

2010

ACADÉMIE DES SCIENCES

LES SCIENCES SPATIALES

ADAPTER LA RECHERCHE FRANÇAISE
AUX ENJEUX DE L'ESPACE

Sous la direction de
JEAN-LOUP PUGET



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Les sciences spatiales

Adapter la recherche française aux enjeux de l'Espace

RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE N° 30

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.
- *La recherche spatiale française*
RST n° 22, 2006.
- *L'épidémiologie humaine. Conditions de son développement en France, et rôle des mathématiques*
RST n° 23, 2006.
- *La maîtrise des maladies infectieuses. Un défi de santé publique, une ambition médico-scientifique*
RST n° 24, 2006.
- *Les eaux continentales*
RST n° 25, 2006.
- *La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale à la production d'énergie ?*
RST n° 26, 2006.
- *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux*
RST n° 27, 2007.
- *Hormones, santé publique et environnement*
RST n° 28, 2008.
- *Événements climatiques extrêmes. Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux*
RST n° 29, 2010.

Imprimé en France

© 2010, 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 978-2-7598-0575-4

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.

Depuis 1999, vingt-neuf rapports ont ainsi été édités et remis au ministre chargé de la Recherche.

This page intentionally left blank

COMPOSITION DU COMITÉ RST

Christian AMATORE

Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'École normale supérieure, université Pierre-et-Marie-Curie

Jean-François BACH

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

François BACCELLI

Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique

Roger BALIAN

Membre de l'Académie des sciences – Conseiller scientifique au Commissariat à l'énergie atomique

Alain CARPENTIER

Vice-président de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Patrick CHARNAY

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

François CUZIN

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

Michel DAVIER

Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Paris-Sud

Jean DERCOURT

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

Henri DÉCAMPS

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

Christian DUMAS

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

Pierre ENCRENAZ

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

Marc JEANNEROD

Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Claude-Bernard

Jean-Pierre KAHANE

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

Bernard MEUNIER

Membre de l'Académie des sciences – Président-directeur général de Palumed

Paul-Henri REBUT

Correspondant de l'Académie des sciences – Conseiller scientifique auprès du Haut commissaire à l'énergie atomique

Jean SALENÇON

Président de l'Académie des sciences – Ingénieur général honoraire des ponts et chaussées – Professeur honoraire à l'École polytechnique et à l'École nationale des ponts et chaussées

Erich SPITZ

Correspondant de l'Académie des sciences – Conseiller du groupe Thales

Pierre SUQUET

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

Philippe TAQUET

Membre de l'Académie des sciences – Professeur au Muséum national d'histoire naturelle

Alain-Jacques VALLERON

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

Jean-Christophe YOCCOZ

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

Coordonnateur

Jean DERCOURT

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

Coordination éditoriale :

Jean-Yves CHAPRON

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

This page intentionally left blank

AVANT-PROPOS

Jean Dercourt

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

Le présent rapport fait le point des activités spatiales françaises dans son cadre européen et international. Ce cadre avait fait l'objet d'un premier rapport de l'Académie des sciences, publié en 2006 et rédigé par le Comité de la recherche spatiale, sous la direction de Jean-Loup Puget (Rapport RST N° 22 – *La recherche spatiale française* – 2006).

Le rapport actuel présente l'évolution des actions entreprises, des résultats acquis, de ceux en cours de réalisation et, enfin, les projets à cours et moyen termes. Il souligne la croissance très rapide des observations de la Terre.

La principale modification intervenue depuis 2006 est l'intérêt croissant que portent les scientifiques français aux problèmes associant spatial et Société. Les résultats des recherches spatiales, non seulement accroissent les connaissances scientifiques et techniques, mais elles imprègnent désormais la Société civile dans sa vie et ses préoccupations; de ce fait, de très nombreux scientifiques français, quel que soit leur domaine de recherche, utilisent des données spatiales. Ces acteurs relèvent essentiellement des universités et du CNRS. Le CNRS, à la fois opérateur de recherches et agence de moyens, est resté, certes avec des modifications, un établissement unitaire apte à prendre des engagements au nom de ses chercheurs. Tel n'est pas le cas des acteurs relevant des différentes universités, désormais autonomes, chacune établissant une politique scientifique propre.

La recommandation première de ce rapport est de compléter les structures existantes pour permettre aux universités et aux équipes universitaires qui veulent faire de l'utilisation des données spatiales un axe de leur politique scientifique de le faire en coordination avec les acteurs nationaux (Cnes, CNRS, CEA) entre autres par la structuration de pôles spatiaux régionaux.

