatiale à la structure de la Terre, la tectonique, l'océanographie et aujourd'hui l'hydrologie continentale, de nombreux autres chercheurs, « non spatiaux », contribuent à la valorisation des résultats de la géodésie spatiale dont ils utilisent de façon désormais régulière certaines techniques (GPS et InSAR). Il est difficile de recenser tous les membres de ce second cercle. Il en va de même des équipes qui utilisent les images optiques, les interférogrammes radar et les modèles numériques de terrain. Le nombre de chercheurs impliqués va croissant.

Le nombre de chercheurs qui se consacrent à l'exploitation des données magnétiques satellitaires est très faible. La principale équipe, à l'IPG de Paris, compte quatre chercheurs permanents ; une autre se développe à Nantes, qui s'intéresse davantage au champ magnétique des planètes. Quelques chercheurs encore utilisent ces données, à Brest, Strasbourg, Grenoble. Un laboratoire du CEA/Léti de Grenoble assure une excellente place à la France dans les développements expérimentaux. Le nombre de publications reposant sur des données de satellites magnétiques est d'une quarantaine, la plupart récentes (portant sur Champ et Oersted, lancés en 1999 et 2000).

Le responsable de la mission Demeter est membre du LPCE d'Orléans. La plupart de ceux qui en exploitent les données appartiennent à des laboratoires de géophysique externe. Quelques chercheurs de l'OPG de Clermont-Ferrand et de l'IPGP de Paris s'y ajoutent.

L'équipe de l'IPG de Paris, qui travaille sur la télédétection ionosphérique des ondes de surface et des tsunamis, comprend deux chercheurs et un ingénieur permanents, trois étudiants, et peut recourir à des moyens techniques de l'Onera. Il faut y ajouter deux membres du CEA (Dam). Une dizaine de publications portent sur ce sujet tout nouveau.

2.3 Forces et faiblesses

Les équipes françaises en géodésie spatiale se sont illustrées, sur le plan international, par nombre de résultats importants : modèles globaux du champ de gravité de la Terre (et de Mars et Vénus), observation et interprétation des irrégularités de la rotation terrestre, mesure ultraprécise des mouvements tectoniques et autres déformations de la croûte terrestre, géophysique marine, dynamique des océans, hausse du niveau de la mer, cycle global de l'eau, etc. La coopération entre équipes françaises et étrangères est la règle depuis longtemps : développement de réseaux de mesures globaux (télémétrie laser, GPS, gravimétrie absolue) dont la mise en œuvre ne peut se faire qu'à l'échelle internationale, coopération européenne de longue date sur le champ de gravité, collaboration franco-américaine étroite avec les missions d'altimétrie spatiale Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2, préparation de la mission européenne Goce... Ajoutons que la discipline trouvera un champ d'application « sociétal » avec le projet « GMES » (Global monitoring of environment and society) de l'Union européenne (risques naturels et ressources en eau). Mais la communauté de géodésie spatiale au sens strict est petite, sa pyramide des âges déséquilibrée ; elle ne pourra conserver sa place de premier plan que si elle est renouvelée à temps. Une part importante des forces vives se consacre à des activités de recherche et développement, à la mise en place de services internationaux, à l'élaboration de produits à forte valeur ajoutée. Ces activités doivent être mieux appréciées. De manière générale, le soutien des agences spatiales doit être assuré. Une exigence récurrente est la continuité des observations grâce à la mise en place d'observatoires spatiaux pérennes, faisant appel à des coopérations interagences (comme pour d'autres aspects de l'observation de la planète). Les synergies sol-espace dans certains secteurs (exemple : tectonique, risques naturels), où l'utilisation combinée d'observations *in situ* et d'observations spatiales est indispensable, ne sont souvent pas à la hauteur des enjeux.

En télédétection, les équipes françaises sont incontestablement parmi les premières du monde dans l'exploitation des images satellitaires (première utilisation d'images Landsat pour la sismotectonique à grande échelle, d'images Spot pour la tectonique quaternaire, d'images métriques pour la cartographie d'une rupture sismique). La pleine utilisation des nouvelles données se heurte, dans toutes leurs applications, à leur coût élevé. Mais il faut bien reconnaître que les équipes françaises sont peu nombreuses, dispersées, et surtout qu'elle ne se sont pas assez engagées — à l'instar, par exemple, des équipes américaines — dans les travaux que permettent ces magnifiques nouvelles données, images optiques et modèles numériques de terrain de haute résolution, d'interférométrie radar. Un, ou mieux, deux centres d'excellence devraient en tirer un parti croissant pour la réduction des risques naturels (ruptures sismiques, éruptions volcaniques, glissements de terrain).

En dépit de leur faible nombre, les chercheurs français en géomagnétisme ont pris une part de tout premier plan dans l'exploitation des données des satellites Magsat, et surtout, Oersted et Champ. Ils ont établi des relations étroites et durables avec les équipes américaines, danoises et allemandes. Le succès qu'est la décision par l'Esa de retenir la mission Swarm en est l'illustration. Mais cette petite communauté est fragile, insuffisante en nombre alors que des données abondantes vont désormais régulièrement venir de l'espace. Les développements instrumentaux reposent sur un laboratoire du CEA/Léti, de grande qualité, mais dont l'activité principale n'est pas la magnétométrie.

Une équipe française a été la pionnière de la télédétection ionosphérique des ondes de surface des séismes et des tsunamis. De toute évidence, au vu de l'importance de ce sujet frontière, son effectif est trop faible, en chercheurs et en ingénieurs.

Note

L'étude de la planète Terre ne se fait plus sans considérer les autres planètes telluriques (voir chapitre 3). L'un des grands défis à relever sera d'installer sur celles-ci, à l'image de ce qui se fait sur la Terre, des observatoires géophysiques permettant d'acquérir les données sismiques, géodésiques, magnétiques, indispensables à la modélisation de leur intérieur.

Recommandations

Ce résumé montre l'existence en France, dans le domaine de l'application des observations et mesures spatiales aux sciences de la Terre solide, de petits groupes de grande qualité qui ont su apporter des découvertes et des progrès très significatifs à la communauté scientifique mondiale. Mais il montre aussi leur dispersion relative, leur faiblesse numérique et un soutien parfois insuffisant des agences. On peut espérer désormais une meilleure organisation au niveau national, un regroupement de ces disciplines et leur rapprochement au sein d'un petit nombre de pôles bien identifiés, et un soutien confirmé (ou plus confirmé) des organismes (tant Cnes et Esa que Insu-CNRS). Une préoccupation reste la formation puis le recrutement de jeunes chercheurs et ingénieurs au regard d'une pyramide des âges déséquilibrée et de proches départs à la retraite de certains de ceux qui ont assuré ces développements depuis 30 ans.

Il ne faut pas brûler les étapes, développer de nouvelles missions d'observation de la Terre dans la seule perspective d'applications opérationnelles. Certains exemples, en météorologie et en océanographie, montrent que les applications

opérationnelles, avec fourniture de produits à des clients, ne deviennent possibles qu'après des avancées scientifiques décisives.

Les synergies sol-espace sont indispensables dans certains secteurs (par exemple la tectonique, le magnétisme...). Le segment sol correspondant doit donc, lui aussi, être développé au niveau requis.

3 | Soleil, Système solaire, systèmes planétaires, exobiologie

Contributions au rapport détaillé de Michel Blanc, Yves Langevin, Philippe Lognoné, Philippe Louarn, Daniel Rouan

3.1 Contexte scientifique et programmatique

Les grandes questions scientifiques concernent la compréhension de l'interaction Soleil-Terre, la formation et l'évolution du Système solaire dans le contexte de la formation des systèmes planétaires (qui passe entre autres par la planétologie comparée au sein du Système solaire) et enfin la question de l'« habitabilité » des planètes et de l'exobiologie (recherche de traces de vie ou de vie fossile dans le Système solaire, nombre de planètes telluriques dans cette zone habitable, recherche de signatures biologiques dans leurs atmosphères).

Par sa nature même, l'étude des objets du Système solaire a une très forte composante de recherche spatiale, même si les observations au sol y jouent un rôle indiscutable.

Physique solaire. L'astronomie solaire a bénéficié, tout comme les autres branches de l'astronomie, de l'ouverture de nouveaux domaines de longueur d'onde. La continuité des observations en orbite lointaine est également un atout essentiel. On peut considérer que les missions spatiales, en particulier la mission Soho couvrant une large gamme d'instruments et ayant observé le soleil pendant la quasi-totalité d'un cycle solaire de 11 ans, sont à la base de l'essentiel des progrès majeurs effectués sur la structure interne, l'origine des champs magnétiques, les processus de chauffage qui portent la couronne solaire à des températures de plusieurs millions de degrés et les processus d'accélération du vent solaire. Ces questions continueront à se situer au cœur de cette thématique, s'appuyant à court et moyen terme sur la multiplication des points de vue, avec des observations à haute résolution spatiale et temporelle (SDO), des observations stéréoscopiques (Stéréo) et des observations directes des régions polaires depuis les moyennes latitudes (Solar Orbiter). L'exploitation des données de ces missions permettra de préciser les perspectives à plus long terme en physique

solaire. De plus, la compréhension des interactions Soleil-Terre, en particulier celles du vent solaire (en particulier suivant les éruptions solaires) avec la magnétosphère terrestre, permettent de prédire les effets sur les transmissions radio ou sur les satellites en orbites terrestres ou héliocentriques. Cette activité, connue sous le nom de Météo de l'espace, constitue un secteur opérationnel qui se développera dans les années à venir en s'appuyant sur la composante recherche.

Plasmas spatiaux. La physique des plasmas spatiaux a des liens forts avec l'astronomie solaire en raison du rôle prépondérant du champ magnétique et des flux de particules émis par le Soleil tant dans le milieu interplanétaire que dans la physique des environnements planétaires (en particulier la problématique des relations Soleil-Terre). Elle s'est développée dès les années 1960 à partir des résultats des missions *in situ* dans la magnétosphère terrestre. Un pas très important est en train d'être franchi pour la compréhension des processus physiques avec les premières études en trois dimensions avec Cluster. La mission Ulysse a permis d'observer les régions du Soleil à haute latitude de 1 à 4 unités astronomiques (UA) pendant plus d'un cycle solaire, la mission Voyager (lancée en 1978) atteint actuellement les limites de l'héliosphère et Solar Orbiter explorera les régions de moyenne latitude entre 0,2 et 0,7 UA. Les principales perspectives se situent dans deux directions : l'approfondissement de l'étude des processus en physique des plasmas spatiaux, avec des missions 3D ciblées (MMS) avec à plus long terme une mission 3D multi-échelles (tétraèdres emboîtés) ; l'étude de ces processus dans des conditions aux limites différentes, avec l'exploration en cours de la magnétosphère de Saturne (Cassini) et à moyen terme de celle de Mercure (Bepi Colombo), qui se situent aux deux extrêmes en termes d'échelle de temps et de taille.

Les systèmes planétaires. L'exploration des objets constitutifs du Système solaire (planètes, satellites, astéroïdes et comètes) a eu comme premier résultat de révéler toute la diversité de ces objets. Cette étape est pratiquement terminée : seuls les objets transneptuniens, dont Pluton fait partie ainsi que les nombreux objets de taille comparable récemment découverts, n'ont pas encore été visités par une sonde spatiale. L'étude des astéroïdes, des comètes et des météorites ou micrométéorites qui en proviennent joue un rôle central pour la thématique « origine du Système solaire », car ils constituent les témoins des premières phases du processus de formation planétaire. La planétologie comparée implique les comparaisons entre objets, y compris la Terre, avec en première ligne l'exploration de Mars (atmosphère, volcanisme, tectonique) et dans une moindre mesure Vénus (effet de serre, tectonique), Titan (atmosphère d'azote) ou Mercure (champ magnétique).

Les grandes questions scientifiques portent sur l'origine du Système solaire, l'évolution différenciée des planètes et les conditions d'apparition de la vie. L'exobiologie, thématique en développement rapide, a des relations directes

avec la planétologie comparée lorsqu'il s'agit d'identifier les contextes favorables à l'apparition de la vie (présence d'eau liquide aujourd'hui ou dans un passé lointain). La découverte de fossiles éventuels est un objectif extrêmement difficile, mais dont les conséquences débordent de très loin les contours de la recherche spatiale. Les résultats récents de Mars Express et des véhicules de la Nasa renforcent l'importance de l'exploration de Mars pour l'exobiologie avec, à plus long terme, des perspectives intéressantes mais difficiles concernant Titan ou les océans enfouis d'Europe. Au niveau programmatique, on peut définir un petit nombre de grands enjeux, en particulier les études *in situ* (y compris sous la surface) et le retour d'échantillons de Mars ou les perspectives d'exploration du Système solaire externe à la lumière des résultats de Galiléo (Jupiter) et Cassini/Huygens (Saturne/Titan).

Les thématiques de l'exploration du Système solaire se placent dans une perspective plus large avec la découverte d'un nombre de plus en plus grand de systèmes planétaires autour d'autres étoiles. La découverte de planètes géantes très proches de leur étoile a profondément renouvelé la problématique de l'origine du Système solaire avec la mise en évidence d'un processus de migration planétaire. On peut aujourd'hui considérer qu'il y a une thématique de l'origine des systèmes planétaires dans laquelle s'intègre l'apport des observations effectuées dans notre système. On peut maintenant envisager une planétologie comparée des systèmes planétaires, avec l'apport de la mission Corot (Cnes avec participation Esa, objets de la taille de Neptune) puis des missions Kepler (Nasa, planètes telluriques) et Gaia (Esa, planètes de type Jupiter). La perspective majeure pour cette thématique est la détection directe de planètes extrasolaires par interférométrie initiée par les équipes françaises : projet Darwin (Esa) dont la réalisation est envisagée comme conjointe avec le projet TPF (Nasa) à l'horizon 2015-2020. La caractérisation de la composition d'atmosphères des planètes extrasolaires permettra une première approche des conditions favorables à l'apparition de la vie sur les planètes.

3.2 Forces et faiblesses de la communauté française

La France occupe la première place dans la planétologie en Europe. La force principale de la communauté française dans ces disciplines (300 FTE/an en y incluant les doctorants et post-doctorants) est le très large spectre de contributions instrumentales et de participation aux équipes scientifiques. Il n'y a pas de politique de créneau, la communauté étant impliquée dans la quasi-totalité des techniques d'observation spatiale. L'approche de la communauté française en planétologie, physique solaire et physique des plasmas spatiaux privilégie en effet une participation au niveau de Co-Investigateur (Col) sur de nombreux instruments.

On peut noter la remarquable montée en puissance de l'Europe depuis 10 ans dans un secteur qui était totalement dominé par les États-Unis et dans une moindre mesure l'URSS, avec un rôle de leader sur les deux missions phares de la thématique Soleil/Terre (Soho et Cluster), deux succès récents en exploration planétaire (Mars Express et la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan) et un programme ambitieux pour la période 2005-2015 (mission Venus Express, phase opérationnelle de la mission cométaire Rosetta, mission Bepi Colombo vers Mercure).

Sur chacune des missions Soho, Cluster, Mars Express, Venus Express, Rosetta, Bepi Colombo, la communauté française a eu deux positions de PI pour une moyenne de 8 instruments par mission.

Jusqu'à une date récente, le soutien du Cnes a permis à la communauté française en planétologie de contribuer à un niveau de l'ordre de 25 % aux charges utiles des missions « Système solaire » de l'Agence spatiale européenne, contribution supérieure à celle de la France au programme obligatoire (20 % jusqu'en 1997, 16 % aujourd'hui). Depuis le début des années 1990, la priorité européenne a été clairement affirmée par rapport aux contributions aux missions Nasa, avec 85 % du budget des expériences consacré aux charges utiles des missions de l'Esa.

Cette approche donne à la communauté française le rôle le plus important devant l'Allemagne en terme de participants scientifiques. La mission Cassini/Huygens vers le système de Saturne ayant conduit à la spectaculaire descente de la sonde Huygens sur Titan est un exemple intéressant et représentatif : la sonde Huygens sous responsabilité européenne et les charges utiles européennes représentent 30 % du financement global (70 % pour la Nasa). La France, avec 60 participants scientifiques sur 22 des 23 expériences se situe derrière les États-Unis (200) mais nettement devant l'Allemagne (40) et les autres grands pays européens.

Au niveau des thématiques, on peut noter quelques points particulièrement forts. L'étude des atmosphères planétaires a constitué l'un des premiers domaines où la France s'est positionnée à un bon niveau, en accompagnant la mission Voyager et en exploitant toutes les possibilités de l'astronomie sol. De même, on peut faire référence à l'accompagnement des missions Apollo pour le développement de positions fortes en ce qui concerne l'analyse d'échantillons. Malgré l'abandon du programme de retour d'échantillons de Mars par le Cnes et la Nasa, cette dynamique a pu être maintenue avec une participation à des programmes Nasa comme Genesis (vent solaire) et Stardust (coma cométaire) dans la perspective du retour d'échantillons de Mars en 2013-2015. La mise en place d'un programme européen autonome, avec tout d'abord la mission Giotto (1986), puis la contribution à Cassini/Huygens (1997), les missions Mars

Express, Rosetta, Smart-1 et Venus Express (2003-2005), a permis le développement de compétences instrumentales tant en télédétection que pour les études *in situ*. Le développement rapide de la thématique « planètes extrasolaires » s'appuie sur les compétences reconnues de la communauté française pour l'astronomie à haute résolution angulaire.