This page intentionally left blank

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Animateur

Jean-Loup PUGET

Membre de l'Académie des sciences –
Directeur de recherche au CNRS

Institutions

Richard BONNEVILLE

Directeur adjoint Prospective, stratégie,
programmes, valorisation et relations
internationales au Cnes

Philippe LAVOCAT

Adjoint au directeur des sciences
de la matière du CEA

Dominique LE QUÉAU

Directeur de l'Institut national des sciences
de l'Univers (Insu)

Guy GUYOT

Directeur adjoint technique à l'Insu

Experts du groupe

Gilles BERGAMETTI

CNRS, Tosca – Océan et atmosphère

Pierre BINETRUY

Laboratoire APC-AstroParticule
et Cosmologie (UMR 7164) – Physique
fondamentale

Geneviève CAMPAN

Cnes – Exploitation de mission et de données

Michel DIAMENT

Institut de physique du Globe de Paris – Terre
solide

Thérèse ENCRENAZ

CNRS, CERES – Astronomie et planétologie

Jean-Marie FLAUD

CNRS Insu – Chimie atmosphérique
et qualité de l'air

Stavros KATZANEVAS

CNRS – Institut national de physique
nucléaire et de physique des particules
(IN2P3) – Astroparticules, cosmologie

Denis MOURA	Cnes – Technologies spatiales
Jean PAILLEUX	Météo-France – Météorologie
Christophe VALORGE	Cnes – Développement des charges utiles scientifiques
Patrick VINCENT	Ifremer – Océanographie
Jean-Pierre WIGNERON	Inra – Télédétection surfaces

Experts consultés

Axel KAHN	Président de la Commission recherche de la Conférence des présidents d'université
Emmanuel ROSENCHER	Directeur scientifique de la branche physique à l'Onera

ORGANISATION DES TRAVAUX

Mandat

Ce groupe de travail a été constitué à l'initiative de l'Insu, du Cnes et de la direction des Sciences de la matière du CEA. Le Cnes « **a pour mission de développer et d'orienter les recherches scientifiques et techniques poursuivies en matière spatiale** » (code de la Recherche, article L331-2 de la dernière révision de 2008), l'Insu est une tutelle pour une grande fraction des unités mixtes de recherche impliquée dans la recherche spatiale. La DSM contribue fortement à la recherche spatiale en collaboration avec le Cnes. Ces organismes ont demandé à un groupe de travail d'effectuer pour eux une réflexion sur l'avenir de la recherche spatiale en France dans le contexte de l'évolution du dispositif de recherche en cours.

L'objectif est d'anticiper les évolutions à 15 ans du dispositif scientifique national dédié à la conception, au développement, à la réalisation, au test et à l'exploitation scientifique des missions spatiales. Cela peut concerner les missions scientifiques faisant l'objet d'une programmation spécifique (ex. : le programme Cosmic Vision), l'utilisation à des fins scientifiques de données issues de missions opérationnelles, ou, dans la perspective de GMES, la réalisation de missions de démonstration associant objectifs scientifiques et anticipation de nouveaux services.

La réflexion doit porter sur l'organisation à mettre en place pour optimiser les phases critiques de réalisation technique des projets spatiaux, dont la complexité s'accroît, ainsi que les phases d'exploitation dont la durée s'allonge et le coût relatif augmente. Ces dernières nécessitent l'accès aux données, la mise en place de chaînes de traitements lourdes, et la mise à disposition d'outils d'archivage massif et de distribution. Ce schéma est amené à évoluer, plus ou moins rapidement, avec les priorités instrumentales formulées par les communautés scientifiques et l'émergence de nouvelles technologies en mécanique, électronique, optique, ainsi qu'avec les nouveaux besoins logiciels. Le groupe devra également examiner la nature des métiers techniques nécessaires à chacune de ces différentes phases. Le groupe évaluera la place relative que doivent tenir, dans ces différentes phases, le Cnes, les organismes publics de recherche dotés de laboratoires directement impliqués dans les réalisations spatiales – CNRS, CEA – ainsi que le rôle des organismes situés plus en aval, et celui d'autres opérateurs publics ou privés. Il aura enfin à estimer l'incidence de la nouvelle organisation de gestion de la recherche, ainsi que des nouveaux outils de fédération et de coopération : RTRA, pôles de compétitivité, PRES, universités « libres et responsables » . . .

Objectifs

L'exercice doit déboucher sur :

1. une cartographie nationale précise des pôles techniques nécessaires à l'accomplissement des phases amont des projets (R&T, analyse de mission, étude de faisabilité), ainsi qu'à leur réalisation ;
2. une vision nationale des pôles thématiques nécessaires à leur exploitation et des moyens techniques (bases de données, centres informatiques...) qui doivent les accompagner ;
3. un plan pluriannuel d'emplois techniques anticipant les évolutions de métiers nécessaires au développement des technologies émergentes, tant matérielles que logicielles ;
4. une réflexion sur les modèles économiques permettant de mieux cerner les coûts à achèvement des projets scientifiques, et des démonstrateurs de services, et d'optimiser ainsi les coûts totaux consolidés qui y sont dédiés.

Méthodologie

Placé sous la présidence de Jean-Loup Puget (Académie des sciences) et assisté d'un secrétaire (assuré par l'Insu : Guy Guyot), le groupe de travail a été constitué d'un noyau « institutionnel » (Cnes-Insu-CEA) et d'un ensemble d'experts scientifiques et techniques, désignés par les précédents. Les membres institutionnels du groupe de travail, appuyés sur leurs collaborateurs ont été par ailleurs chargés de fournir les documents utiles aux travaux du groupe.

Calendrier des travaux

Le groupe a été mis en place par l'Insu, le Cnes et le CEA le 15 juin 2009.

Il a tenu les réunions aux dates suivantes :

- Réunion 1 : 7 juillet 2009 (Tolbiac) : revues des rapports existants sur ces sujets, discussion générales, répartition des tâches
- Réunion 2 : 2 septembre 2009 (IAP) (thématique Terre, Environnement, Climat)
- Réunion 3 : 25 septembre 2009 (Cnes)
- Réunion 4 : 28 octobre 2009 (Sciences de l'Univers et nouvelles thématiques)
- Réunion 5 : 9 novembre 2009
- Réunion 6 : 30 novembre 2009
- Réunion 7 : 11 janvier 2010
- Réunion 8 : 2 février 2010

Réunion 9 : 10 mars 2010
Réunion 10 : 25 mars 2010
Réunion 11 : 7 avril 2010
Réunion 12 : 19 avril 2010

Des rapports d'étape sur le travail du groupe ont été présentés au Comité des programmes scientifiques du Cnes (29 octobre 2009), au Comité inter-organismes du Cnes (4 novembre 2009), au Comité scientifique de l'Insu (17 décembre 2009), au Conseil de l'Insu (18 décembre 2009) et aux directeurs de laboratoires en sciences de l'Univers et physique fondamentale impliqués dans la recherche spatiale. Les avis et commentaires reçus ont été pris en compte.

Le groupe a consulté des experts à la CPU et l'Onera.

Des délégations du groupe ont entendu quelques industriels fortement impliqués dans les projets scientifiques spatiaux, soit sur la réalisation des charges utiles soit sur l'exploitation des données.

À l'Académie des sciences, le rapport a été soumis au Groupe de lecture critique le 27 mai 2010 et adopté par l'assemblée plénière le 29 juin 2010.

This page intentionally left blank

TABLE DES MATIÈRES

Rapport Science et Technologie	iii
Composition du Comité RST	v
Avant-propos	ix
Composition du groupe de travail	xi
Organisation des travaux	xiii
Résumé exécutif	xxi
1. L'importance des données spatiales	xxi
2. Évolution de l'organisation des structures de missions spatiales	xxi
3. Les moyens du spatial à adapter à l'évolution des missions	xxii
4. La clé du succès pérenne : des ressources humaines de haut niveau	xxiii
5. Une importante évolution des acteurs du spatial	xxiv
5.1. Évolution du Cnes	xxiv
5.2. Évolution du secteur universitaire	xxv
5.3. Évolution du CNRS	xxv
Executive summary	xxix
1. Importance of data from space	xxix
2. Structural changes in the organisation of space missions	xxix
3. Adapting space means to changes in mission focus	xxx
4. High quality human resources, the key to perennial success	xxxi
5. A significant change in space sciences participants	xxxii
5.1. Evolution of the Cnes	xxxii

5.2. Evolution of the university system	xxxiii
5.3. Evolution of the CNRS	xxxiii

CHAPITRE 1 Le contexte général 1

1. L'importance croissante des observations spatiales	3
2. Les évolutions en cours	5
2.1. Le contexte mondial	5
2.2. L'échelle européenne	7
2.3. Le cadre français	9
2.4. Le rôle des laboratoires	14

CHAPITRE 2 Sciences du système Terre 19

1. Accroître les connaissances : continuité des données et nouveaux observables	21
2. Répondre à une demande sociétale forte	22
3. Les observations spatiales et <i>in situ</i> : deux composantes complémentaires	23
4. Les missions spatiales et leurs spécificités	26
5. Un partage public/privé fort en observation de la Terre (OT)	29
6. Renforcer les capacités dans le domaine de l'instrumentation innovante	31
7. Une meilleure exploitation des données spatiales : l'accompagnement des missions spatiales	32
8. Un cas particulier en observation de la Terre : les surfaces et interfaces continentales (SIC)	34

CHAPITRE 3 Étude et exploration de l'Univers 39

1. L'élargissement du champ disciplinaire lié à des nouvelles questions	41
1.1. Les liens avec astroparticules	43
1.2. Les liens avec la physique fondamentale	43
1.3. Les liens avec les sciences de la Terre : planétologie comparée	45
1.4. Les liens avec la biologie : exobiologie spatiale	46
2. L'évolution du périmètre des laboratoires spatiaux	47
2.1. Les laboratoires d'étude de l'Univers extraterrestre	47
2.2. Les laboratoires de l'IN2P3 travaillant dans le domaine des astroparticules et de la cosmologie	48
2.3. Les autres laboratoires travaillant dans le domaine de la physique fondamentale	49
3. L'évolution du contexte programmatique	49
3.1. Des missions de plus en plus complexes	49