Recommandations spécifiques

Physique des plasmas spatiaux

Il faut souligner l'importance du développement de nouvelles générations d'instruments. La génération actuelle a donné satisfaction, mais le développement de la miniaturisation est indispensable en particulier dans la perspective de flottes de microsatellites. Cet effort est déjà engagé en physique solaire dans la perspective de Solar Orbiter. Ces développements, importants pour ces disciplines, viendront alimenter l'ensemble du secteur spatial hors recherche et contribuent à renforcer la position européenne dans l'ensemble stratégique des activités spatiales.

La nécessité d'une relève dans ce secteur est particulièrement évidente au niveau des personnes. La pyramide des âges n'est pas très favorable. La communauté du Programme national Soleil Terre (PNST) a construit ses nombreux succès sur une génération de scientifiques intéressés par les projets et l'instrumentation mais proches aujourd'hui de la retraite. Il faut éviter de passer sous un seuil critique pour ce type de profils.

Planètes du Système solaire

La communauté concernée a une pyramide des âges équilibrée, avec un bon niveau de recrutement lors des quinze dernières années. Il y a un très fort recouvrement avec la thématique « origine du Système solaire », et un recouvrement plus faible avec la thématique « planètes extrasolaires ». Compte tenu de l'importance croissante de cette thématique, il faut développer ces interactions.

Le problème principal est le maintien des compétences en matière instrumentale. La communauté française est peu impliquée dans le projet Jno récemment approuvé (orbiteur polaire de Jupiter). Les prochaines échéances, depuis le report de l'ambitieux projet Jimo de la NASA, concernent des missions à l'horizon « Cosmic Vision » (2016-2020), en particulier une mission d'étude détaillée des satellites galiléens internes, Io et Europe, dont la tectonique active a pour origine la dissipation par effet de marée.

L'exploration des planètes géantes à l'extérieur du Système solaire dépend de la disponibilité de générateurs électriques non solaires. Il est recommandé d'explorer le développement de générateurs basés sur des sources radioactives pouvant s'appuyer sur les compétences du CEA.

Planètes extrasolaires

Cette thématique reconnue comme prioritaire dans tous les exercices de prospective de l'astronomie connaît un essor rapide en France en raison de plusieurs facteurs, entre autres :

- la très forte compétence des équipes françaises en haute résolution angulaire, particulièrement en interférométrie ;
- la sélection par le Cnes en 1993 de la première mission en termes de détection de planètes par occultation (Corot). Cette mission conserve une avance de plus de deux ans par rapport aux missions plus ambitieuses comme Kepler (Nasa) ;
- les compétences en modélisation de la formation et de l'évolution des systèmes planétaires ;
- l'intérêt pour l'exobiologie dans la communauté française.

Cette structuration se retrouve pour la préparation de la principale perspective spatiale à moyen terme, TPF/Darwin (2015-2020), initiée en Europe par les équipes françaises, qui mobilise dès à présent la communauté concernée avec des travaux préparatoires notamment à l'IAS, à l'OCA et au Lesia.

Cette communauté très dynamique a une pyramide des âges favorable. On peut cependant noter une difficulté à retenir certains éléments particulièrement prometteurs, compte tenu des contraintes sur les recrutements statutaires, et ce malgré un effort soutenu en termes de fléchage. C'est particulièrement net pour les instrumentalistes, très sollicités par les États-Unis, alors qu'ils sont indispensables à un positionnement fort de la communauté française pour la grande échéance que constituera la sélection de la charge utile de TPF/Darwin.

4 | Astronomie

Contributions au rapport détaillé de Claude Catala, Jacques Paul, Catherine Turon, Laurent Vigroux

L'astrophysique qui s'est initialement développée à partir des observations au sol dans le domaine de la lumière visible, puis à partir de 1945 de la radio, a eu

accès à partir des années 1960 et de façon progressive à l'ensemble du spectre électromagnétique des sources cosmiques grâce aux observations spatiales permettant d'observer les rayonnements absorbés dans la haute atmosphère. La turbulence atmosphérique dégradant les images même aux fréquences où celle-ci est transparente, l'utilisation de l'espace est devenue pour l'astrophysique, depuis les années 1990, la source dominante des observations.

Des secteurs entiers de l'astrophysique, en particulier ceux qui sont directement liés à la physique fondamentale, n'ont pu se développer qu'avec l'avènement des satellites observant en rayons X et gamma ou dans le domaine submillimétrique. Ce sera le cas dans les années à venir pour l'astronomie non photonique, avec l'avènement des observatoires d'ondes gravitationnelles spatiaux.

4.1 Cosmologie et univers lointain

La formation et l'évolution des galaxies restent un des problèmes non résolus de l'astrophysique moderne. Deux approches théoriques s'opposent : l'une qui suppose que les galaxies se forment comme des objets isolés, l'autre qui suppose que les galaxies se construisent progressivement par fusions successives de systèmes plus petits, dans le prolongement des succès du modèle de formation hiérarchique des grandes structures. Néanmoins, cette dernière approche rencontre des difficultés au vu des observations récentes. Les observations de galaxies lointaines sont et resteront un champ où les expériences spatiales détectent les objets (HST, Spitzer, Chandra) mais où les études détaillées, notamment spectroscopiques, sont effectuées sur les grands télescopes au sol.

La nature des premiers objets à s'allumer dans l'Univers (trous noirs, étoiles isolées ou galaxies formant leurs premières étoiles) reste elle aussi complètement ouverte. Le programme joint Nasa-Esa du JWST, qui devrait être lancé vers 2013, se donne pour objectif principal la détection de ces premières sources.

4.2 Objets compacts

Le rayonnement X et gamma est émis par les gaz les plus chauds et révèle les processus les plus énergétiques de l'Univers, nous permettant ainsi d'utiliser ce dernier comme laboratoire et atteindre des situations physiques inaccessibles sur Terre. Les objets compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs, sont le siège privilégié de phénomènes de haute énergie mais les mécanismes physiques reliant l'accrétion de matière sur l'objet compact et l'éjection de matière dans des jets collimatés qui lui est associée ne sont toujours pas compris. Cette association

semble être une loi universelle, puisqu'on la retrouve dans de très nombreux systèmes. Enfin, la nature de l'écoulement de matière au voisinage de l'objet compact reste elle aussi très mal comprise. Par exemple il semble que, au moins à faible taux d'accrétion, le disque laisse place à un écoulement à géométrie quasi sphérique, très chaud et dilué, peu efficace pour convertir l'énergie gravitationnelle en rayonnement ; ceci expliquerait la très faible luminosité et le spectre dur des systèmes contenant un trou noir lorsque ce taux d'accrétion est faible. L'étude de cette physique permettrait enfin de mieux contraindre les propriétés des trous noirs et de vérifier les prédictions de la relativité générale en champ fort. La réponse à ces questions ne pourra provenir que de l'observation simultanée, multilongueurs d'onde, de ces sources pour lesquelles les missions X et gamma joueront un rôle essentiel. La physique des objets compacts est ainsi l'enjeu majeur de deux programmes, Simbol-X en phase d'étude au Cnes, et Xeus à l'Esa.

L'ouverture d'une nouvelle fenêtre sur l'Univers par les détecteurs d'ondes gravitationnelles, outre son intérêt pour la physique fondamentale, permettra l'émergence d'une nouvelle astronomie basée sur un vecteur de l'information autre que le rayonnement électromagnétique qui aura en particulier un impact considérable sur notre façon d'aborder l'étude des objets compacts. Ce n'est qu'avec les détecteurs spatiaux comme Lisa, qui donnent accès aux basses fréquences, que l'astronomie des ondes gravitationnelles permettra d'accéder à un grand nombre de sources.

4.3 Physique stellaire et milieu interstellaire

La description de la structure interne et de l'évolution des étoiles de toutes masses est un des grands succès de l'astrophysique basé principalement sur les observations au sol dans le domaine visible (y compris les résultats marquant apportés par l'astrométrie). En revanche, les phases initiales et finales de cette évolution restent des questions clés pour les décennies à venir. Les observatoires spatiaux comme le HST, Iso et XMM ont été peu utilisés par la communauté stellaire française. Cependant, les équipes françaises ont joué un rôle clé dans l'apport du spatial à la physique stellaire via l'astrométrie, qui a été très importante, comme le détaille la section suivante.

Le point fort de la communauté stellaire française dans le spatial est le projet Corot, qui a un double objectif de sismologie stellaire et de détection de planètes extrasolaire par transits.

Du côté des stades finaux de l'évolution stellaire, c'est la physique des objets effondrés et la physique en champ gravitationnel fort qui sont identifiées comme des thèmes futurs majeurs.

La formation des étoiles et des disques protoplanétaires est liée à l'origine des systèmes planétaires, unanimement reconnue comme une question majeure de l'astrophysique à moyen et long terme (ces points sont traités dans la section A3).

Avec les données de l'observatoire infrarouge Iso, la question centrale de la formation des étoiles, et plus encore des conditions physiques qui règnent dans les nuages moléculaires où les étoiles se forment, ont progressé de façon spectaculaire. Les équipes françaises ont joué un rôle très important dans ces progrès en utilisant la spectroscopie dans l'infrarouge thermique et l'infrarouge lointain quasi inaccessible à l'observation avant Iso. Par exemple, les études des glaces condensées sur les grains interstellaires dans les nuages protostellaires ont été combinées avec les données de spectroscopie moléculaire au sol fournies par les télescopes au sol de l'Iram pour étudier les mécanismes de refroidissement critiques pour la formation des étoiles.

D'une manière générale, la communauté scientifique française a obtenu une fraction du temps sur l'observatoire Iso de près de 30 % (très supérieure à la part française dans le programme obligatoire de l'Esa).

Ces questions restent encore très ouvertes du fait de la nature complexe de cette physique : rôles simultanés de la thermodynamique du gaz, de la turbulence, des champs magnétiques et des poussières et nanoparticules. Les équipes françaises ont pris une part importante dans l'étude des phénomènes dissipatifs de la turbulence et leur rôle potentiel dans la structuration du gaz à très petite échelle. Ces études se prolongent avec le satellite de la Nasa Spitzer et sont un objectif majeur de l'observatoire submillimétrique européen Herschel de l'Esa.

4.4 Astrométrie

L'astrométrie est une technique visant à mesurer la position d'une étoile de manière précise dans un système de référence. Cette technique très ancienne a des retombées dans de très nombreux domaines de l'astronomie. La mesure des parallaxes fournit une échelle de distance absolue. L'astrométrie permet la détermination de systèmes de référence qui à son tour rend possibles des recherches en physique fondamentale ou le positionnement par satellite, GPS ou bientôt Galiléo. Combinée avec des mesures de vitesse radiale, elle permet d'obtenir des reconstructions 3D de notre Galaxie. C'est une discipline qui bénéficie d'une très forte implication des équipes françaises, sur les plans théorique, observationnel et instrumental.

Le succès récent le plus notable de cette discipline est le satellite Hipparcos. À ce jour, près de 1 500 articles dans des revues à rapporteurs ont été tirés

de ses mesures. Cela concerne de très nombreux domaines : systèmes de référence, petits corps du Système solaire, structure 3D des amas stellaires jeunes (Hyades), fonction de luminosité des étoiles de faible masse, structure et formation de la Galaxie. Un des résultats les plus visibles obtenus reste la réconciliation des échelles de temps stellaire et cosmologique mesurée par l'expansion de l'Univers.

Il faut noter la très forte implication française dans Hipparcos. Les chercheurs français ont joué un rôle dominant dans ce programme : proposition de l'idée originale de l'instrument ; chercheurs français dirigeant deux des quatre consortiums impliqués dans la préparation scientifique de la mission ; implication dans la plupart des grandes découvertes effectuées à partir des observations d'Hipparcos.

Le futur est évidemment le projet de satellite Gaia de l'Esa, qui devrait être lancé en 2012. Gaia représente un saut quantitatif par rapport à Hipparcos. Hipparcos a mesuré la position d'environ 110 000 étoiles, Gaia en mesurera un milliard. La précision des mesures effectuées avec Hipparcos était de l'ordre de la milliseconde d'arc ; celle de Gaia sera voisine de 10 microsecondes d'arc. Cette précision exceptionnelle permet d'obtenir des parallaxes sur les étoiles les plus distantes de notre galaxie. Les retombées attendues de Gaia couvrent là encore de très nombreux domaines : physique fondamentale et tests de la relativité générale, physique stellaire, détermination de la structure 3D de notre Galaxie, formation de notre Galaxie, échelles de distance du groupe local de galaxies, exoplanètes. L'astrométrie, avec Hipparcos, a été une des activités les plus réussies de l'astrophysique française. Il est essentiel qu'elle garde ce domaine d'excellence. Cela passera par une implication massive du Cnes et du CNRS dans le soutien à la préparation et à l'exploitation scientifique de Gaia.

4.5 Rôle du spatial dans l'astronomie

L'astronomie spatiale a été à l'origine d'une très grande fraction des découvertes majeures de l'astronomie moderne. Des satellites comme Iras, Cobe et plus récemment WMAP ont révolutionné les domaines de la formation des étoiles et de l'évolution des galaxies, ou de la cosmologie. Hipparcos a permis la première métrologie précise de notre Galaxie. Iso a permis d'obtenir des informations cruciales sur le milieu interstellaire et l'évolution des galaxies. XMM et Chandra ont fait faire des avancées significatives sur les objets compacts, les amas de galaxies, et ont permis de découvrir une nouvelle catégorie de quasars. Seul le domaine de la recherche des planètes extrasolaires a été dominé par des observations du sol grâce aux possibilités fournies par la grande résolution spectrale et la disponibilité de télescopes de taille moyenne sur de longues périodes. Mais là aussi des résultats importants ont déjà été obtenus,

comme la première mesure de la composition de l'atmosphère d'une planète grâce au satellite Fuse. Et ce domaine sera bientôt le domaine principal d'observatoires spatiaux comme Corot, Kepler, Gaia et à plus long terme Darwin et Planet Finder.

Observatoires sol				
Keck	1993	1124	35945	32,0
VLT	1997	824	9660	11,7
GEMINI	1999	378	2496	6,6
SUBARU	2000	250	2843	11,4
Observatoires spatiaux				
Hipparcos	1989	1481	22514	15,2
Cobe	1990	775	35861	46,3
Iso	1995	1320	24580	18,6
XMM	1999	1220	16211	13,3
HST	1990	7953	215964	27,2
Chandra	1999	1955	33259	17,0
Fuse	1999	468	4511	9,6
Spitzer	2003	232	1665	7,2
Boomerang (ballon)	2001	104	4187	40,3
Archeops (ballon)	2002	24	406	16,9
WMAP	2003	340	11498	33,8

Tableau A.1
Principaux observatoires mondiaux.

Le tableau indique, pour plusieurs satellites (et expériences sous ballon stratosphérique) ayant effectué de grands relevés systématiques ou pour des observatoires sol et spatiaux, le nombre d'articles publiés et les taux de citations. Bien que cette étude bibliométrique ne permette pas d'obtenir des résultats quantitatifs à mieux que 20 % près, elle montre l'apport dominant des missions spatiales dans la cosmologie et l'astrophysique. Le nombre d'articles publiés et les taux de citations sont en moyenne supérieurs à ceux des observatoires au sol. Cela est vrai aussi bien pour les missions Nasa que pour les missions européennes. On peut noter que le fort taux de citations du télescope Keck est essentiellement dû

à des articles publiés entre 1993 et 2000, à une époque où le Keck était le seul télescope de la classe 10 m en service et où il a beaucoup été utilisé pour des programmes joints avec le HST.

La majorité des astronomes utilise de manière indifférenciée les données de toute origine. On ne peut donc pas parler d'une communauté d'astrophysiciens du spatial. En revanche, l'astronomie spatiale repose sur l'existence de chercheurs et ingénieurs spécialisés dans la conception, la réalisation et l'intégration des instruments spatiaux, leur étalonnage au sol et dans l'espace, la définition de leurs modes opératoires et le traitement des données. La France a su se doter d'un système original et très efficace, qui a été mis en place dans les années 1970-1980. Cela repose sur un petit nombre de laboratoires dits « spatiaux » disposant d'un fort potentiel d'ingénieurs spécialisés, de chercheurs en instrumentation et en traitement de données et dotés d'infrastructures de tests importantes.

Ceci représente à l'échelle nationale environ 400 ingénieurs et techniciens, et une centaine de chercheurs. À part un laboratoire du CEA, tous dépendent du CNRS, mais ont bénéficié d'un soutien important du Cnes, tant pour leurs infrastructures que pour un soutien en personnel temporaire. Cette organisation s'est montrée particulièrement efficace et a permis à la France d'avoir des places de premier plan sur tous les programmes de l'Agence spatiale européenne, ou dans des programmes bilatéraux. C'est une organisation unique en Europe, de par le nombre de laboratoires concernés.

4.6 Problèmes

La prospective Esa entreprise pour définir le programme Cosmic Vision qui sera présenté à la prochaine conférence ministérielle a fait émerger un certain nombre de thématiques prioritaires. Ces thématiques recoupent partiellement celles définies lors de l'exercice de prospective de l'Insu, reprises dans le cadre de la prospective Cnes. Les deux domaines de la cosmologie et des planètes extrasolaires émergent dans les deux exercices. Les exercices de prospective de l'Insu et de l'IN2P3 permettent de faire émerger les priorités correspondantes pour les recrutements de chercheurs.