3.2. Un besoin accru de suivi des missions en opération – Observatoire virtuel	51
3.3. Le rôle essentiel du couplage sol-espace	52
3.4. L'évolution programmatique au Cnes et à l'Esa	53
3.5. L'importance croissante de la R&T et le rôle des phases 0	54
4. Propositions d'évolution de l'organisation des laboratoires	55
4.1. Un moyen national lié aux équipements lourds	55
4.2. Le traitement, l'archivage et la distribution des données	56
4.3. L'exploitation scientifique	57
5. Organisation d'un pôle spatial autour de la physique fondamentale	57
CHAPITRE 4 Sciences de la vie et de la matière en micropesanteur	59
Résumé des recommandations	63
Groupe de lecture critique	75
Composition du Groupe de lecture critique	77
Commentaire du Commissariat à l'énergie atomique	81
Commentaire de la Conférence des grandes écoles	85
Commentaire de l'Onera	87
Présentation à l'Académie des sciences, par Pierre Léna	89

This page intentionally left blank

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

1 | L'importance des données spatiales

Les données spatiales prennent une place grandissante dans les sciences, y compris dans les sciences humaines et sociales, dans les sciences de la vie et notamment en biologie ; en particulier, dans les sciences de la Terre, une large fraction de ces activités scientifiques est couplée à des questions sociétales majeures pour lesquelles la vision homogène à grande échelle et sur de longues périodes, permise par l'observation spatiale, est irremplaçable. L'élargissement des sciences utilisatrices de l'espace donne une importance croissante à l'interdisciplinarité.

La France et ses équipes scientifiques jouent un rôle important dans ce domaine grâce à la politique nationale ambitieuse menée de façon constante depuis 50 ans au moyen de son agence spatiale nationale, le Centre national d'études spatiales (Cnes).

2 | Évolution de l'organisation des structures de missions spatiales

Le Cnes, essentiellement le Centre de Toulouse, doit continuer à travailler dans le développement d'instruments spatiaux innovants et complexes. Tous les laboratoires de recherche n'ont pas les moyens techniques nécessaires à la réalisation d'instruments spatialisés de plus en plus sophistiqués, et l'industrie hésite à assumer les risques associés au développement de « moutons à cinq pattes ». De surcroît, certains instruments ont un volume excessif pour les capacités d'un laboratoire, fût-il l'un des mieux outillés, et mobilisent trop ses ressources techniques, au risque de compromettre sa participation à d'autres projets. Pour surmonter ces difficultés, on recommande la constitution d'équipes intégrées Cnes-laboratoires, comme cela s'est d'ailleurs déjà fait avec succès.

En conclusion, pour chaque mission il faut systématiser :

- un travail d'optimisation de la distribution des tâches à définir et à présenter lors des revues de développement dès la phase A du projet ;

- la rédaction et la signature d'un contrat d'objectif entre les opérateurs de recherche et les agences concernées apportant des ressources ; ce document doit être mis en place dès la phase A ;
- la constitution d'un comité directeur inter-organismes regroupant ces signataires, pour assurer le suivi pendant toute la durée du projet et faire face aux aléas quand ils se présentent.

3 | Les moyens du spatial à adapter à l'évolution des missions

Le Cnes doit recevoir les moyens de remplir les fonctions spécifiques du spatial dont il est chargé : pilotage des développements technologiques pour l'espace, maîtrise d'œuvre et opérations des missions scientifiques nationales et des plus gros instruments destinés à des missions internationales, financement des charges utiles développées dans les laboratoires, réception et traitement des données de ces missions, organisation des prospectives scientifiques de la recherche spatiale par discipline.

L'ANR pourrait créer un fond pour des programmes de soutien :

- aux activités de recherche et développement en amont des missions (et non liées spécifiquement à une mission particulière) en particulier pour favoriser les contributions technologiques pointues d'équipes peu impliquées dans le spatial ;
- à l'exploitation scientifique des données des grandes missions spatiales internationales au sein desquelles il existe une forte concurrence et où il est nécessaire de concentrer des moyens importants sur les années qui suivent immédiatement le lancement (ce qui est incompatible avec les financements récurrents relativement constants de la recherche (ceci se fait déjà au sein des programmes blancs mais devrait être renforcé).

L'organisation d'une coordination régionale des activités spatiales dans et autour d'un campus d'excellence, mettant en contact régulier l'ensemble des acteurs de la chaîne allant de la conception des missions à leur exploitation scientifique, devrait permettre de faire émerger des pôles de recherche spatiale ayant une visibilité mondiale. Ces acteurs sont : les laboratoires, les plates-formes mutualisées technologiques et les pôles thématiques, les écoles d'ingénieurs et les grands établissements de recherche et de formation, les industriels. L'organisation ou le développement de filières de formation liées au spatial et à l'utilisation des données spatiales doit être une partie importante des activités de ces pôles.