Depuis une dizaine d'années, on assiste à une augmentation de la complexité des charges utiles sur les observatoires spatiaux. Il y a de nombreuses raisons à cette évolution, dont la principale reste une raison scientifique. L'astrophysique spatiale est progressivement passée d'une phase exploratoire à une phase d'analyse détaillée nécessitant des instruments avec des performances inégalées en termes de résolution spectrale, spatiale et de sensibilité, et cela

dans tous les domaines de longueur d'onde. Cette complexité croissante des instruments est associée à une complexité des consortiums en charge de ces instruments. Leurs coûts sont tels qu'ils ne peuvent plus être à la charge d'un seul pays. Les consortiums instrumentaux comportent maintenant souvent une dizaine de laboratoires et de pays. Le management de ces consortiums devient impossible à effectuer par un simple laboratoire, voire même par une agence spatiale comme le Cnes qui n'est pas en mesure d'assumer les risques liés au grand nombre de participants. Ceci plaide pour une responsabilité accrue de l'Esa sur les charges utiles. Ceci ne peut se faire qu'en augmentant de manière significative le financement des programmes scientifiques de l'agence. À l'heure actuelle, le coût des charges utiles financé par les agences nationales d'une mission comme Herschel représente presque la moitié du coût à la charge de l'Esa. Cette division des responsabilités ne permet pas une gestion optimale de ces missions, chaque partenaire cherchant à minimiser ses propres coûts plutôt que de chercher la solution la meilleure pour l'ensemble du projet.

5 | Physique fondamentale et cosmologie

Contributions au rapport détaillé de François Bouchet et Serge Reynaud

5.1 Cosmologie

La cosmologie étudie l'évolution globale de l'Univers et l'histoire de sa structuration. Les questions fondamentales sont ici l'origine de notre Univers, les lois qui gouvernent son évolution, son contenu en matière et en énergie, et la compréhension de sa structuration progressive. Plus précisément, on peut identifier dans la cosmologie observationnelle d'aujourd'hui deux grands axes de travail :

- l'étude du contenu de l'Univers et ses différentes composantes (densités d'énergie et équations d'état), ainsi que celle des paramètres cosmologiques qui décrivent l'évolution de l'Univers. L'Univers dans lequel nous vivons est en effet paradoxal : $\sim 3/4$ d'énergie noire dont l'effet net est répulsif, $\sim 1/4$ de matière noire froide dont la présence se fait sentir dans la dynamique des galaxies et des amas ou dans la déformation de l'image d'objets d'arrière-plan, tandis que les atomes usuels des étoiles et du gaz, ou baryons, ne contribuent qu'à environ 5 % du tout ;
- l'étude du développement au cours du temps des structures de l'Univers, pour les différentes composantes et à différentes échelles.

Dans les deux cas, les astrophysiciens se placent dans le cadre d'un modèle cosmologique standard qui a été validé dans ses grandes lignes et dont il s'agit de déterminer précisément les paramètres. Un des enjeux excitants des expériences futures serait de trouver des écarts à ce modèle, pouvant être le signe d'une nouvelle physique.

Ce domaine scientifique se situe naturellement à l'interface de l'astrophysique, de la physique théorique et de la physique des particules. Plusieurs découvertes majeures ont eu lieu au cours des cinq dernières années, basées sur deux domaines observationnels nécessitant des moyens spatiaux : la mesure des anisotropies du corps noir cosmologique à 2,7 K (CMB dans la suite), et l'observation des supernovae de type Ia. Pour le CMB, ce sont d'abord des expériences sous ballon (dont Archeops, à pilotage français) qui ont permis de montrer que la courbure spatiale de l'Univers est proche de zéro, indiquant que la densité d'énergie totale de l'Univers est très supérieure aux recensements astrophysiques classiques : rayonnement, étoiles, galaxies et matière noire détectée par son influence gravitationnelle. Par ailleurs, les observations avec le télescope spatial Hubble de supernovae de type Ia dans des galaxies lointaines ont montré que l'expansion de l'Univers est actuellement en accélération alors qu'il devrait décélérer si sa dynamique était dominée par la matière ordinaire à pression positive. Ceci implique la présence d'une constante cosmologique effective non nulle, dont l'interprétation reste ouverte. L'interprétation en terme d'« énergie noire » pose un problème théorique fondamental. En 2003, les mesures des anisotropies du CMB par le satellite WMAP ont confirmé, indépendamment des supernovae, l'existence de cette énigme théorique.

Pour la mesure des anisotropies du CMB, la prochaine étape sera le satellite Planck qui sera lancé par l'Esa à la mi-2007. Le gain en sensibilité, en résolution, et en domaine de fréquences exploré permettra la cartographie définitive des anisotropies de température et une première mesure à haute sensibilité de la polarisation du CMB. Dans ce domaine, la position française est particulièrement bonne, avec la responsabilité du principal instrument de la mission Planck.

À plus long terme, les différents exercices de prospective des agences spatiales dans le monde ont tous abouti à considérer les expériences de mesures de la polarisation des anisotropies du CMB, du cisaillement gravitationnel des objets d'arrière-plan par la matière noire d'avant-plan, et des supernovae comme les projets spatiaux phares en cosmologie sur les quinze prochaines années. Ces trois approches permettent de contraindre différentes combinaisons de paramètres du même modèle, mais à des échelles de temps, d'espace, et d'énergie très différentes. Leur confrontation permet en outre de tester le modèle cosmologique standard lui-même et la théorie de la relativité générale sur laquelle il s'appuie. Ces projets pourraient permettre la première détection du fond

d'ondes gravitationnelles primordial, de caractériser l'équation d'état de l'énergie noire, d'étudier son éventuelle variation au cours du temps, et d'ouvrir ainsi un nouveau champ fondamental de la physique.

Au vu des enjeux et des atouts français, pour maintenir le leadership acquis avec le projet Planck, les équipes françaises devront jouer un rôle actif dans ces futures missions, ceci dès les phases d'étude qui ont pour but de préciser les contextes techniques et programmatiques de leur réalisation.

5.2 Gravitation

L'unification des interactions fondamentales est un des enjeux principaux de la physique actuelle. Les interactions fondamentales autres que la gravitation, qui jouent un rôle dominant dans le monde microscopique, sont aujourd'hui l'objet d'un traitement quantique largement unifié. Mais la relativité générale, qui décrit bien l'interaction gravitationnelle dans le monde macroscopique où elle joue un rôle dominant, reste une théorie classique qui semble incompatible avec les techniques habituelles de quantification. Les modèles d'unification conduisent à des modifications de la théorie qui doivent avoir des conséquences observables. Celles-ci peuvent se manifester par exemple par des violations apparentes du principe d'équivalence ou une modification de la variation avec la distance du potentiel de gravitation. Les tests de la relativité générale, poursuivis avec des précisions améliorées ou dans de nouvelles échelles de distance, sont donc un des moyens dont nous disposons pour tenter de discerner les premiers indices de la « nouvelle physique » attendue au-delà du modèle standard.

Dans le même ordre d'idées, les ondes gravitationnelles prédites par la relativité générale n'ont été mises en évidence qu'indirectement (par les observations des pulsars binaires avec les radiotélescopes). La détection directe reste à faire. Selon les fréquences, elle est réalisable du sol (Ligo, Virgo de quelques dizaines de Hz à 1 000 Hz) ou de l'espace (Lisa de 0,1 à 100 mHz).

Ces tests demandent une très grande précision. Pour le principe d'équivalence, on cherche à améliorer la meilleure précision obtenue au sol (10^{-12}) par 3 à 6 ordres de grandeur, ce qui ne peut se faire qu'en allant dans l'espace. Ceci est également vrai pour la plupart des autres tests de la relativité générale : l'espace joue donc un rôle clé dans les expériences envisagées par les physiciens, soit parce qu'une excellente microgravité est nécessaire, soit parce que l'espace donne la possibilité de faire des mesures sur de très grandes distances.

Le projet MicroScope utilisera des accéléromètres ultrasensibles construits par l'Onera pour tester dans l'espace le principe d'équivalence à une précision

de 10^{-15} . L'expérience, financée par le Cnes, sera embarquée en 2008 sur un microsatellite du Cnes avec une participation de l'Esa.

Les horloges à atomes froids, qui sont déjà les meilleures horloges sur Terre, auront des performances améliorées en microgravité dans l'espace. Le projet Pharaon, proposé par le Laboratoire Kastler-Brossel et le département Syrte de l'Observatoire de Paris et financé par le Cnes, devrait ainsi atteindre une exactitude et une stabilité relatives de 10^{-16} sur une journée lorsqu'il sera embarqué sur la station spatiale dans le cadre du projet Aces financé par l'Esa. Il permettra de nouveaux tests de la relativité plus précis que ceux dont on dispose aujourd'hui, en particulier pour ce qui concerne l'effet Einstein de ralentissement des horloges ou une éventuelle variation des constantes fondamentales de la physique. De plus, il constituera une démonstration de faisabilité ouvrant des perspectives extrêmement intéressantes pour l'utilisation future des techniques à atomes froids dans l'espace.

Le projet international Lisa, soutenu par l'Esa et la Nasa, d'un interféromètre ayant des bras de 5 millions de km, en orbite autour du Soleil, permettra de détecter le rayonnement gravitationnel à des fréquences plus basses (100 μ Hz à 100 mHz) que celles observables sur Terre. De nombreuses sources de rayonnement gravitationnel sont attendues dans ce domaine spectral.

Les tests extrêmement fins de la théorie de la gravitation, qui sont programmés pour les prochaines années, apporteront des progrès dans des domaines très divers, par exemple les systèmes GNSS de localisation et de navigation globale, c'est-à-dire le système américain GPS aujourd'hui et le système européen Galiléo demain.

5.3 La position de la communauté française

La position française est de tout premier plan dans ce domaine avec en particulier les projets Microscope et Pharaon proposés et dirigés par des équipes françaises.

La quasi-absence de la communauté française dans le projet Lisa, qui a des ambitions scientifiques très importantes, devait être corrigée. Une action a été entreprise en 2004 sous l'égide du Cnes pour assurer la participation d'équipes françaises à ce programme, en particulier pour la modélisation système de Lisa et la préparation de l'exploitation scientifique (Onera, laboratoire APC, équipes impliquées dans Virgo).

6 | Physique des fluides dans l'espace

Contributions au rapport détaillé de Daniel Beyssens, René Moreau

6.1 Physique des fluides

La matière doit comporter au moins une phase fluide pour être particulièrement sensible au niveau de pesanteur. Au sol, ou sous gravité normale, toute inhomogénéité dans un fluide conduit à des variations spatiales de masse volumique qui engendrent de forts mouvements convectifs. Ceux-ci sont tellement importants qu'ils masquent en général tous les phénomènes de diffusion. Ceci signifie que la connaissance des propriétés des fluides au repos ne peut que très rarement être acquise par des expériences au sol. Dans l'espace, des comportements nouveaux s'imposent.

Du point de vue de la physique des fluides, l'espace est donc ce lieu qui permet d'obtenir à la fois de bons niveaux de microgravité et des durées d'expérimentation suffisamment longues. Les activités en physique des fluides dans l'espace, qui bénéficient d'un tel environnement, sont de deux types : études « pour l'espace » et « par l'espace ». L'expression « pour l'espace » implique qu'il s'agit d'études en relation avec la technologie spatiale : comportement des fluides en pesanteur faible et/ou variable (par exemple en raison des vibrations), machines thermiques, cryopropulseurs. Et l'expression « par l'espace » englobe tout l'ensemble des recherches sur des phénomènes en général masqués par la pesanteur terrestre.

La microgravité peut être obtenue avec des moyens terrestres tels que tour à chute libre (qualité $10^{-6}g$ durant quelques secondes), avion en vol parabolique ($10^{-2}g$ durant 15-20 secondes), fusées-sondes en vol parabolique ($10^{-4}g$ durant 2-12 minutes) ou compensation magnétique dans de petits échantillons de matière pure ($10^{-2}g$ durant un temps indéfini). Ces moyens sont à l'échelle de laboratoires (compensation magnétique, chutes brèves) ou d'institutions ou agences (Airbus du Cnes, fusées-sondes). Un satellite en orbite terrestre offre à la fois une grande durée d'expérimentation et un niveau de microgravité raisonnable : $10^{-5}g$ et 15 jours pour les capsules récupérables inhabitées Foton et de 10^{-4} à $10^{-2}g$ et 15 jours pour une navette spatiale ou la station spatiale internationale (ISS).

6.2 Résultats acquis et état actuel de la communauté

Le domaine de la solidification a à son actif quelques résultats remarquables, comme la première validation expérimentale de la théorie de l'instabilité morphologique de Mullins-Sekerka dans les conditions strictes de la théorie (phénomène purement diffusif). La communauté scientifique française est au meilleur niveau, mais le nombre des équipes concernées est en diminution et les départs à la retraite se profilent à l'horizon 2010.

Concernant l'étude des fluides critiques et supercritiques, on doit noter la découverte d'une hydrodynamique nouvelle, spécifique aux fluides très compressibles et la mise en place d'une thermomécanique de ces fluides. Il en a résulté plusieurs effets remarquables, comme l'effet « Piston » où, par effet thermo-compressible, la thermalisation d'un fluide, au lieu d'être ralentie, est accélérée près de son point critique et la mise en évidence d'une violation (apparente) du 2^e principe de la thermodynamique : la température d'un fluide compressible est plus élevée que la paroi qui le chauffe. Ces résultats ont été appliqués au stockage des fluides dans l'espace (brevet Air Liquide). D'autre part, l'universalité des comportements lors des transitions de phase gaz-liquide en apesanteur a permis de comprendre certains phénomènes biologiques, comme l'évolution des tissus embryonnaires.

Dans le domaine de recherche « pour l'espace » les développements ont porté sur :

- la **combustion**, une discipline particulièrement importante en raison des risques potentiels d'incendie à bord des véhicules spatiaux. Les équipes françaises ont obtenu des résultats de premier plan, sur les flammes de diffusion ou les flammes de pré-mélange. Toutefois, la communauté, extrêmement sollicitée par des enjeux de combustion sous gravité normale, reste peu disponible et répond peu volontiers aux appels d'offre des agences spatiales ;
- **capillarité, mouillage, mousse** sont des phénomènes qui, étudiés en apesanteur, ont permis d'effectuer des percées remarquables. Il s'agit par exemple de la dynamique des mousses, quand la gravité ne contrôle plus leur drainage ou le comportement mécanique d'interface entre deux fluides miscibles.

Situation à horizon proche

Les perspectives expérimentales ont été limitées jusqu'à mi-2005 par l'arrêt momentané des navettes spatiales américaines. Les seuls moyens d'accès à la

station spatiale internationale ont été les vaisseaux russes Soyouz et Progress. Le cargo européen ATV n'est pas encore opérationnel. L'Agence spatiale européenne (Esa) a donc mis en place un programme « intérimaire » pour les prochaines années, qui tient compte de ces limitations et entend les compenser par des vols Soyouz et des capsules russes Foton.

La communauté française est fortement impliquée dans divers projets en cours de réalisation comme un appareil unique pour les études de fluides supercritiques et de solidification (appareil Declic). Cet appareil ayant suscité l'intérêt des équipes américaines, un accord entre le Cnes, l'Esa et la Nasa permet d'obtenir un ticket de vol gratuit en échange d'heures d'utilisation cédées aux équipes américaines. Dans le cas des études sur les mousses, un appareil a été conçu pour le module FSL (Fluid Science Laboratory) de l'Esa. Dans le domaine de la combustion de poussières métalliques et de milieux granulaires, les expériences en projet sont conçues pour des vols paraboliques dans l'avion du Cnes ou dans des fusées-sondes.

Le phénomène de la crise d'ébullition suscite un fort intérêt à l'échelle européenne, vu les implications importantes pour la thermique des engins spatiaux, notamment le redémarrage du moteur Vulcain en orbite. Ceci a amené l'Esa à financer la réalisation d'un insert destiné à prendre place dans le FSL (Fluid Science Laboratory) et qui sera utilisable par diverses équipes européennes. Il s'agit aussi des fluides critiques et supercritiques dans l'appareil Declic.

Il faut cependant noter que les études en micropesanteur restent une faible fraction de la recherche effectuée dans l'ensemble de ces disciplines.

Recommandations

Quel que soit donc le sort réservé à la station spatiale internationale (ISS), pour ces problèmes spécifiques, les moyens terrestres devront donc toujours être complétés par des études de longue durée effectuées dans l'espace. Actuellement, outre l'ISS, seules les capsules récupérables du type Foton pourraient dans le court et moyen terme assurer à l'expérimentation cet environnement spatial. Il resterait cependant à améliorer considérablement les liaisons avec le sol pour permettre une réelle interaction du scientifique avec son expérience embarquée, un moyen qui n'est pas offert aujourd'hui.

Problématiques

Les études les plus prometteuses semblent être celles liées à l'étude du comportement des fluides complexes, à la mesure de leurs constantes physiques

inaccessibles au sol et à la combustion dans l'espace. Dans tous ces cas, des problèmes spécifiques et importants se posent en relation avec l'exploration spatiale, comme la propulsion spatiale (combustion haute pression et supercritique, allumage, propagation), les échanges thermiques dans les fluides, le stockage à long terme des fluides cryogéniques, le recyclage des déchets.

7 | Biologie, physiologie et médecine

Contributions au rapport détaillé de P. Arbeille, A. Berthoz, S. Blanc, E. Carneero-Diaz, M. Custaud, G. Clément, P. Denise, C. Gharib, M. Jamon, V. Legué, J. McIntyre, Y. Mounier, R. Naquet, C. Papaxanthis, T. Pozzo, G. Perbal, L. Vico

7.1 Les sciences de la vie dans l'espace

Il est important de distinguer deux volets des sciences de la vie dans le domaine de la recherche spatiale : on a souvent fait un amalgame entre :

- la question fondamentale de l'effet de la gravité sur la vie, et
- le problème de la présence de l'homme dans l'espace.