Au niveau national, nous proposons la mise en place d'un moyen national regroupant les laboratoires disposant de moyens lourds d'intégration et de test (qui devrait bénéficier du label de TGIR du CNRS). Ces laboratoires seraient, pour tout ou partie, issus des laboratoires spatiaux du premier cercle et pourraient constituer une extension de l'actuel GIS MoteSpace en Île-de-France. L'Insu devra alors s'engager, dans la mesure du possible, à maintenir les moyens humains de cette plate-forme.

La structure (Comité inter-organismes de la Recherche Scientifique Spatiale) mise en place par le Cnes avec comme premiers membres le CEA et le CNRS, mais ouverte aux autres organismes concernés, répond parfaitement à une grande partie des besoins. Il est suggéré de donner à ce groupe la fonction de coordination des structures régionales envisagée dans le cadre des PRES et des grands campus et d'y associer la Conférence des présidents d'université (CPU).

Recommandation

Le Comité inter-organismes (CIO) mis en place par le Cnes devrait évaluer et préciser la mission et le rôle de ces pôles interdisciplinaires régionaux dans le dispositif futur. La Région toulousaine et le campus de Saclay sont les deux plus grands regroupements de ce type qu'il convient d'évaluer. Ces pôles devraient particulièrement se positionner comme intermédiaires avec les nouvelles équipes utilisatrices (ou utilisatrices potentielles) des données spatiales.

Le CIO devrait inviter la CPU à désigner un représentant.

4 | La clé du succès pérenne : des ressources humaines de haut niveau

Le recrutement et l'évaluation des chercheurs travaillant sur les charges utiles des missions spatiales rencontrent des problèmes spécifiques liés à la très longue durée de développement des grandes missions spatiales (15 à 20 ans). Nous recommandons la mise en place d'une réflexion sur ces questions dans les structures nationales de recrutement de chercheurs avec ce profil (CNRS, CNAP).

En complémentarité de l'action des équipes du Cnes, les laboratoires assurant le pilotage scientifique des grands projets au sein de l'Insu, du CEA et de l'Onera doivent absolument préserver la capacité de constituer des équipes système comprenant les grandes spécialités des techniques spatiales.

En ce qui concerne les Centres thématiques, de traitement et d'archivage des données, outre le rôle spécifique du Cnes, les forces techniques du CEA et du CNRS devront être complétées par les apports venant des centres universitaires et des autres organismes utilisateurs. L'utilisation optimale des outils développés par les informaticiens et mathématiciens doit être une préoccupation dans ces centres. De plus, des problèmes nouveaux apparaissent avec les grandes masses de données et avec les méthodes mathématiques pour confronter les modèles et théories avec ces données. C'est une source de problèmes originaux pour les mathématiques incitant à une interdisciplinarité qui dépasse la relation de type utilisateurs des mathématiques existant depuis longtemps dans la recherche spatiale.

5 | Une importante évolution des acteurs du spatial

Le contexte aux plans national et international est très évolutif. Les recommandations ci-dessous doivent permettre de rester compétitif.

L'élargissement du champ des recherches ayant besoin des données spatiales se traduit par un nombre accru d'équipes utilisatrices venant d'organismes de recherche plus nombreux. De ce fait, le Cnes doit faire face à une pression accrue pour financer et mettre en œuvre un plus grand nombre de missions. De plus, la qualité des développements permet en général que la durée d'opération effective de ces missions soit supérieure à leur durée de vie spécifiée, d'où une pression supplémentaire sur les ressources consacrées aux opérations et à l'exploitation.

Le spatial reste un moteur de développements technologiques dans de nombreux domaines. L'augmentation de la puissance de calcul, des algorithmes et de la robotique, que ce soit en vol ou pour les segments sol et l'analyse et l'interprétation des données, font évoluer rapidement la conception des missions. Ces progrès peuvent aussi influencer sur l'optimisation et les compromis du partage des tâches entre segment sol et vol pour certaines fonctions d'une mission spatiale : compromis entre autonomie à bord plus ou moins grande, fiabilité et coût, entre traitement à bord et transmission au sol plus massive. Cela doit être pris en compte dans l'évolution des métiers de la recherche spatiale.

5.1 Évolution du Cnes

Nous recommandons que le Cnes reste centré dans son support aux missions, que ce soit sous forme de financement ou de contribution des équipes

techniques du Centre spatial de Toulouse, ou sur les phases les plus spécifiquement spatiales des missions. Par l'organisation des relations inter-organismes aussi bien au niveau national que pour chaque mission, on pourra prévoir, dès les phases d'étude des projets, les ressources pouvant être apportées par les organismes dont dépendent les équipes utilisatrices des données spatiales, en particulier dans la phase la plus aval de l'exploitation scientifique des données. Ceci permettra au Cnes de concentrer les ressources nouvelles pour faire face à la pression accrue sur la partie spatiale des missions nouvelles.

Les évolutions de l'organisation de la recherche qui sont en cours doivent permettre de mettre en œuvre efficacement cette politique par les actions suivantes.

Recommandation

Les moyens du Cnes doivent prendre en compte l'arrivée des nouvelles disciplines pour lesquelles les données spatiales sont essentielles, afin qu'il puisse assurer la part spécifiquement spatiale des missions correspondantes, l'exploitation et l'archivage de ces données pouvant être assurés partiellement par les agences spécialisées.

5.2 Évolution du secteur universitaire

Les grands regroupements universitaires ayant une forte composante spatiale peuvent afficher le spatial comme une de leurs priorités de recherche. La mise en œuvre de telles politiques passera principalement par le soutien aux plates-formes technologiques multimissions, qu'il s'agisse de centres techniques de réalisation, d'intégration et de tests des charges utiles ou de centres thématiques de traitement et d'archivage des données. Il est recommandé que ces pôles spatiaux se coordonnent pour désigner un représentant au sein de la CPU pour faire valoir leur point de vue dans le Comité inter-organismes organisé par le Cnes.

5.3 Évolution du CNRS

Dans la nouvelle structuration du CNRS en instituts, la recherche spatiale relève principalement de 4 instituts : Insu, IN2P3, INP et Insis. La structure en instituts s'accompagne d'un élargissement puisqu'ils assureront une fonction d'opérateur de recherche et une fonction d'agence de moyens pour des laboratoires extérieurs à l'institut. À l'intérieur du CNRS, cela conduit à des dotations

(en financement et en personnel) croisées entre ces instituts. Le spatial est certainement un des secteurs pour lequel cette évolution est très positive. Il est important que le CNRS utilise au mieux cette disposition pour optimiser la distribution des moyens liés à l'observation spatiale entre les laboratoires, acteurs principaux construisant des charges utiles de satellites, et ceux qui sont seulement utilisateurs de données spatiales. Des appels d'offres ouverts, spécialisés soit dans des recherches technologiques amont, soit dans l'exploitation des données sont un des outils qui permettront de renforcer la cohésion du domaine au sein du CNRS.

Conclusion : résumé final

Dans le cadre de la mission de production de connaissance, le spatial reste un outil privilégié pour mener des recherches d'excellence et pérenniser le leadership français dans ce secteur aussi bien pour les sciences de l'Univers que pour les sciences de la Terre.

Les sciences en microgravité liées aux infrastructures spatiales habitées dépendent à long terme des politiques qui seront définies par les puissances spatiales non européennes. La question des perspectives des disciplines concernées et des collaborations européennes ou françaises à ces vols habités devra être débattue quand ces politiques seront définies. Ce rapport ne les traite pas.

Recommandation

Étant donné l'enjeu de ces activités, ce rapport ne les traite pas et il serait judicieux qu'un groupe de travail s'en saisisse.

À l'issue de cette étude, un certain nombre de points importants sont confirmés :

- pour le futur, l'importance des données à utiliser par les scientifiques et la société, acquises par des moyens spatiaux, ne va cesser de croître ;
- les différents organismes français intéressés par l'utilisation du spatial (universités, CNRS, CEA, Inra, Ifremer, Météo-France, Cemagref, Cirad, IRD, BRGM, IGN) sont en pleine évolution stratégique, le Cnes lui-même évoluant dans ses modes de travail et son interaction avec les autres organismes ;

- la réflexion doit continuer, avec une focalisation sur la réorganisation des moyens de développement et de test des matériels embarqués, dont l'instrumentation complexe et performante reste toujours un moteur en matière d'innovation et de retombées pour l'industrie et la société ;
- le Comité inter-organismes devrait impulser ces nouvelles orientations en approfondissant les recommandations retenues, pour les traduire en plan d'actions opérationnel à mettre en œuvre rapidement.

This page intentionally left blank

EXECUTIVE SUMMARY

1 | Importance of data from space

Data from outer space is increasingly important to scientific fields, including the humanities and social sciences and the life sciences, in particular biology. Most activities in the Earth sciences are coupled to major societal issues and require the large-scale, homogenous observations over long periods of time, made possible by space observation, which has now become irreplaceable. The use of space data by scientific disciplines has widened, giving interdisciplinarity a greater role.

France and its scientific laboratories have played an important role in this field as a result of an ambitious national space policy that France has pursued unflinchingly for the last 50 years through its national space agency, the Centre d'études spatiales (Cnes).

2 | Structural changes in the organisation of space missions

The Cnes, mainly at its centre based in Toulouse, must continue to develop innovative sophisticated space instruments. Not all research laboratories have the technical means to build increasingly sophisticated space instruments and the industrial sector is reluctant to take on the risks associated with the development of such equipment. Moreover, some instruments are beyond the capacity of a single laboratory, even a well-equipped one, and would absorb too many technical resources, which would compromise participation in other projects. To overcome such difficulties, the creation of integrated groups that bring together the Cnes and research laboratories is recommended, some successful instances of which already exist.