Les deux volets ont chacun leurs objectifs mais ils sont, à bien des égards, complémentaires, et partagent souvent les mêmes instruments. Les connaissances acquises dans le volet fondamental des recherches contribueront à résoudre les problèmes de médecine et d'ergonomie spatiale que posera, par exemple, l'exploration de la Lune et de Mars.

7.1.1 L'effet de la gravité sur la vie

La gravité a façonné pendant des millions d'années le monde animal et végétal. Si la gravité n'existait pas, nous n'aurions pas besoin d'un système cardiovasculaire aussi complexe, en particulier avec la mise en place de mécanismes de protection permettant de maintenir une circulation normale lors de l'orthostatisme. Le tissu osseux serait inutile, de même que le tissu musculaire, puisqu'une partie importante du rôle de ces systèmes est de lutter contre la pesanteur. Même remarque en ce qui concerne le système nerveux. Non seulement les systèmes sensorimoteurs sont organisés pour lutter contre la gravité mais aussi pour l'utiliser comme référentiel.

Il est difficile sur la Terre de supprimer la gravité pendant des durées assez longues pour observer son rôle dans les diverses expressions de la vie animale ou végétale. L'espace est donc indispensable aux sciences de la vie pour comprendre cette composante essentielle de l'évolution des organismes, mais aussi son développement et ses dysfonctionnements.

L'utilisation de l'espace à des fins scientifiques ne concerne donc pas seulement l'homme. L'expérimentation sur des animaux (insectes, amphibiens, mammifères, et éventuellement primates) et des plantes est une des composantes majeures des sciences de la vie dans l'espace.

Les champs qui sont actuellement identifiés comme pertinents et pour lesquels des équipes et des compétences existent en France, avec de solides coopérations internationales, sont la biologie végétale, la physiologie du développement, la physiologie du tissu osseux, la physiologie musculaire, les neurosciences et les sciences cognitives, la physiologie cardiovasculaire, la radiobiologie, le système immunitaire, la nutrition, les effets psychologiques du confinement.

Les premiers travaux scientifiques français dans ce domaine sont récents si on les compare aux autres sciences spatiales. C'est en effet l'apparition des moyens d'emport des vols habités (navette US et station Mir) et une intense coopération internationale qui ont permis dans les années 1980-1990 de démarrer une véritable technologie d'expérimentation chez l'homme et chez l'animal en physiologie et en biologie spatiale.

Mais la contribution des sciences de la vie n'a pas été limitée aux vols habités et des expériences ont été aussi menées sur les satellites biologiques russes, par exemple.

Dans ce domaine, grâce au Cnes, on peut dire que la France a acquis une place de premier rang international aux côtés des États-Unis, de la Russie et de l'Allemagne et a pu, grâce à l'Esa et aux agences internationales (Nasa, Nasda, etc. mais aussi de nombreux pays européens) participer à tous les grands programmes lancés depuis ces années avec un très bon taux d'acceptation des projets au niveau européen ou mondial. La France a ainsi contribué à plus de 20 % de la totalité des publications internationales de haute qualité dans ce domaine.

Pour la période 1998-2001, nous disposons de statistiques précises. Il y a eu 410 articles concernant des recherches spatiales, indexés dans PubMed Medline et publiés dans des revues à comité de lecture dont le facteur d'impact était supérieur à 1,0. Parmi ces 410 publications, au moins un Français faisait partie des auteurs de 92 articles. Parmi ces 92 publications, 40 (sur un total de 207) concernaient des résultats obtenus au cours de missions spatiales, et 52 (sur un

total de 203) concernaient des simulations sol comme le *bed rest*, le confinement, etc. Des numéros spéciaux de revues internationales (comme *Brain Research Reviews*) ont rassemblé les résultats. De 2001 à 2004 la communauté française a publié environ une quarantaine d'articles correspondant à ces critères, dont un article dans la revue *Nature Neuroscience*. Un livre sur la médecine spatiale a été publié.

On doit noter toutefois une frustration de la communauté de biologie animale, ou de physiologie du développement par exemple, qui n'ont pas eu toutes les opportunités de vols qu'auraient mérité les préparations faites à la fois par le Cnes et les laboratoires. Il est important de penser à donner aux communautés de biologie et physiologie animale des opportunités de vols sur des satellites non habités.

7.1.2 L'exploration des planètes : Lune et Mars

Ces aspects fondamentaux seraient à eux seuls suffisants pour justifier des recherches spatiales, mais un autre aspect médical (psychologique et psychopathologique) et ergonomique suggère qu'il faut améliorer les connaissances dans ce domaine important. Le fait que l'homme utilise l'espace en vivant dans des stations spatiales et envisage même de retourner sur la Lune ou d'explorer Mars, rend urgent une compréhension approfondie des mécanismes d'adaptation à la micro- ou à la minigravité aussi bien pour des raisons de santé que pour l'accomplissement des tâches nécessaires à son travail dans l'espace.

Les travaux de physiologie et de biologie spatiale des dix dernières années ont montré que l'homme et la femme s'adaptent remarquablement bien à l'espace. Toutefois, après quinze jours de microgravité se produisent des altérations, la plupart rapidement réversibles, du système cardiovasculaire, des systèmes osseux, musculaire et nerveux, pour ne citer que les principales. Même à l'échelon cellulaire, la microgravité pourrait entraîner des modifications de l'expression des gènes et des altérations de la réponse et de la morphologie des cellules.

Mais le problème principal qui se posera est lié à la durée longue de ces vols et des séjours sur les planètes. Nous avons peu de données sur l'effet de l'exposition de longue durée à la micro- ou à la minigravité, sur les effets de l'adaptation au retour sur Terre au point que l'on envisage d'installer des centrifugeuses qui permettront aux équipages de rester adaptés à la gravité normale tout en vivant en gravité réduite !

On ne doit pas oublier les risques d'irradiation par le rayonnement cosmique et/ou solaire au cours du vol et surtout les problèmes psychologiques et psychopathologiques que pourront induire de tels vols. Le confinement, la vie en

petits groupes, le stress poseront des problèmes qui doivent impérativement être étudiés avec des psychiatres et des psychologues. Même si la France et l'Europe ne sont pas parties prenantes aujourd'hui pour de tels vols, des recherches dans ce sens sont fondamentales et urgentes. De même le problème de la nutrition est à la fois un thème qui concerne une grande fonction du vivant et un problème opérationnel lié à la survie, comme le seront les questions de traitement à distance ou de télé-médecine ou éventuellement de chirurgie. Toutes ces questions pourraient donner lieu à d'intéressantes coopérations avec les spécialistes des expéditions polaires (la base franco-italienne antarctique Concordia, par exemple).

Un rapport récent aux États-Unis fait état de 50 questions relatives à la biologie et à la physiologie spatiale. Le problème du mal de l'espace, par exemple, n'est absolument pas résolu et près de 50 % des astronautes ont besoin d'une médication. Si un jour les vols sur la Lune et Mars sont habités, il faut être prêt et donc étudier soigneusement les problèmes de « contre-mesures » posés grâce aux outils dont nous disposons actuellement (ISS, vols paraboliques, *bed rest*, mais aussi avec des modèles animaux sur des vols de satellites biologiques).

Il est clair que des tâches d'exploration pourront être réalisées par des robots sur des vols automatiques mais ceci nécessite de travailler l'interface homme-robot. En effet, de nombreuses tâches demanderont en fait un pilotage de robots par l'homme (qu'il soit au sol ou dans l'espace) comme dans le cas de la téléchirurgie et la télémanipulation, de dispositifs expérimentaux ou industriels ou de maintenance. Par conséquent, même si l'exploration planétaire est robotisée, le problème de l'interface robot-cerveau se posera et doit être l'objet de recherches.

Une nouvelle coopération doit donc être mise en place entre roboticiens et spécialistes des sciences de la vie selon deux axes :

- la coopération homme-robot pour l'accomplissement de tâches de téléopération, y compris pour la télécommande d'expériences en biologie animale ou biologie des plantes (*téléscience*);
- la télé-médecine.

7.2 Les équipes de recherche en sciences de la vie

Actuellement en France une quarantaine de laboratoires sont activement impliqués dans des recherches spatiales, c'est-à-dire qu'ils sont soutenus par le Cnes après évaluation par un comité scientifique, ou sont soutenus dans le cadre

de projets européens de l'Esa ou de l'ISS qui sont aussi sélectionnés par des comités internationaux. Ces laboratoires relèvent des universités (sciences et médecine) et/ou sont affiliés à l'Inserm et au CNRS (département des Sciences de la vie) et à un moindre degré à l'Ina et au CEA.

D'après les réponses aux appels d'offres du Cnes ou de l'Esa, on peut évaluer à une soixantaine le potentiel de laboratoires qui seraient prêts à participer actuellement à ces recherches. L'apparition de nouveaux thèmes (nutrition, confinement) et l'intérêt de thèmes anciens mais peu étudiés (radiobiologie, système immunitaire) pourraient mobiliser d'autres équipes.

Certaines de ces équipes ont actuellement à la fois une réputation internationale bien établie dans ce domaine et un savoir-faire pour le déroulement des projets. Ce savoir-faire a été accumulé depuis quinze ans et il est crucial de ne pas le perdre et de former des jeunes dans ce domaine. Une politique de bourses de thèses et postdoctorales comme celle qu'a mise en place le Cnes est un outil fondamental mais peut-être pourrait-on suggérer dans le cadre du 7^e PCRD que ce domaine soit inscrit aussi dans le thème « Vol et espace » du PCRD afin de donner la possibilité d'avoir des bourses européennes qui faciliteraient les coopérations internationales et accompagneraient les projets.

7.3 Effets de l'organisation actuelle sur la possibilité de réaliser des recherches

Recommandations générales

La reconnaissance des sciences de la vie comme une discipline des « sciences spatiales » et l'importance des enjeux des sciences fondamentales et liées à l'exploration planétaire supposent une réflexion sur l'organisation de ce champ.

Lors du démarrage des projets spatiaux dans ce domaine, il y a 20 ans, un choix clair a été fait concernant l'organisation de la recherche spatiale en sciences de la vie : ne pas concentrer sur un ou deux « laboratoires spatiaux » de gros moyens mais créer une situation qui permettrait l'émergence de projets originaux venant des besoins d'équipes dont l'activité principale n'est pas liée à l'espace mais qui peuvent avoir des questions fondamentales ou contribuer aux aspects de médecine. Mais le Cnes a identifié le fait que certains laboratoires pourraient jouer le rôle de « pilotes » en leur donnant des moyens récurrents afin de leur permettre d'assumer un rôle de coordinateur et de soutien à des équipes nouvelles. Ce mode d'organisation a été très efficace puisqu'il a permis en effet, lorsqu'une équipe nouvelle apportait un projet, de la faire aider par les laboratoires déjà installés dans le champ. Il pourrait être prolongé. Toutefois l'absence

de label « Laboratoire spatial » a tout de même un peu limité l'investissement fait par les agences dans des moyens en ingénieurs ou en équipement, ou moyens d'analyse des données.

La nouvelle place que prend l'Esa dans l'organisation des projets rend très souhaitable une réflexion sur ces aspects. En particulier il est nécessaire que les équipes scientifiques soient mieux associées au développement des équipements construits par l'Esa sous forme de *science teams* systématiques, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui. De plus, il faut engager une réflexion sur le rôle des centres opérationnels (comme le Cadmos à Toulouse dont le rôle est absolument fondamental) mais, dans la mesure où les équipements spatiaux sont déposés dans ces centres, il est indispensable que soient offerts aux communautés des modèles de laboratoire qui permettent aux équipes de travailler sur leur site pour préparer les expériences.

Sur le plan des coopérations internationales, la communauté des sciences de la vie a une très grande habitude de ce travail en coopération. Il faut aussi prendre en compte l'arrivée dans ce champ de nouveaux partenaires (Chine et Inde par exemple), les changements dans la participation des équipes russes et le besoin de raffermir les coopérations avec le Japon. Dans le passé, l'essentiel des travaux se faisait en coopération bilatérale ou à travers l'Esa.

La tendance actuelle de centraliser les projets autour d'une organisation multilatérale pilotée par l'Esa ne doit pas nous faire oublier que la coopération bilatérale a ses avantages et qu'elle a permis dans le passé des actions fortes, rapides et efficaces qui correspondent aussi souvent aux coopérations qu'ont les équipes scientifiques au plan international. En effet des programmes européens des sciences de la vie mais aussi mondiaux (comme Human Frontiers en Neurosciences) associent de façon durable des équipes et constituent un bon support pour ensuite aller vers des projets spatiaux. Le succès du vol Neurolab en a été un des exemples récents.

Une nouvelle politique internationale des coopérations en sciences de la vie doit donc être étudiée, ainsi que la possible articulation des bases de données spatiales avec les bases de données internationales dans ce domaine.

La concertation avec les organismes de recherche (CNRS, Inserm, Inria, CEA) doit être accrue pour ce champ : pour le CNRS avec le département des Sciences de la vie mais aussi avec le département des Sciences et technologie de l'information et de la communication, car les instruments, comme les questions et théories du domaine, concernent plusieurs communautés des STIC. Le caractère inter- et multidisciplinaire des sciences de la vie aujourd'hui et l'interface avec la robotique justifient une nouvelle implication des STIC avec les SDV. La réforme actuelle du CNRS devrait faciliter cette approche.

Il en est de même avec le CEA avec lequel des liens pourraient être établis non seulement pour le problème de radiobiologie mais aussi autour des questions de robotique ou de neurosciences. Les applications sociétales des recherches dans le domaine de la santé et l'implication d'équipes Inserm devraient induire une concertation accrue avec cet organisme.

De façon plus générale, la valorisation des équipements spatiaux devrait être mieux organisée. Les instruments construits dans ce domaine ont des utilisations majeures dans les domaines de l'exploration fonctionnelle en clinique ou pour la réhabilitation, et une véritable cellule de valorisation devrait être mise en place.

Dans le domaine de la communication et de la formation, la question des effets de la gravité sur la vie, et les problèmes liés à la présence de l'homme et de la femme dans l'espace pourraient donner lieu à une diffusion dans les programmes scolaires ou universitaires ou dans les écoles d'ingénieurs ou les facultés de médecine. Une université (privée) existe sur ce domaine au niveau international. Sans préconiser l'ouverture d'une nouvelle discipline, un effort pourrait être fait pour permettre aux jeunes que la question intéresse de se former avant d'arriver au niveau de la thèse. Peut-être au niveau européen par la création d'une École européenne de biologie, physiologie et médecine spatiale.

PARTIE B

Questions stratégiques
pour la recherche spatiale
française et européenne

1 | Sciences de la Terre, de l'environnement et du climat : nécessité des systèmes opérationnels d'observation de la Terre

L'observation de la planète Terre doit être assurée dans la durée afin d'étudier ses variations dynamiques lentes, et en particulier celles induites par l'action de l'homme, qu'elles affectent le climat global, les ressources naturelles ou la biodiversité. En parallèle, un grand nombre de politiques publiques et d'activités économiques ont besoin d'informations et de prévisions issues de systèmes où l'observation depuis l'espace est associée à des observations *in situ* et à des outils de transformations des observations en information. C'est l'enjeu du GMES (Global Monitoring for Environment and Security) de l'Europe, inscrit dans le processus mondial du GEO (Global Earth Observation).

Il est donc critique de mettre en place des satellites dits « opérationnels », récurrents et fonctionnant selon un cahier des charges adapté aux besoins des utilisateurs. Ces satellites doivent être conçus à partir des satellites scientifiques expérimentaux ayant permis les développements technologiques et l'amélioration de la connaissance de la planète. Ils doivent compléter le dispositif des satellites météorologiques opérationnels existants, en étendant aux autres compartiments du système Terre (océans, surfaces, solide terrestre) les capacités d'observation de l'atmosphère et de prévision de son évolution dont disposent aujourd'hui les services météorologiques nationaux, et les bénéfiques qui en découlent pour l'ensemble des activités humaines.

Ce transfert des satellites scientifiques vers les satellites opérationnels nécessite dans un premier temps la mobilisation des utilisateurs et des institutions, afin qu'ils contribuent à la spécification du besoin face à l'offre technologique, et prennent progressivement la charge de la maîtrise d'ouvrage du dispositif. C'est à cette étape que se situe aujourd'hui le GMES.

Dans un deuxième temps, les institutions et agences opérationnelles doivent prendre en charge le financement et la gestion des satellites opérationnels.

Les agences spatiales doivent accompagner et promouvoir cette logique jusqu'à sa phase de transfert, afin d'assurer la continuité du dispositif d'observation et de construire le lien à long terme entre les offres de recherche et développement technologique et les besoins des services opérationnels. S'il est essentiel de confier à l'Union européenne un rôle central dans cette transition, la France doit également jouer son rôle, aussi bien au travers de ses programmes nationaux ou bilatéraux (imagerie à haute résolution, altimétrie océanique de précision) que de sa participation au programme Earth Watch de l'Agence spatiale européenne.

Il reste également que l'accent mis sur la mise en place urgente (voir la probable interruption des mesures de la série Jason) et indispensable d'observatoires opérationnels ne saurait se faire au détriment du maintien d'un effort soutenu consacré aux missions à caractère de recherche, aujourd'hui assuré par la composante Earth Explorer du programme Enveloppe d'observation de la Terre de l'Agence spatiale européenne, dont le financement reste chroniquement insuffisant au regard de l'importance des objectifs de connaissance de la planète, et de la demande de la communauté scientifique. Ainsi, le dernier appel à idées de l'Agence, au printemps 2005, a donné lieu à 27 propositions, dont seules trois feront éventuellement l'objet d'une étude de faisabilité, et **une seule** pourra voler !