In conclusion, the following actions should be systematically carried out for each mission:

- a study of task distribution optimisation and early examination during progress reviews that are held at the phase A stage of a project;
- contracts specifying the goals to be signed by research operators and funding institutions, that must be implemented during phase A;

- the creation of an inter-institutional steering committee bringing together all the signatories to follow the project throughout its life and to deal with unforeseen events as they appear.

3 | Adapting space means to changes in mission focus

The Cnes should be given the means to carry out the specific space functions it is responsible for, such as steering technological development for space, supervision and operation of national scientific missions as well as large instruments for international missions, laboratory funding for payload development, collection and processing of the data generated by missions, definition of future scientific directions of space research by discipline.

The French research funding agency, ANR, should create a fund for supporting programmes:

- research and development activities ahead of missions (*i.e.* not linked to a specific mission) to encourage technological contributions from cutting-edge groups not strongly involved in space research;
- scientific exploitation of data generated by large international space missions. Within such missions there is fierce competition and it is important to provide significant means in the years immediately following a launch (this is incompatible with the relatively constant recurrent funding of research, although a suitable funding pattern already exists for non-thematic programmes ("*programmes blancs*") and should be strengthened).

The organisation of regional coordination of space activities existing within or near recognised campuses of excellence would promote regular contact of all those involved, from the design of missions to their scientific exploitation, and would foster the emergence of world-class space research consortia. The consortia will bring together laboratories, shared technological facilities and theme-based consortia, engineering schools, the best research and academic institutions and the industrial sector. Organising and developing curricula in space sciences and the exploitation of space data should be an important part of the activity of these consortia.

At the national level, we suggest creating a national structure to bring together laboratories with large-scale integration and evaluation means (which should receive the TGIR large-scale research infrastructure label of the CNRS).

Some or all of these laboratories would come from the top tier space laboratories and would constitute an extension of the current French scientific group “GIS MoteSpace” based in the Île-de-France region. The National Institute for Earth Sciences and Astronomy (Insu) should commit as much as possible to maintaining the human resources for this facility.

The inter-agency structure for space research (*Comité inter-organismes de la Recherche Scientifique Spatiale*), which was set up by the Cnes, counts as its most prominent members the CEA and the CNRS and is open to other institutions. It perfectly covers the greater part of the structural requirements. It has been suggested that this group be given a role in coordinating the regional structures within the framework of university groupings (PRES), major campuses and the Conference of University Presidents (CPU).

Recommendation

The inter-agency committee (CIO) set up by the Cnes should review and specify the mission and role of regional interdisciplinary consortia within the future structure. The Toulouse region and the Saclay campus are the two biggest groups that should be reviewed. These groupings should act as intermediaries for new or potential groups of such users of space data.

The CIO should ask the CPU to designate a representative.

4 | High quality human resources, the key to perennial success

The recruitment and evaluation of researchers working on space mission payloads poses specific problems linked to the very long development periods of major space missions (15 to 20 years). We recommend focusing on this issue within national structures (CNRS, CNAP) when recruiting researchers.

In addition to the actions by Cnes groups, laboratories that are involved in the scientific coordination of big projects within Insu, CEA and Onera must maintain the ability to create systems groups covering the main specialities of space techniques.

Centres dedicated to data treatment and archiving that are staffed by the CEA and CNRS should receive additional personnel from the Cnes, which has a specific role in space sciences, and from universities and other user institutions. These centres must strive towards an optimal use of the tools developed by

computer scientists and mathematicians. Additionally, new problems will arise from the huge amount of data and the mathematical methods used to develop models and theories from these data. This will be a source of new problems for mathematicians that promote interdisciplinary and go beyond the established user relation that space research has towards mathematics.

5 | A significant change in space sciences participants

The context at the national and international levels is rapidly changing. The following recommendations should ensure that France stays competitive.

The widening of research fields that require space data has led to increasing number of user groups from an expanding number of research institutions. The Cnes therefore faces increasing pressures to fund and implement a greater number of missions. Furthermore, the quality of technological developments has been such that the actual operational durations of missions have become longer than the initially specified lifetimes, putting additional pressure on operational and exploitation resources.

Space remains a source of technical advances in many disciplines which in turn affect mission implementation. The increase in calculation power, algorithms and robotics needed for the flight and ground parts of a mission, as well as data analysis needs, can promote rapid changes in mission design. Progress can also have an impact on optimisation and task distribution between the ground and flight segments of certain functions of a space mission. Compromises have to be made for instance on the extent of in-flight autonomy or between reliability and cost, or in-flight data processing and ground transmission. All this must be taken into account when considering the changing trends in the expertise required for space research.