2 | La fin de la construction de la station spatiale internationale et le désengagement américain

Les recherches en microgravité spatiale, menées depuis 25 ans principalement à bord de la navette spatiale et des stations orbitales Mir puis ISS, ainsi qu'à bord de fusées-sondes ou lors de vols paraboliques, sont d'abord motivées par la découverte de comportements et de propriétés difficiles ou impossibles à observer ou à mesurer sur Terre. La démesure des effets d'annonce et les promesses non tenues (matériaux « miracles » élaborés dans l'espace. . .) des décideurs des stations spatiales habitées et de certaines agences spatiales n'ont cependant pas permis pendant longtemps un débat serein.

Un enjeu important de ces recherches concerne plus précisément les études visant à résoudre les problèmes spécifiques liés au fonctionnement des propulseurs, satellites, détecteurs et autres équipements liés à un environnement spatial de gravité très faible et/ou variable. Les difficultés rencontrées par les ingénieurs qui développent les technologies spatiales sont multiples et souvent voisines des problématiques fondamentales. Pour ne citer que quelques exemples, mentionnons l'ensemble des problèmes posés par la gestion des fluides cryogéniques dans l'espace (pompage capillaire, ballonnement dans les réservoirs, . . .) et signalons aussi les difficultés à rallumer certains propulseurs dans l'espace.

En ce qui concerne les sciences de la vie, un enjeu majeur concerne l'utilisation de la microgravité pour les études des effets de la gravité sur la vie (biologie animale et végétale, physiologie, psychologie, effets de rayonnements, etc.) sur des modèles animaux et grâce à la présence d'hommes et de femmes dans l'espace. Un autre enjeu est l'étude des problèmes d'adaptation de l'organisme humain aux conditions du vol spatial et les questions de télérobotique. En effet, la perspective de vols d'êtres humains et d'animaux, et l'utilisation de plantes lors de vols de longue durée pour l'exploration des planètes (Lune et

Mars) posent des problèmes aussi bien d'adaptation, de développement, que de télémanipulation.

L'arrêt annoncé de la navette spatiale américaine, peu après la fin de la construction de la station spatiale internationale (ISS) pose de sérieux problèmes aux communautés scientifiques concernées de tous les autres pays engagés dans le projet ISS.

On doit d'abord noter que le coût pour l'Europe de sa participation à l'ISS est élevé (3 milliards d'euros pour le développement et autant pour le fonctionnement) : pratiquement le double du programme scientifique obligatoire et beaucoup plus que les dépenses consenties pour les programmes d'observation de la Terre (Earth Explorer et Earth Watch), secteurs de la recherche où l'apport du spatial est aujourd'hui devenu prépondérant et peu discuté.

Dans les disciplines concernées (médecine, physiologie, biologie animale et végétale, physique des fluides et des changements de phase) l'apport du spatial, bien que de haute qualité et représentant un paradigme unique pour comprendre les effets de la gravité sur la vie, reste minoritaire dans l'ensemble de la recherche dans ces domaines. Néanmoins l'apport de la physique des fluides en apesanteur aux technologies spatiales est évidemment primordial.

Les disciplines utilisatrices de la microgravité mais ne nécessitant pas la présence d'opérateurs humains dans l'espace (plutôt nuisible dès que l'on est très exigeant sur la qualité de la microgravité) pourraient travailler dans le cadre de plates-formes automatiques, comme la plate-forme russe Foton, y compris dans le cas où l'on souhaite récupérer des échantillons, comme c'est le cas avec les plates-formes biologiques russes. Elles pourraient avoir recours à ces plates-formes dans toute la mesure du possible. Cependant, la télésience, qui fait la spécificité de la station, c'est-à-dire la possibilité d'interagir en temps réel avec l'expérimentation, n'est pas présente dans ces capsules et ne le sera pas même à moyen terme. Une autre spécificité de l'ISS est de permettre des expériences de longue durée en sciences de la vie, sur les plantes ou les animaux. De plus les problèmes psychologiques liés aux effets du confinement ne peuvent pas vraiment être étudiés au sol, même si la station Concordia en Antarctique par exemple peut servir de lieu d'expérimentation.

La redistribution du coût d'exploitation de l'ISS dans la période où les États-Unis n'assureront plus le transport par les navettes spatiales et réduisent leur part dans son utilisation se pose notamment aux gouvernements européens, Japonais et Russe. On a vu qu'un renoncement à l'utilisation de la station porterait atteinte aux domaines suivants :

- préparation de vols habités de longue durée dans le cadre de l'exploration planétaire ;
- développement de nouvelles technologies pour les futures infrastructures spatiales ;
- recherche de base en physique des fluides et sciences de la vie en apesanteur.

Aujourd'hui (2005) l'avenir de la station est incertain, et il serait nécessaire que l'Agence spatiale européenne établisse des scénarios couvrant toutes les hypothèses, allant de l'arrêt complet à la continuation sans rupture, et qu'elle propose une palette de réactions chiffrées, adaptées sinon à chaque éventualité, du moins aux plus probables.

En conclusion de cette analyse, il semble donc souhaitable que l'Europe élabore une politique de collaboration pour utiliser la station spatiale en partenariat avec d'autres pays disposant d'une politique de recherche spatiale (Russie, Japon, voire Chine et Inde) à un coût proportionné aux objectifs en particulier ceux qui servent le développement de la technologie spatiale. En revanche, il est clair que les programmes de recherche fondamentale ou appliquée ne justifient pas à eux seuls que l'Europe reprenne une fraction des coûts de fonctionnement liés au désengagement américain.

3 | L'exploration du Système solaire. Recommandation sur le programme Exploration

Les principales incertitudes concernent la place de l'Europe dans l'exploration de Mars, suite à l'abandon du programme Premier du Cnes en 2002 et à l'échec de l'atterrisseur Beagle fin 2003. Les résultats remarquables des missions de 2004-2005 (orbiteur Mars Express de l'Esa, véhicules mobiles Spirit et Discovery de la Nasa) confirment l'importance de cette planète pour la planétologie comparée et l'étude de l'origine de la vie, thématique en plein développement. En parallèle, les États-Unis redéfinissent leur stratégie autour d'un objectif à long terme de vols habités vers la Lune, puis Mars, avec des moyens très importants : le programme Mars de la Nasa dispose d'un budget supérieur à celui de l'ensemble du programme obligatoire de l'Esa, ce qui lui permet de programmer un laboratoire mobile de plusieurs centaines de kg à l'horizon 2011.

Il est urgent de définir un contexte qui permette à l'Europe de rester partie prenante à cette grande aventure scientifique, dont l'étape essentielle sera le

retour d'échantillons de Mars. Le programme Exploration, avec sa composante technologique, constitue un contexte approprié pour continuer à développer la technologie spatiale en Europe après la fin de la construction de l'ISS. Il doit donc être défendu lors de la prochaine réunion ministérielle à un niveau permettant d'envisager une première mission vers Mars à l'horizon 2011.

On pourrait donc imaginer un effort européen comprenant trois volets :

- *un effort prioritaire en Recherche et Technologie des techniques spatiales, dans la direction des mini- et nanotechnologies ;*
- *une série de missions choisies au coup par coup sur une sorte de programme à la carte ;*
- *le déploiement orbital de facilités communes comme par exemple un système de navigation autour de Mars du style GPS ou Galileo, ou un ensemble de télécommunications planétaires dans l'espace orbital et sur Terre, ou enfin un « Internet planétaire ».*

4 | Recommandation sur le mode de réalisation des expériences

Les charges utiles dans les domaines de l'observation de la Terre, de la plasmologie, et des plasmas spatiaux ont souvent un caractère récurrent : observations similaires effectuées sur plusieurs satellites identiques (plasmas spatiaux) ou sur des missions opérationnelles récurrentes pour obtenir des observations du même type soit en séries longues, soit sur différents objets.

En revanche, les charges utiles de l'astronomie ou de la physique fondamentale sont des prototypes complexes faisant appel à des techniques très pointues.

Les modes de réalisation n'ont pas de raison d'être identiques et de fait ils sont différents pour l'observation de la Terre et l'astronomie.

Les « laboratoires spatiaux » spécialisés dans la réalisation des expériences prototypes embarquées font face à deux problèmes majeurs : des départs à la retraite massifs des ingénieurs et techniciens qui ont été à l'origine du développement de ces laboratoires, et un rééquilibrage nécessaire entre les activités instrumentales et celles de traitement des données. Un nouvel équilibre devra être trouvé, mais nécessitera, de toute façon, un engagement fort des tutelles, et plus particulièrement du CNRS, pour garantir un niveau d'embauche suffisant

pour compenser les départs à la retraite et assurer un redéploiement des compétences. *Dans ce contexte, il est souhaitable que les laboratoires concentrent leurs efforts sur les instruments de type prototype.*

Sur les instruments de technologie mieux établie, les laboratoires doivent concentrer leurs forces dans les domaines amont (recherche et technologie, études de concept et de faisabilité), et les domaines aval : étalonnage au sol et en vol, opérations scientifiques, traitement des données de niveau primaire permettant la production de données en unités physiques, nettoyées des signatures expérimentales.

5 | Mode de réalisation des expériences de physique fondamentale dans l'espace

Le programme Cosmic Vision de l'Agence spatiale européenne, comme la prospective scientifique du Cnes, ont mis en évidence l'émergence d'un programme ambitieux de physique fondamentale dans l'espace. Les projets de mesures liées à la théorie de la gravitation ont été les premiers à être proposés dès les années 1990 et les projets français Microscope et Pharaon (Cnes) les premiers à être mis en œuvre.

Le plan à long terme de l'Esa (Cosmic Vision) donne une forte priorité à la mission Lisa qui devrait devenir le premier observatoire en ondes gravitationnelles.

Des expériences de mécanique quantique, comme les interféromètres à atomes utilisant pleinement les avantages d'une excellente microgravité, ont été proposées.

Il est important de prendre en compte dès maintenant la place que prendra cette discipline dans la recherche spatiale dans une à deux décennies et de préparer les structures pouvant y jouer un rôle de pilote en s'appuyant sur les équipes françaises qui sont parmi les meilleures au monde. Les techniques utilisées ne font pas partie de la panoplie des instruments pouvant être facilement développés dans l'industrie. *S'il est confirmé que les laboratoires spatiaux doivent jouer un rôle important dans ce secteur, une démarche volontariste similaire à celle du début des années 1980 doit être menée. À cette époque, les laboratoires spatiaux français, spécialisés dans les plasmas spatiaux et les observations en ultraviolet et en rayonnement gamma, ont mis leur savoir-faire et leurs moyens au service de la construction des instruments de l'astronomie infrarouge, X et submillimétrique et de la planétologie.*

6 | Physique en microgravité — Concertation entre scientifiques et ingénieurs

Les difficultés rencontrées par les ingénieurs qui développent les technologies spatiales sont multiples et souvent voisines des questions de recherche fondamentale (gestion des fluides cryogéniques, pompage capillaire, ballonnement dans les réservoirs, rallumage des propulseurs. . .). Une concertation entre scientifiques et ingénieurs du spatial est donc à encourager, à la fois au niveau français et au niveau européen. Ce genre de concertation étroite n'existe actuellement qu'aux États-Unis. *Des réflexions récentes, limitées à l'échelle française — mais extrapolables en Europe —, conduisent à envisager la création d'instituts, ou laboratoires sans murs, réunissant scientifiques et ingénieurs, de façon à permettre à ces derniers de faire connaître très tôt leurs défis aux scientifiques, mais aussi de façon à faire passer le plus rapidement possible le savoir récemment acquis des laboratoires vers les services techniques.*

7 | L'exploitation optimale des données dans le contexte international

Les modes d'accès de la communauté scientifique aux données des missions spatiales ont profondément évolué depuis dix ans. Les missions où une équipe conçoit, développe puis réduit les données et enfin exploite scientifiquement un instrument sans distribuer les données à la communauté scientifique concernée sont en voie de disparition.

Ce système reste partiellement en vigueur dans les secteurs pionniers de la recherche spatiale (plasmas spatiaux, physique solaire, exploration du Système solaire).

Pour les grands observatoires ou les satellites dédiés aux observations systématiques, que ce soit en observation de la Terre, en astronomie ou en physique fondamentale, les données sont distribuées à l'ensemble de la communauté scientifique concernée après une période définie de l'ordre de l'année. Ce système maximise clairement le retour scientifique global et doit être encouragé. Cette évolution positive a deux implications fortes. Le traitement des données doit être efficace et pour cela faire appel aux spécialistes qui ont conçu et éventuellement construit l'instrument. Les autorités nationales qui financent ces instruments doivent se préoccuper de donner aux communautés scientifiques particulièrement dépendantes des données spatiales les moyens d'une exploitation scientifique efficace des données.

La Nasa consacre une fraction beaucoup plus grande de son budget de recherche à ce volet que les agences européennes. Cette situation est préoccupante car elle aboutit à ce que des missions financées et développées principalement en Europe sont plus exploitées scientifiquement aux États-Unis qu'en Europe. Les grandes missions spatiales européennes financées par l'Esa sont particulièrement affectées par ce problème puisque l'Esa, contrairement à la Nasa, n'est pas chargée de financer l'exploitation scientifique.

Il est impératif que les autorités mettent en place des mécanismes qui ne peuvent l'être qu'à l'échelle européenne pour résoudre ce problème. Il faut pour cela un budget d'exploitation scientifique des grandes missions pendant la période qui suit immédiatement le lancement. Il faut de plus financer l'archivage et les outils d'accès aux données.

Pour cela la solution passe par un engagement au niveau européen visant soit à un élargissement des missions de l'Esa, accompagné des budgets nécessaires, soit à une prise en charge de ces besoins par des programmes financés par la Commission européenne.

8 | Mathématiques et espace

Les mathématiques jouent un rôle important dans la recherche spatiale comme dans beaucoup d'autres secteurs de la recherche. Une branche particulièrement importante est celle de la résolution des problèmes inverses.

En effet, l'analyse des données obtenues par observation à distance de phénomènes physiques implique fréquemment une inversion permettant d'inférer des contraintes sur la valeur des variables physiques (densité, température, pression, vitesse. . .) à partir des données directement observées (cartes de flux, spectre. . .). L'obtention de données exprimées directement en paramètres physiques du milieu observé suppose implicitement un modèle physique. C'est l'approche utilisée traditionnellement. Cependant la complexité simultanée des instruments et des modèles physiques auxquels on les confronte ont fait apparaître une nouvelle approche, aussi bien en observation de la Terre qu'en astrophysique et cosmologie, qui consiste à confronter les modèles directement aux observations, en engendrant de multiples réalisations virtuelles des observations pour déterminer celles qui en rendent compte de manière satisfaisante. Si cette approche peut s'avérer coûteuse, car elle demande le plus souvent un grand nombre de réalisations simulées des observations, elle permet une approche statistique rigoureuse de la comparaison des données et des modèles. Elle oblige surtout à expliciter les modèles utilisés et permet d'évaluer la solidité véritable

des interprétations fournies, en faisant apparaître explicitement quand les données ne sont pas suffisantes à elles seules pour contraindre une partie de la physique.

Il est recommandé de renforcer les liens institutionnels entre mathématiciens appliqués, en particulier statisticiens, et utilisateurs de ces techniques dans l'analyse des données spatiales. Ces techniques demandent des moyens de calculs lourds et du personnel technique spécialisé. La part du coût de ces phases par rapport au coût total pour les expériences spatiales augmente, comme cela a été noté dans plusieurs des rapports par discipline. Cette évolution doit être anticipée et prise en compte dans la planification des projets futurs. Les aspects interdisciplinaires mentionnés ci-dessus doivent aussi être considérés.

PART B – English version

Strategic questions for French
and European space research

1 | Environment, climate and Earth sciences: need for operational observation systems of the Earth

The observation of the Earth as a planet must be carried out over long periods of time in view of studying its slow dynamic variations and in particular those due to the action of mankind, whether these variations affect global climate, natural resources or biodiversity. In parallel a large number of public policies and economic activities require informations and predictions coming from systems where observations obtained from space are combined with in-situ observations and various data processing tools to transform raw observations into useful information. This is the purpose of Europe's GMES (Global Monitoring for Environment and Security) which is part of the world GEO process (Global Earth Observation).

It is therefore critical to put in place recurrently "operational" satellites designed and operated according to specifications defined together with the end users. The design of these satellites must make use of the work done on previous scientific satellites which led to new technologies and to progress in the understanding of the planet. Those satellites must complement the present system of operational meteorological satellites by bringing comprehensive information on other aspects of the Earth (oceans, surfaces, earth as a solid body) and thus play a similar rôle as that of the meteorological satellites towards national meteorological services. At the same time, the resulting benefits will profit human activities in general.

This transfer from scientific to operational satellites requires in an initial stage that users and institutions be mobilised to work on the definition of goals and technical specifications and to take progressively in charge the management of the project. This is where GMES stands at present.

In a later stage, institutions and operational agencies must finance and manage the operational satellites.

Space agencies should follow and promote this logic until it reaches the transfer phase to ensure continuity in the observation system and to build a long term relationship between scientific research, technological development and the needs of the operational services. Although the European Union has a central rôle in that transition, France must also participate both through national or bilateral programs (high resolution imagery, precision oceanic altimetry) and as a participant to the Earth Watch program of the European Space Agency.

It is to be noted that stressing the need for operational satellites, in some cases urgent (e.g. the probable interruption of the Jason series of measurements),

does not mean that this could be done at the expense of a steady effort towards research missions that are supported by the Earth Explorer component of the Envelop program of the European Space Agency for the observation of the Earth. Moreover Earth Explorer is chronically underfinanced with respect to the importance of its goals concerning the knowledge of the planet and the demands of the scientific community. The last call for ideas by the Agency in the spring of 2005 led to 27 proposals of which only three may be followed by a feasibility study and only one will fly.

2 | The end of the construction of the International Space Station and the American desengagement

Research performed under microgravity mostly carried out over the last 25 years on board of the space shuttle and of orbital stations (MIR and ISS) and also in rockets or during parabolic flights, are motivated by the discovery of behaviours and of properties that are difficult or impossible to observe or to measure on Earth. There have been overstated reports and unkept promises by some people in charge of manned space stations or in national agencies that make it difficult to assess the domain.

An important goal of the research under microgravity is related to questions that occur in the functioning of propulsion systems, satellites, detectors or other equipment in a space environment with very small or variable gravity. Engineers who develop space technologies encounter many problems that are often close to scientific questions. As an example, one can mention dealing with cryogenic fluids in space (capillary pumping, oscillations in reservoirs) or problems when igniting some propulsors in space.

With respect to life sciences, a major subject is the use of microgravity to study the effects of gravity upon life (biology of animals or plants, physiology, psychology, effects of radiations, ...), upon animal models or on men and women in space. Another subject deals with the adaptation of the human body to space conditions and with telerobotics. These questions are related to the prospect of long duration flights for the exploration of planets (the moon, mars) with humans, animals and plants.

Stopping the American shuttle soon after the end of the construction of the international space station raises serious problems for the scientific communities of the countries involved in projects requiring the ISS.

The high cost for Europe of its participation in the ISS (3 billion euros for its development and as much for its operation) must be noted first of all as it is practically twice the amount of the compulsory scientific European program and much larger than what has been devoted to the Earth's observation programs (Earth Explorer and Earth Watch) which belong to scientific domains where the input from space has become preponderant and is little discussed.

For the following disciplines: medicine, physiology, animal and plant biology, physics of fluids, phase transitions, the input from research performed in space is of high quality and plays a unique rôle in understanding the effects of gravity on life. However it plays only a secondary rôle compared to all the other research performed by other means. However, the contributions to space technologies of research on the physics of fluids play a major rôle.

For disciplines which use microgravity conditions but do not require the presence of man (usually not compatible with very small levels of microgravity) automatic platforms like the russian Foton could be used even when samples need to be recuperated, as can be done with the russian biological platforms. However interacting with the experiments requires either the presence of operators (as in the ISS) or telescience which is not available on those platforms (now or in the near future). Also, long duration experiments on plants or animals cannot be performed on Foton platforms. In addition, various psychological problems cannot be adequately studied on Earth, even if the Concordia antarctic station can be used as an experimentation ground.

Redistributing the cost of operating the ISS when the United States no longer provide transportation by shuttle and have reduced their share in its use, raises questions for the European, Japanese and Russian governments. It has been seen that stopping the use of the station would affect the following domains:

- preparation of long duration manned flights necessary for the exploration of planets;
- development of new technologies for future spatial infrastructures;
- basic research in physics of fluids and life sciences under microgravity.

Today (2005) the future of the station is uncertain and it would be necessary that the European Space Agency establish scenarios adapted to all hypotheses going from a complete stop to continuity with no change. For some of the most likely of these scenarios, the Agency should make financial proposals.

To conclude this analysis, it appears useful that the European Union prepare a policy concerning the use of the space station in partnerships with other countries

that have space research programs (Russia, Japan, possibly China and India). The cost limits imposed should be proportionate to the research to be performed in particular that which contributes to the development of space technologies. However, it seems clear that the present research programs (fundamental and applied) do not justify in themselves Europe's taking over the fraction of the operating costs no longer borne by the United States.

3 | Exploration of the solar system. Recommendation for the Exploration program

The main uncertainties are linked to the place of Europe in the exploration of Mars following the withdrawal of the Cnes in 2002 from the Premier program and the failure of the lander Beagle in 2003. The remarkable results of the missions 2004-2005 (Mars Express orbiter of ESA, Spirit and Discovery mobile vehicles of Nasa) confirm the importance of this planet for comparative planetary and for the study of the origin of life, a subject in full development. In parallel, the United States are redefining their strategy around a long term goal of manned flights to the Moon and then to Mars with very substantial means: the Mars program of Nasa has a budget superior to the whole compulsory program of ESA, and thus can program a mobile laboratory weighing several hundred kilograms for 2011.

It is urgent to define a context allowing Europe to stay as a partner in this great scientific adventure, an essential step of which is the return of samples from Mars. The Exploration program, with its technological component, provides a context appropriate in which to continue developing space technology in Europe after the end of the construction of ISS. It should be strongly enough defended during the next ministerial meeting that a first mission to Mars by 2011 can be envisaged.

The European effort could include three parts:

- a primary effort for research and technology concerning space techniques towards mini and nanotechnologies;*
- a series of missions chosen one by one from an "à la carte" program;*
- deployment on orbit of common facilities, for instance a navigation system around Mars like GPS or Galileo, or a planetary telecommunication system in orbital space and on Earth or finally a "planetary internet".*

4 | Recommendations on the mode of building experiments

Payloads in the fields of Earth's observation, planetology and space plasmas often have a recurrent character: similar observations performed on several identical satellites (space plasmas) or carrying out recurrent operational missions to obtain observations of the same type, either for long series or for different objects.

However, payloads for astronomy or fundamental physics are complex prototypes using leading edge techniques.

The procedures for building space equipments have no reason to be similar and in fact, are different for observation of the Earth and for astronomy.

The "laboratoires spatiaux" specialised in the preparation of prototype experiments face two major problems: first, numerous engineers and technicians who were at the origin of these laboratories will retire soon, second, the need for a new balance between instrumental activities and data processing. This new equilibrium will require in any case a strong involvement of the agencies in particular of CNRS, to ensure a high enough level of recruitment to compensate for retirements and for the shift in skills. Under these conditions, it is desirable that these laboratories concentrate their efforts on prototype instruments.

For instruments using more established technologies, these laboratories ought to concentrate both on the initial stages (research and technology, concepts and feasibility studies) and on the later stages: calibration on the ground and in flight, scientific operations, handling of primary data allowing the production of information in physical units rid of experimental signatures.

5 | Modes of realisation of fundamental physics experiments in space

The Cosmic Vision program of the European Space Agency as well as the scientific perspective of Cnes have shown the emergence of an ambitious fundamental physics program in space. The proposals of measurements linked to the theory of gravitation were the first to appear during the nineties and the French projects Microscope and Pharaon the first to be carried out.

The long term plan of Esa (Cosmic Vision) gives a high priority to the Lisa mission which would be the first observatory using gravitational waves.

Quantum mechanics experiments, like atomic interferometers that fully use the advantage of an excellent microgravity environment, have been proposed.

It is important to take into account now the place that this discipline will occupy within one or two decades and to prepare the structures able to do the management assisted by the French teams that are among the best in the world. The techniques that will be used do not belong yet to the kind of instruments that can be easily developed by industry. *Thus, if it is confirmed that the "laboratoires spatiaux" have to play an important rôle in this domain, then voluntary actions must be started similar to those of the early eighties. At that time, the French "laboratoires spatiaux" specialised in space plasmas, and ultraviolet and gamma radiation observations put their know-how and their resources to work for the construction of the instruments of astronomy in the infrared, X and sub-millimeter domains and for planetology.*

6 | Physics in microgravity — Dialogue between scientists and engineers

Engineers who develop techniques for space meet multiple difficulties that are often close to question dealt with by fundamental physics (cryogenic fluids, capillary pumping, shaking in reservoirs, reigniting propulsors). A dialogue between scientists and space engineers ought to be encouraged both at the French and European levels as exists in the United States. *Recent reflections, limited for the time being to France, have led to envisaging the creation of institutes, or laboratories without walls, in which engineers and scientists could meet and exchange results and questions at an early stage.*

7 | Optimal exploitation of data in an international context

The ways the scientific community has access to data from space missions have profoundly changed during the last decade. The missions in which a team designs, develops, then reduces the data and finally does the scientific exploitation of an instrument without distributing the data to the relevant scientific community will soon no longer exist.

This former system remains partially true for the early fields of space research (space plasmas, solar physics, exploration of the solar system).

For large observatories or satellites devoted to systematic observations, for the observation of the Earth, astronomy or fundamental physics, the data are distributed to the whole interested scientific community after an initial period lasting approximately one year. This system clearly contributes to maximising the global scientific return and it must be encouraged. This positive development has two strong implications. The processing of data must be efficient and for that purpose, be done by or in collaboration with the specialists who have designed and possibly built the instrument. The national authorities who finance the instruments must make sure that the scientific communities particularly dependent upon the space data are given adequate means to use them.

Compared to European agencies, Nasa devotes a much larger share of its budget to that purpose. The European situation is worrisome as it leads to the fact that missions principally financed and developed in Europe are exploited more in the United States than in Europe. The large European space missions are particularly concerned by this problem as Esa is not in charge of financing their scientific exploitation, contrary to what Nasa does.

It is essential that high level management set up mechanisms to solve this problem, and this can only be done but at a European level. For that purpose, a budget to exploit scientifically the greater missions during the period that immediately follows their launching must be put in place. It is also necessary to finance storage and tools to have access to the data.

For that purpose the solution requires a commitment at the European level either to broaden the missions of ESA with the necessary budgets or to finance these needs using programs financed by the European commission.

8 | Mathematics and space

Mathematics play an important rôle in space research as well as in other domains of research. A particularly important subject is solving inverse problems.

The analysis of data obtained by observation at a distance of physical phenomena frequently implies an inversion allowing to infer constraints upon the values of physical quantities (density, temperature, pressure, velocity, ...) from directly observable data (flux distributions, spectra, ...). Obtaining data that are directly expressed in terms of physical parameters of the system under study implicitly assumes that a physical model exists. This approach is traditionally used. However, the simultaneous complexity of instruments and of physical models, to which they are compared, leads to a new approach in the observation of Earth as well as in astrophysics or cosmology. In this approach the predictions

from the models are compared to the data for a number of hypotheses in the model to find the best of those hypothesis. This may be more costly as it often requires computing a large number of realisations but it permits a rigorous statistical comparison of data and models. It requires specifying the models that are used and allows the evaluation of the validity of the interpretations when the data are not sufficient by themselves to put constraints on part of the physics included in the models.

It is recommended that the links be reinforced between applied mathematicians, in particular statisticians, and users of these techniques when analysing data from space experiments. These techniques require powerful computers together with specialised technical personnel. The proportion of the cost of those phases compared to the total cost of space experiments is increasing as is noted in several sections of the report. This development must be anticipated and taken into account when planning future projects. The interdisciplinary aspects mentioned above must also be considered.

ANNEXE

Texte adopté par l'Académie des sciences le 27 mai 2003

Contribution de l'Académie des sciences au Livre blanc sur la politique spatiale européenne

Le Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences souhaite répondre à l'invitation transmise conjointement par la Commission européenne et l'Agence spatiale européenne. Il présente ici sa contribution à la préparation d'un Livre blanc sur l'avenir d'une politique spatiale européenne.

Les contextes politique, économique, technique et scientifique de l'espace subissent actuellement une très profonde mutation. En parallèle, les besoins auxquels l'espace peut répondre ne font que croître, qu'il s'agisse de la science, des services ou de la sécurité collective. Face aux mutations en cours et à l'ambition d'inscrire l'Europe dans le Traité en préparation, une modernisation de la politique spatiale sera seule en mesure de répondre aux attentes de la société européenne.

Une refondation complète des rapports entre les acteurs des activités spatiales s'impose, à l'exemple des démarches similaires qui, dans le passé, ont permis aux États et à l'Europe de poser les bases de leur activité spatiale.

Cette refondation devra rechercher l'usage optimal des ressources consolidées existantes, car les problèmes sont avant tout structurels et politiques. Une étroite coordination des moyens disponibles, nationaux ou européens, représenterait une première étape indispensable, mais insuffisante. Il faut rechercher, par la restructuration des Agences, la constitution d'une véritable Fédération européenne de l'ensemble des moyens. Elle établira la cohérence entre la politique des lanceurs et celle de leur utilisation.

L'introduction d'un principe de complémentarité permettra de répartir les tâches au niveau adéquat, national ou fédéral. Plus spécifiquement, cette complémentarité implique que la participation des principaux acteurs (universités et organismes de recherche, industrie, centres techniques des Agences) soit redéfinie dans le cadre européen. En outre, les activités de recherche-développement, indispensables à la préparation de missions nouvelles, irriguent aussi le tissu industriel et scientifique bien au-delà du seul secteur spatial : un effort très spécifique de l'Europe, qui conditionne l'avenir, doit être consenti dans ce domaine.

Enfin, l'importance de la science apparaît gravement sous-estimée dans le Livre vert. La science a été et demeure un élément essentiel des activités spatiales.

Groupe de lecture critique

COMPOSITION DU GROUPE DE LECTURE CRITIQUE

CEA

Pierre-Olivier LAGAGE

Chef du service d'Astrophysique —
CEA Saclay

Conférences des grandes écoles

Manola ROMERO

Directeur scientifique — École supérieure de
l'aéronautique et de l'espace

Cnes

Yannick D'ESCATHA

Président-directeur général

Stéphane JANICHEWSKI

Directeur de la Prospective, de la stratégie,
des programmes, de la valorisation et des
relations internationales

Richard BONNEVILLE

Coordination du programme Étude
et exploration de l'Univers

Ifremer

Patrick VINCENT

Responsable du thème « Circulation
et écosystèmes marins, mécanismes,
évolution et prévision »

Météo-France

Jean-Pierre BEYSSON

Président-directeur général

Direction de la Recherche

Claude CATALA

Conseiller scientifique adjoint

Direction de la Technologie

Claude BOUCHER

Chargé de mission au département Espace et aéronautique

Onera

Michel de GLINIASTY

Directeur scientifique général

Membres du Comité de la recherche spatiale

Édouard BRÉZIN

Président de l'Académie des sciences —
Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie et à l'École polytechnique

Jean-Claude ANDRÉ

Correspondant de l'Académie des sciences
— Directeur du Centre européen
de recherche et de formation avancée
en calcul scientifique

Sylvain BLANQUET

Correspondant de l'Académie des sciences
— Directeur de recherche au Centre national
de la recherche scientifique et professeur à
l'École polytechnique

Christian BORDÉ

Correspondant de l'Académie des sciences
— Directeur de recherche au Centre national
de la recherche scientifique

Pierre BUSER

Membre de l'Académie des sciences —
Professeur émérite à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

Sébastien CANDEL

Correspondant de l'Académie des sciences
— Professeur à l'École centrale Paris

Pierre FAYET

Correspondant de l'Académie des sciences
— Directeur de recherche au Centre national
de la recherche scientifique et professeur à
l'École polytechnique

Pierre LELONG

Membre de l'Académie des sciences —
Professeur émérite à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

Yves POMEAU

Correspondant de l'Académie des sciences
— Directeur de recherche au Centre national
de la recherche scientifique

Les membres du Groupe de lecture critique, désignés par le président ou le directeur général de leur établissement, ont examiné le texte du rapport puis, au cours d'une réunion qui s'est tenue à l'Académie des sciences le 26 septembre 2005, ont entendu la présentation de Monsieur Jean-Loup Puget, animateur du groupe de travail, et se sont exprimés.

Ils ont formulé des remarques, dont certaines ont été intégrées, avec leur accord, dans le rapport ; cinq commentaires font l'objet de contributions signées : elles sont présentées ci-après.

INTERVENTION DE JEAN-CLAUDE ANDRÉ

Correspondant de l'Académie des sciences
Membre du Comité de la recherche spatiale de l'Académie

Le projet de rapport sur la recherche spatiale française recommande, en sa deuxième partie sous la rubrique « Mathématiques et Espace », de développer l'approche mathématique, et plus spécifiquement statistique, afin de fournir une meilleure base aux méthodes inverses de plus en plus largement utilisées pour extraire les paramètres physiques des mesures spatiales, à l'aide de modèles plus ou moins complexes.

Deux remarques complémentaires peuvent être faites sur des sujets très proches, concernant la relation entre la modélisation numérique et l'utilisation des données d'observation :

1. L'assimilation de données, maintenant d'un usage très répandu dans l'étude des enveloppes fluides (météorologie, océanographie, ...), utilise le concept d'optimisation pour déterminer au mieux des trajectoires de modèles compatibles avec des observations dispersées dans l'espace et le temps, et présentant parfois certaines inconsistances liées à leurs origines différentes. Ces méthodes d'assimilation de données utilisent aussi assez souvent la notion d'"observable", qui permet de prédire à l'aide du modèle la variable directement observée, et donc d'éviter d'avoir à résoudre le problème inverse pour remonter à la variable physique. Ces méthodes d'assimilation de données reposent principalement sur le contrôle optimal, très largement développé au cours des 30 à 40 dernières années par l'école française de mathématiques appliquées. Il serait certainement profitable d'élargir ces approches à d'autres domaines des sciences de l'Univers¹ ;
2. Au-delà des problèmes relevant de la recherche spatiale, la modélisation des systèmes complexes intervient dans un nombre de plus en plus grand de domaines de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée.

¹ De façon complémentaire, l'observation d'un système complexe (comme les objets spatiaux ou la planète) de façon répétitive et pendant une durée importante est un élément important permettant d'appréhender ses propriétés statistiques. Cette connaissance est indispensable pour pondérer ensuite les données instantanées utilisées dans un système d'assimilation de données. Il est ainsi important d'avoir des stratégies d'observation cohérentes sur le long terme et de prolonger autant que nécessaire les missions satellitaires.

Ces modèles complexes doivent dialoguer avec des observations elles-mêmes de nature variées (observations directes ou observations convoluées par d'autres phénomènes), qu'il s'agisse de valider ces modèles ou de les initialiser (dans le cas de problèmes dépendant du temps). Il semble que les méthodes mathématiques utilisées pour aborder ces questions soient encore peu développées. Il serait probablement avisé d'initier sur ces sujets une réflexion entre mathématiciens appliqués et modélisateurs des systèmes complexes.

COMMENTAIRE DU CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES (CNES)

Stéphane Janichewski

Directeur de la Prospective, de la stratégie, des programmes, de la valorisation et des relations internationales

Le Cnes félicite les rédacteurs du rapport pour la qualité du travail fourni, qui traduit bien les problématiques et orientations possibles de la recherche spatiale.

Il attire l'attention de l'Académie des sciences sur les points suivants :

- la question du transfert des activités de recherche vers les activités opérationnelles est effectivement centrale dans la construction de l'Europe spatiale. La France a proposé qu'une répartition claire des rôles et responsabilités soit définie, en distinguant ainsi, d'une part, la préparation de l'avenir (nouvelle génération de systèmes), de la responsabilité des États membres, soit à travers leurs agences nationales soit à travers l'Esa, et, d'autre part, les systèmes opérationnels répondant aux besoins des utilisateurs finals européens fédérés et exprimés par l'UE et aux politiques sectorielles de l'Union européenne, dont l'Union européenne doit assurer la continuité, à partir des générations de systèmes éprouvés. Cette thèse a finalement été acceptée malgré les préoccupations de retour géographique qui poussent beaucoup d'États membres à vouloir tout faire passer dans le cadre de l'Esa. Les orientations définies par le Conseil Espace du 7 juin 2005 reflètent cette vision, qu'il convient désormais de mettre en application, notamment sur l'initiative GMES (Global Monitoring for Environment and Security) ;
- la situation de la Station spatiale internationale est extrêmement préoccupante. L'incertitude sur le nombre de vols de la navette d'ici à 2010 oblige les partenaires européens à envisager tous les scénarios, y compris celui d'un arrêt du programme. Dans ce contexte, il est important que l'Europe définisse une position commune crédible et en fasse la demande aux États-Unis. Un avis de l'Académie des sciences est hautement souhaitable sur les divers scénarios possibles et leurs conséquences en terme d'utilisation scientifique de cette infrastructure, et de consommation de ressources financières et humaines ;

- les orientations qui figurent dans le rapport sont en ligne avec les conclusions du séminaire de prospective scientifique du Cnes de juillet 2004, qui constituent la « feuille de route » programmatique de l'établissement pour les projets scientifiques. En termes de décision, deux rendez-vous sont à signaler. Le premier concerne le Conseil ministériel de l'EsA des 5 et 6 décembre 2005 à Berlin, qui va notamment décider du niveau de ressources du programme scientifique obligatoire, d'une nouvelle tranche du programme EOEP (Earth Observation Enveloppe Programme), d'une tranche d'activités préparatoires pour GMES et d'une première mission d'exploration automatique de Mars (Aurora). Le second, fixé fin 2006, correspondant aux décisions à prendre au sein du Cnes, après avis de son Comité des programmes scientifiques, sur les nouvelles missions scientifiques développées dans le cadre national et multilatéral.
- les modalités de réalisation des missions scientifiques, et d'exploitation de leurs données sont désormais définies dans le cadre du Comité Inter-Organismes (CIO), présidé par le président du Cnes, et qui rassemble les organismes concernés par ces questions clés (CNRS, CEA, Ifremer, Onera, Météo-France, etc.). Ce CIO a déjà traité un certain nombre de dossiers, notamment sur l'organisation et les moyens de réalisation des instruments, et sur le développement des centres de données thématiques pour une meilleure exploitation scientifique des missions spatiales ;
- s'agissant du mode de réalisation des expériences, le rapport souligne à juste titre le rôle essentiel des laboratoires dans les phases amont (conception) et aval (essais et calibration) et recommande, dans le contexte d'évolution des moyens techniques des laboratoires, que les réalisations soient plutôt effectuées dans l'industrie. Ceci appelle deux remarques :
 - il faut d'abord distinguer selon le type de mission et/ou d'instrument (en dehors de la physique fondamentale, qui est traitée spécifiquement) : en résumé, d'une part, les grands observatoires astronomiques, où la mission est fondée sur un nombre très réduit de grands instruments de plus en plus complexes (parfois 1 ou 2), dont la réalisation excède de plus en plus les ressources techniques des laboratoires ; d'autre part, les sondes planétaires, collections d'instruments spécialisés généralement « à taille humaine » à la portée des laboratoires,
 - dans les activités de « réalisation », il faut distinguer, d'une part, la fabrication et l'intégration des divers composants de l'expérience, activité qui fait largement appel à la sous-traitance industrielle, et d'autre part, la maîtrise d'œuvre système de l'instrument ; le coût d'une maîtrise d'œuvre industrielle est en général très élevé, d'autant plus élevé que le risque lié à la réalisation de « moutons à 5 pattes » est important ; il convient de souligner le rôle que peuvent jouer les

agences spatiales telles que le Cnes comme maître d'œuvre système de tels instruments complexes ; cela va dans le sens des conclusions du CIO, selon lesquelles le CNRS pourvoit en priorité les postes de spécialistes techniques et le Cnes apporterait aux laboratoires un soutien en métiers génériques (activités système, maîtrise d'œuvre, qualité, etc.).

COMMENTAIRE DE L'IFREMER

Jean-Yves Perrot

Président-directeur général

L'Ifremer a analysé le projet de rapport sur « La recherche spatiale française : forces et faiblesses, analyse par discipline » en fonction des missions et objectifs de l'Institut.

De manière générale, l'Ifremer s'accorde avec les auteurs du projet de rapport pour les chapitres qui peuvent relever de ses missions et activités.

L'action de l'Ifremer s'appuie sur le triptyque « recherche, surveillance, appui économique ». Cela est tout à fait cohérent avec le constat des auteurs du projet de rapport, selon lequel toute application opérationnelle ou visant à le devenir doit s'appuyer sur la recherche.

Le rôle de l'Ifremer par rapport aux données spatiales est triple :

- rôle d'utilisateur ;
- rôle de participation à la définition de missions spatiales qui peuvent le concerner ;
- rôle de traitement et d'exploitation de données visant à l'élaboration d'un pôle thématique.

À ce titre, l'Ifremer partage le souci des auteurs du projet de rapport d'assurer de façon optimale la transition entre des missions spatiales répondant à des besoins de recherche et des missions dérivées possédant un caractère opérationnel. La recommandation des auteurs du projet de rapport selon laquelle il appartient à l'Union européenne de piloter la création d'agences capables d'assurer la transition entre la recherche et le fonctionnement opérationnel, puis l'exploitation de satellites et de centres de gestion de données, est une recommandation que l'Ifremer soutient.

Dans son activité liée à la physique de l'océan, l'Ifremer dispose d'une compétence dans le domaine de l'utilisation des données spatiales pour établir des

produits spécifiques destinés à quantifier les flux à l'interface entre l'océan et l'atmosphère. Cette compétence lui permet de participer à la construction du réseau national de pôles thématiques dans le domaine de l'océanographie. L'Ifremer souscrit à la recommandation des auteurs du projet de rapport consistant à soutenir la création de centres thématiques multimissions permettant aux utilisateurs de s'adresser, pour une thématique donnée, à un portail unique pour rechercher les données. De la même façon, l'Ifremer s'associe pleinement à la recommandation consistant à mettre en place, au niveau de l'Europe, des moyens de soutien à l'exploitation scientifique des missions spatiales, de manière à pallier la faiblesse des capacités européennes actuelles de financement sur ce sujet, par comparaison aux financements apportés à la Nasa aux laboratoires américains concurrents.

Enfin, considérant le besoin de séries continues et de grande qualité de la mesure de plusieurs paramètres océaniques de surface par les moyens spatiaux, l'Ifremer appuie la recommandation formulée sur la recherche de financements européens pour la réalisation des projets spatiaux. Ainsi, parallèlement à l'augmentation des ressources du programme « Earth Explorer — Living Planet » recommandée par le Livre blanc « L'espace : une nouvelle frontière pour une Union en expansion », l'Union européenne devrait financer le programme Earth Watch, pour les éléments non pris en compte par les agences opérationnelles spécialisées, dans le droit-fil de l'initiative GMES (Global Monitoring for Environment and Security).

COMMENTAIRE DU MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

Élisabeth Giacobino

Directrice de la Recherche

Jean-Jacques Gagnepain

Directeur de la Technologie

Le rapport de l'Académie des sciences sur la recherche spatiale en France et en Europe arrive à un moment fort opportun, où se dessinent de grandes orientations en France et en Europe concernant les programmes scientifiques spatiaux de la prochaine décennie, et où se présentent un certain nombre de défis majeurs, comme par exemple la fin de la construction et l'exploitation scientifique de la Station spatiale internationale dans un contexte d'incertitudes sur les vols de la navette spatiale. L'analyse approfondie de la situation actuelle et de la prospective contenue dans ce rapport, ainsi que les grandes orientations qui y sont suggérées, notamment sur ce que pourraient être les rôles de l'Agence spatiale européenne, de la Commission européenne et des organismes nationaux, constituent sans nul doute un outil précieux pour le pilotage de la recherche spatiale dans les années à venir. L'Académie des sciences et son comité de la recherche spatiale doivent être vivement remerciés pour ce travail essentiel.

La recherche spatiale présente un double enjeu, scientifique et technologique. Les instruments nécessaires à la recherche scientifique de pointe, qui presque toujours cherchent à franchir des frontières technologiques afin d'ouvrir de nouveaux champs d'investigation, représentent des défis importants, qui nous poussent à progresser sur le plan technologique tout en poursuivant des objectifs de recherche fondamentale. Inversement, la recherche à but technologique entraîne systématiquement l'ouverture de nouvelles voies d'observation et d'expérimentation, et conduit à des progrès majeurs en recherche scientifique. Cette fertilisation mutuelle de la recherche scientifique et de la recherche technologique, présente à tous les niveaux, est particulièrement importante dans le spatial. Il convient donc de nous efforcer de préserver, voire de renforcer cette dualité science-technologie chez tous les acteurs de la recherche spatiale : agences spatiales, industrie, laboratoires de recherche. En particulier, les ressources affectées à la R&T amont, à tous les niveaux, ne doivent pas être négligées.

Par ailleurs, la communauté scientifique représente une classe spécifique d'utilisateurs des systèmes spatiaux, reconnue par les agences spatiales en général, et par le Cnes et l'Agence spatiale européenne en particulier. Elle est, historiquement, la force directrice du développement des missions spatiales scientifiques, bien étudiées dans le rapport. Vous faites des recommandations pour améliorer encore le pilotage et l'exploitation des programmes scientifiques spatiaux : meilleure coordination des organismes, mise en réseaux de moyens, recherche d'un meilleur équilibre entre acquisition et exploitation des données. Ce sont des sujets sur lesquels nous devons progresser encore. Pour aller dans ce sens, nous avons demandé que les dossiers présentant les enjeux scientifiques et technologiques des programmes spatiaux, sur la base desquels sont prises les décisions, comportent aussi une description des communautés scientifiques concernées et des moyens nécessaires pour l'exploitation.

Il s'avère que de multiples programmes d'application prennent une place de plus en plus importante, à côté des missions dédiées, dans la fourniture de nouveaux systèmes utiles à la communauté scientifique. C'est en particulier déjà très patent pour les systèmes d'Observation de la Terre. Les démarches GMES et GEO offrent un forum qui illustre largement ce fait. On constate un effet similaire dans les nombreux développements des applications des systèmes de navigation par satellite, ce qui donne un atout supplémentaire au succès du programme européen Galileo, auquel la France est très attachée. Il convient en conséquence que la communauté scientifique soit pleinement et efficacement associée au développement de ces systèmes appliqués.

Le rapport contient une évaluation de la communauté scientifique par domaine, nécessaire pour une analyse fine de la situation et l'élaboration des recommandations. Il est difficile de définir pour cette évaluation des critères qui soient homogènes et cohérents entre les divers domaines scientifiques considérés. Ces éléments doivent donc être diffusés avec précaution, afin d'en éviter une utilisation erronée.

Pour ce qui concerne les questions stratégiques abordées dans la partie IIB du rapport, nous partageons l'importance donnée à l'observation de la Terre : le succès du programme GMES évoqué ci-dessus nous paraît devoir être la première priorité, car il permettra une montée en puissance et une pérennisation des capacités européennes dans le domaine. La station spatiale internationale, quant à elle, ne saurait faire l'objet d'une quelconque augmentation de la contribution française. L'exploration de Mars constitue bien une des priorités scientifiques européennes ; l'Agence spatiale européenne a d'ailleurs mis en place le programme Aurora pour l'exploration dont la première mission, ExoMars, devrait être décidée lors de la ministérielle de Berlin des 5-6 décembre 2005.

Enfin, nous avons pris connaissance avec grand intérêt de votre recommandation concernant le rapprochement entre les équipes des entreprises et les laboratoires spatiaux, en vue d'un surcroît de fertilisation croisée. Pour aller dans le même sens, il nous semble que la réflexion que vous préconisez sur l'évolution des laboratoires spatiaux devrait donc associer l'industrie spatiale.

COMMENTAIRE DE L'OFFICE NATIONAL D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES AÉROSPATIALES (ONERA)

Michel de Gliniasty

Directeur scientifique général

Reprenant la formulation de Sylvie Joussaume, je regrette que cette deuxième partie du rapport sur la recherche spatiale ne s'intéresse pas à la « recherche pour le spatial » (sauf peut-être aux mathématiques).

Deux exemples spécifiques :

- l'environnement spatial, qui inclut les ceintures de radiations et dont la connaissance conditionne la durée de vie des satellites ; une partie de la recherche correspondante figure toutefois dans la rubrique « plasmas spatiaux » ;
- la rentrée atmosphérique, qui intéresse beaucoup la planétologie et dont une partie seulement des compétences est maintenue dans le domaine militaire.

Présentation à l'Académie
des sciences
par Pierre Léna

Membre de l'Académie des sciences

– 4 octobre 2005 –

Les deux coordinateurs Jean-François Minster et Jean-Loup Puget se sont entourés d'un comité de rédaction et d'un grand nombre de partenaires extérieurs.

La première partie de ce rapport a été votée en comité secret le 17 février 2004. La seconde partie, qui est l'objet de la présentation de ce jour, se décompose en deux sous-parties. Elle a été revue par le Comité RST qui s'est réuni le 5 juillet dernier. Elle a été soumise au Comité de la recherche spatiale élargi de membres additionnels, qui s'est tenu le 26 septembre 2005. Les observations issues de ce comité sont en petit nombre. Il a été conclu très largement à un consensus pour l'adoption du rapport.

La première partie est intitulée : « La recherche spatiale : stratégie et structuration de la programmation au sein de l'Europe ». Ce titre venait de la saisine qui avait conduit le Comité de la recherche spatiale à proposer la rédaction de ce rapport, à savoir une évolution de la politique européenne liée aux nouvelles ambitions de l'Union européenne en matière de politique spatiale et à la nécessité de redéfinir la place de l'Agence spatiale internationale et des agences spatiales européennes. Le Cnes, on le sait, joue un rôle important dans le développement de la politique spatiale européenne, et tout particulièrement de ses lanceurs.

Cette première partie se conclut par un certain nombre de recommandations générales, qui sont :

- adapter les règles de fonctionnement du dispositif spatial européen à la volonté nouvelle de l'Union de devenir acteur principal de celui-ci ;
- assurer, au sein de l'Union européenne, le transfert des résultats de la recherche fondamentale vers les missions opérationnelles ;
- organiser la prospective scientifique et technique au niveau européen ;
- placer la réalisation des programmes européens de recherche dans un contexte pluriannuel plurimissions ;
- l'organisation des grands projets européens, entre ce que réalisent les laboratoires nationaux et ce qui est fait au niveau européen ;
- établir un principe de subsidiarité pour la réalisation des projets spatiaux ;
- rechercher des financements européens. Parallèlement à l'augmentation des ressources du programme Earth Explorer-Living Planet recommandé par le Livre blanc, l'Union européenne devrait financer le programme Earth Watch, pour les éléments non pris en compte par les agences opérationnelles spécialisées, dans le droit-fil de l'initiative GMES (Global Monitoring for Environment and Security) ;

- inclure la chaîne complète de traitement des données dès la conception du projet ;
- conforter l'exploitation scientifique du volume considérable d'informations générées dans les missions spatiales ;
- promouvoir l'emploi de mini- et microsatellites ;
- disposer de systèmes de lancement afin d'optimiser le couple lanceur-mission.

Il existe des recommandations plus spécifiques portant sur le dispositif français :

- la réalisation des expériences : rechercher un accord interorganismes pour de grands projets fortement interdisciplinaires ; regrouper en réseau européen les moyens de test des laboratoires ; améliorer la mise en commun des compétences lors des études ;
- veiller au soutien de la recherche et technologie amont dans la recherche spatiale, en lui attribuant un budget suffisant et en s'assurant que les différents organismes pouvant être impliqués dans cette recherche technologique soient présents. Ceci est essentiel car les performances d'une mission spatiale dépendent de façon critique des performances de la technologie ;
- assurer le traitement, l'archivage et la distribution des données, leur exploitation scientifique en soulignant la nécessité de définir des règles d'accès et de doter les équipes scientifiques d'outils de traitement adaptés.

La deuxième partie traite tout d'abord d'une analyse par disciplines. Les disciplines qui sont les très gros clients de l'utilisation de l'espace sont (en italique celles dont l'espace conditionne totalement les progrès) :

1. Terre : les sciences de l'environnement et du climat
2. Les sciences de la Terre solide
3. *Soleil, Système solaire, systèmes planétaires, exobiologie*
4. *Astronomie*
5. Physique fondamentale et cosmologie
6. Physique des fluides dans l'espace
7. Biologie, physiologie et médecine

Cette analyse a été faite par des sous-groupes de travail qui ont associé la plupart des meilleurs spécialistes. Le rapport est excellent dans sa largeur de couverture et dans son objectivité, mais peut-être qu'il ne traite pas suffisamment des « forces et faiblesses de la recherche spatiale française », selon ce qu'annonce son intitulé. C'est un excellent rapport de prospective, il aurait pu être peut-être un peu plus discriminant et ouvrir des perspectives un peu plus larges.

La seconde partie est intitulée : « **Questions stratégiques pour la recherche spatiale française et européenne** ». Chacune de ces questions est suivie de recommandations.

Les huit points cités dans le rapport sont les suivants :

1 Sciences de la Terre, de l'environnement et du climat : nécessité des systèmes opérationnels d'observation de la Terre

Il s'agit ici d'assurer la meilleure transition possible entre les outils spatiaux de recherche et les systèmes opérationnels, qui sont soumis à un certain nombre de contraintes spécifiques.

La recommandation très forte est la suivante :

« Le transfert des satellites scientifiques vers les satellites opérationnels nécessite dans un premier temps la mobilisation des utilisateurs et des institutions, afin qu'ils contribuent à la spécification du besoin face à l'offre technologique, et prennent progressivement la charge de la maîtrise d'ouvrage du dispositif. C'est à cette étape que se situe aujourd'hui le GMES. »

Dans un deuxième temps, les institutions et agences opérationnelles doivent prendre en charge le financement et la gestion des satellites opérationnels.

Il reste également que l'accent mis sur la mise en place urgente (cf. la probable interruption des mesures de la série Jason) et indispensable d'observatoires opérationnels ne saurait se faire au détriment du maintien d'un effort soutenu consacré aux missions à caractère de recherche, aujourd'hui assuré par la composante Earth Explorer du programme Enveloppe d'observation de la Terre de l'Agence spatiale européenne, dont le financement reste chroniquement insuffisant au regard de l'importance des objectifs de connaissance de la planète, et de la demande de la communauté scientifique. Ainsi, le dernier appel à idées de l'Agence, au printemps 2005, a donné lieu à 27 propositions,

dont seules trois feront éventuellement l'objet d'une étude de faisabilité, et UNE SEULE pourra voler !

2 La fin de la construction de la station spatiale internationale et le désengagement américain

La question de la poursuite d'une contribution européenne importante est posée. Le coût pour l'Europe de sa participation à la Station est élevé, pratiquement le double du programme scientifique obligatoire et beaucoup plus que les dépenses consenties pour les programmes d'observation de la Terre. La recommandation finale est la suivante :

« En conclusion de cette analyse, il semble donc souhaitable que l'Europe élabore une politique de collaboration pour utiliser la station spatiale en partenariat avec d'autres pays disposant d'une politique de recherche spatiale (Russie, Japon, voire Chine et Inde) à un coût proportionné aux objectifs en particulier ceux qui servent le développement de la technologie spatiale. En revanche, il est clair que les programmes de recherche fondamentale ou appliquée ne justifient pas à eux seuls que l'Europe reprenne une fraction des coûts de fonctionnement liés au désengagement américain. »

Cette recommandation peut être un peu développée et clarifiée, vu le déséquilibre évident entre le coût de la participation européenne et l'extrême faiblesse du retour scientifique.

Ceci peut poser un problème pour certaines disciplines qui estiment que la présence humaine à bord d'une station spatiale est indispensable pour poursuivre les études de l'effet de la microgravité sur les organismes. Toutefois, ce point ne suffit pas à justifier les dépenses dont le montant est considérable. Jacques Blamont a fait connaître une proposition de complément en disant que « l'Europe doit établir de multiples scénarios couvrant toutes les hypothèses, depuis le retrait total de la Station spatiale jusqu'à une poursuite des engagements pris avant le désengagement américain ».

3 L'exploration du Système solaire. Recommandation sur le programme Exploration

Ce programme apparaît comme le pendant de l'accent très fort mis par la Nasa sur l'exploration de Mars.

Il est urgent de définir un contexte qui permette à l'Europe de rester partie prenante à cette grande aventure scientifique, dont une étape essentielle sera le retour d'échantillons de Mars.

Au sein de l'exploration martienne, la question du poids à donner à la recherche de vie fossile sur Mars reste ouverte. Certains considèrent que ceci ne mérite pas des dépenses considérables et d'autres ne partagent pas ce point de vue. Ce point devrait être rediscuté sur le fond. La spécificité de l'Europe demande à être clairement affirmée face à la volonté de la Nasa. Ce point a été abordé dans les conclusions d'un groupe de l'« European Science Foundation ». Des conclusions ont été préparées en vue du prochain Conseil des ministres destiné à examiner les programmes de l'Agence.

4 Recommandation sur le mode de réalisation des expériences

Les expériences spatiales, qui demandent des durées de préparation importantes, sont très différentes selon qu'il s'agit de missions récurrentes d'observation de la Terre, ou bien d'observations en direction des planètes, ou au bénéfice de l'astronomie, ou à celui de la physique fondamentale. Ces dernières nécessitent d'explorer des technologies nouvelles, dans lesquelles les compétences des laboratoires sont irremplaçables. Il n'est pas possible de confier directement à l'industrie la conception de nouveaux détecteurs de rayonnements, de nouveaux systèmes de confinement, etc.

La recommandation est la suivante :

« Sur les instruments de technologie mieux établie, les laboratoires doivent concentrer leurs forces dans les domaines amont (recherche et technologie, études de concept et de faisabilité), et les domaines aval : étalonnage au sol et en vol, opérations scientifiques, traitement des données de niveau primaire permettant la production de données en unités physiques, nettoyées des signatures expérimentales. »

5 Mode de réalisation des expériences de physique fondamentale dans l'espace

Le domaine de la physique fondamentale est nouveau par rapport aux domaines comme l'astronomie ou la géodésie spatiale. Dans ce domaine, la France est excellente.

S'il est confirmé que les laboratoires spatiaux doivent jouer un rôle important dans ce secteur, une démarche volontariste similaire à celle du début des

années 1980 doit être faite. À cette époque, les laboratoires spatiaux français, spécialisés dans les plasmas spatiaux et les observations en ultraviolet et en rayonnement gamma, ont mis leur savoir-faire et leur moyens au service de la construction des instruments de l'astronomie infrarouge, X et submillimétrique et de la planétologie.

6 Physique en microgravité – Concertation entre scientifiques et ingénieurs

Des développements importants ont été faits sur des lanceurs russes puis sur la station spatiale internationale. Ce domaine risque de souffrir beaucoup de la diminution voire de l'arrêt de l'activité de la station spatiale. Cette physique est également intéressante « par » l'espace, dans les conditions de microgravité, mais aussi « pour » l'espace (rallumage des propulseurs, comportement de fluides, processus d'ébullition dans des conditions d'impesanteur). Ceci pose des questions aux physiciens et aux ingénieurs, qui ne peuvent être bien traitées que par une étroite concertation entre les deux.

Le rapport propose : « *Des réflexions récentes limitées à l'échelle française — mais extrapolables en Europe — conduisent à envisager la création d'instituts, ou laboratoires sans murs, réunissant scientifiques et ingénieurs, de façon à permettre à ces derniers de faire connaître très tôt leurs défis aux scientifiques, mais aussi de façon à faire passer le plus rapidement possible le savoir récemment acquis des laboratoires vers les services techniques.* »

7 L'exploitation optimale des données dans le contexte international

Il est nécessaire de mettre en place des mécanismes d'échange pour que les concepteurs soient en bonne position pour les exploiter. Dans la conception d'une mission, la totalité de la chaîne doit être prise en compte jusqu'à réception, le traitement et l'archivage des données.

Il faut pour cela un budget d'exploitation scientifique des grandes missions pendant la période qui suit immédiatement le lancement. Il faut, de plus, financer l'archivage et les outils d'accès aux données.

Pour cela, la solution passe par un engagement au niveau européen visant, soit à un élargissement des missions de l'Esa, accompagné des budgets nécessaires, soit à une prise en charge de ces besoins par des programmes financés par la Commission européenne.

8 Mathématiques et espace

En astronomie ou en planétologie, les observations spatiales conduisent souvent à des problèmes inverses. Il y a deux approches : soit inverser l'observation, soit comparer l'observation à des modèles. Il existe également une troisième approche qui est l'assimilation des données.

Il est recommandé de renforcer les liens institutionnels entre mathématiciens appliqués, en particulier statisticiens, et utilisateurs de ces techniques dans l'analyse des données spatiales. Ces techniques demandent des moyens de calcul lourds et du personnel technique spécialisé. La part du coût de ces phases par rapport au coût total pour les expériences spatiales augmente, comme cela a été noté dans plusieurs des rapports par discipline. Cette évolution doit être anticipée et prise en compte dans la planification des projets futurs. Les aspects interdisciplinaires mentionnés ci-dessus doivent aussi être pris en compte.

La précision et la finesse des données spatiales actuelles amènent à espérer une modélisation beaucoup plus élaborée des systèmes complexes sur lesquels elle s'applique. Jean-Claude André souhaite notamment que l'on puisse mobiliser davantage la communauté des mathématiciens sur l'étude globale des systèmes complexes.

INTERVENTION DE PIERRE BUSER

Membre de l'Académie des sciences

Premiers vols français d'animaux en microgravité

Les premiers vols habités avec phase de microgravité ont eu lieu dans les années 1960, organisés par le Cerma (Centre de recherches de médecine aéronautique Paris), dirigé et animé par le médecin général Grandpierre. Les vols eurent tous lieu dans le sud algérien, au pas de tir de Hammaguir (au sud-ouest de Colomb-Béchar) installé par l'armée française. Les fusées furent toutes du type Vesta [phase ascensionnelle de 240 km, suivi d'une phase de vol parabolique en microgravité (« gravité zéro ») durant 6-8 min, puis de la descente en parachute de la capsule détachée du corps de fusée ; durée totale du vol 15 min 20 s]. Participèrent à ces campagnes, outre le général Grandpierre, le capitaine Chatelier (actuellement médecin général CR), quelques techniciens et moi-même, autrement dit un personnel très réduit.

En tout six animaux ont été lancés, au cours de trois campagnes de tir, la première année deux fusées avec chaque fois un rat adulte, la deuxième, avec deux chats adultes, la troisième, avec deux jeunes macaques adultes. Au retour, tous les animaux ont atterri dans d'excellentes conditions et apparemment parfaitement normaux.

Les sujets de l'expérience furent implantés de capteurs (électrodes) destinés à recueillir leur activité électrique du cortex cérébral (EEG), marqueur de leur état comportemental (attention, assoupissement). Les macaques furent l'objet de l'étude la plus intéressante car on s'est efforcé de suivre tout au long du vol leur capacité à exécuter une tâche motrice précise, en l'occurrence un conditionnement instrumental alimentaire auquel ils avaient été longuement dressés au sol. Pendant le vol, une caméra située devant l'animal filmait son faciès tandis qu'une autre enregistrait les mouvements de sa main. D'autre part l'EEG était enregistré en continu par télémesure. On a constaté un intéressant phénomène : lors de la phase ascendante du vol, l'animal exécutait sa tâche sans paraître le moins du monde affecté, son EEG étant normal. Au contraire, dès qu'était atteinte la période d'apesanteur, l'animal, immobile, cessa complètement d'exécuter sa tâche : on n'a pas observé d'erreurs, tel par exemple un geste mal orienté. Comme chez les rats et les chats, l'EEG a montré un tracé très riche en fréquences lentes, qui ont semblé tout à fait anormales. Simultanément le

faciès de l'animal, paupières mi-closes, a pris lui aussi une expression anormale, suggérant le malaise. Il est remarquable qu'aussitôt terminée la phase d'apesanteur, ce singe ait récupéré un faciès normal, que son EEG ait lui aussi retrouvé sa normalité et que simultanément, il se soit remis à sa tâche comme au début du vol. Après l'atterrissage, les opérateurs ont ouvert la tête de la fusée et trouvé le sujet en train d'appuyer calmement sur le dispositif de récompense. Que s'est-il passé pendant la période d'apesanteur ? Les ondes rythmiques lentes s'observent lorsque le sujet devient incapable de fixer son attention sur son environnement, soit qu'il s'assoupisse, soit qu'il tombe dans un état d'« hébétude ». Toutefois, on s'est demandé, devant l'expression du faciès, si l'animal n'avait pas été pris de nausées, qui surviennent fréquemment, on le sait maintenant, chez l'homme dans l'espace. On voit ainsi que l'absence de pesanteur est capable d'exercer un effet très net sur les capacités cognitives des mammifères, ce qui ouvrait dès lors les questions : risque-t-il d'en être de même pour l'homme dans l'espace ?

La leçon à tirer de ces expériences, certes très partielles, incomplètes et qui paraissent bien élémentaires au regard des approches qui ont suivi, n'est cependant à nos yeux pas négligeable. Elle enseigne qu'il a été possible de réaliser, avec des moyens limités, des observations que n'ont pas radicalement contredit — à notre connaissance tout au moins — les constatations plus modernes.

INTERVENTION DE JEAN KOVALEVSKI

Membre de l'Académie des sciences

Il ne me paraît pas opportun que la France et l'Esa s'engagent dans des programmes coûteux en biologie et médecine dans l'espace. Les Américains, en préparation de leurs projets d'homme sur la Lune et sur Mars vont y mettre des moyens considérables pour assurer le succès de leurs programmes. Une contribution européenne ne pourrait être que marginale, tout en coûtant très cher. Seules des opportunités offertes par la Nasa seraient à prendre en considération, ce qui n'exclut pas des expériences à terre pouvant contribuer à ce domaine.

INTERVENTION D'YVON LE MAHO

Membre de l'Académie des sciences

Stratégie sur la recherche spatiale

Il ne faudrait pas que la pertinence de l'argumentation sur le coût financier disproportionné du fonctionnement de la station spatiale internationale par rapport à l'envoi d'engins automatiques pour des projets en sciences de l'Univers se traduise par un abandon ou à une réduction du soutien à la recherche en sciences de la vie. En effet, celles-ci ne sont pas uniquement conditionnées par l'envoi d'hommes dans l'espace. Or, il est d'une importance majeure de poursuivre des recherches qui, effectuées au sol, font progresser nos connaissances sur la physiologie humaine face à certaines des contraintes liées à un vol de longue durée dans l'espace. C'est notamment le cas des conséquences métaboliques d'une inactivité prolongée qui sont étudiées dans le cadre du programme *bed rest*. Comme le manque d'exercice est également la principale cause de l'obésité, ces recherches induisent en outre des avancées majeures dans un domaine qui devient l'une des principales préoccupations en santé publique. Or, dans ces études, des équipes françaises se situent au premier plan international.

Il est surprenant par ailleurs que le rapport ne fasse aucune mention de la révolution en sciences de la vie que constitue l'équipement d'animaux dans leur milieu naturel avec des émetteurs et des systèmes d'acquisition de données ultraminiaturisés. Ces émetteurs et instruments de mesure permettent en effet de les localiser par satellite (grâce aux systèmes Argos ou GPS) et de recueillir également par satellite des informations sur leur biologie ou sur l'environnement dans lequel ils évoluent. Cette nouvelle approche est actuellement à l'origine d'avancées majeures dans nos connaissances en écologie animale. On peut ainsi avoir des informations sur les déplacements et l'abondance de poissons situés dans les parties supérieures des chaînes trophiques, c'est-à-dire de prédateurs comme les thons. Ces informations sont capitales pour une meilleure gestion de ces populations qui ont une grande importance économique. Elles ont une toute aussi grande importance pour mieux définir la stratégie à développer pour préserver des espèces sérieusement menacées, comme par exemple les tortues marines. Cette nouvelle approche, en permettant d'obtenir des informations sur la biologie d'animaux soumis dans leur milieu naturel à des contraintes impossibles à reproduire au laboratoire, comme les 70 minutes de plongée d'un phoque

à 1000 mètres de profondeur, permet de découvrir des mécanismes adaptatifs encore inconnus. Enfin, cette approche permet d'obtenir grâce aux animaux des informations autrement plus difficiles à obtenir, ou d'une manière plus coûteuse, sur le milieu dans lequel ils évoluent. Un exemple est l'acquisition, grâce à des cétacés, d'informations sur l'évolution de la salinité et de la température de l'océan sous la calotte de banquise. Dans ce domaine également, outre le rôle central joué par la France dans la mise en œuvre du système Argos, quelques équipes de biologistes du CNRS se situent au meilleur niveau international.