5.1 Evolution of the Cnes

We recommend that Cnes remains focused on supporting missions, in the form of financial support and technical staff contributions to the Toulouse space centre and the flight phases of space missions. Inter-agency relationships must be organised at the national level. For each mission, each agency responsible for the laboratories that will use the data should be asked to contribute resources early in a project, during the design phase, especially laboratories that are interested in the most downstream stages of scientific data exploitation. This will

allow the Cnes to use new resources to face the increased pressure on the space portion of new missions.

The current changes in the way research is organised will make it possible to implement such a policy through the following actions.

Recommendation

The resources of the Cnes must take into account the emergence of new disciplines for which space data are essential. It should earmark its funds for the space portion of missions and leave the responsibility of data exploitation and archiving to specialised agencies.

5.2 Evolution of the university system

The main university consortia that have a strong interest in space sciences will be able to designate space as one of their research priorities. The implementation of such policies will be mediated mainly through support for multi-mission technological facilities such as technical centres for building, integrating and testing of payloads and to centres dedicated to data processing and archiving. It is recommended that these space consortia designate a representative from the Conference of University Presidents (CPU) to defend their positions within the inter-agency committee organized by the Cnes.

5.3 Evolution of the CNRS

Within the new CNRS structure, 4 institutes carry out most of the space research: Insu, IN2P3, INP and Insis. This structure gives these institutes a wider role since they will be both the research and funding agencies for laboratories not belonging to these institutes. Within the CNRS, institutes will share and exchange funding and staff. Space is certainly one area where the change is very positive. It is important that the CNRS uses this organisation to the utmost in order to optimise fund distribution among laboratories dedicated to space observation that are the main builders of satellite payloads and those that only use data from space. Open calls for proposals specialised in upstream technological research or data exploitation are tools that encourage cohesion of the field within the CNRS.

Conclusion and final summary

From an academic viewpoint, space is an appropriate discipline for engaging in high-level research and maintaining French leadership in this field both within the Sciences of the Universe and Earth Sciences.

The science regarding the microgravity associated with inhabited space infrastructures depends on the long-term policies that will be defined by non-European space nations. Its future directions and European and French collaborations in manned flights will have to be debated once these policies have been defined. The present report does not treat such issues.

Recommendation

This report has not examined a number of aspects associated with space activities, but highly recommends that a workgroup reviews them.

This study has highlighted a number of important points:

- in the future, scientists and society will increasingly rely on data generated by outer space resources;
- the various French agencies interested by space data (universities, CNRS, CEA, Inra, Ifremer, Météo-France, Cemagref, Cirad, IRD, BRGM, IGN) are involved in structural changes and the Cnes itself is changing the way it works and interacts with other agencies;
- the review process must continue, with a special focus on reorganising the resources for developing and testing in-flight equipment, the highly sophisticated and powerful nature of which is a source of innovation and provides beneficial spin-offs to the industrial sector and society;
- the inter-agency committee should encourage these new policy orientations by following through on the present recommendations and translating them into operational plans of action to be rapidly implemented.

CHAPITRE 1

Le contexte général

This page intentionally left blank

La recherche spatiale prend une place grandissante dans de nombreuses disciplines qui s'étendent maintenant jusqu'aux sciences humaines. Le besoin d'observations spatiales est fort dans la recherche la plus fondamentale mais est aussi de plus en plus lié à des questions sociétales quand il s'agit d'observation de la Terre en liaison avec l'environnement et le développement durable. Le nombre d'organismes concernés augmente.

En 2005, un rapport l'Académie des sciences (*La recherche spatiale française*, Rapport sur la Science et la Technologie N° 22, 2006, EDP Sciences) avait souligné la bonne position des équipes françaises au niveau international, dans presque toutes les thématiques scientifiques. Ce résultat, très positif, était à mettre à l'actif de la politique ambitieuse suivie pendant 50 ans par les gouvernements français successifs et son agence spécialisée, le Centre national d'études spatiales. Ce même rapport avait également émis une série de recommandations afin, d'une part, de maintenir ce niveau de compétitivité dans les thèmes traditionnels et, d'autre part, de permettre aux nouvelles thématiques utilisatrices de l'espace d'utiliser au mieux la position de pointe de la France dans le secteur spatial.

L'évolution du dispositif de recherche en France, et en particulier le rôle nouveau attribué aux universités autonomes, rend nécessaire une réflexion sur l'organisation de la recherche spatiale.

Constatant que les recommandations émises en 2005 et publiées au début 2006 ont été confrontées au nouveau paysage, en évolution rapide, du contexte international mais aussi de la recherche publique en France, l'Insu/CNRS, le Cnes et le CEA (Direction des sciences de la matière) ont souhaité élaborer un rapport qui mette à jour l'état de l'organisation actuelle de la recherche spatiale et fasse des recommandations sur son évolution. Ce rapport est aussi, pour l'Académie des sciences, un rapport de suivi du rapport de 2005.

1 | L'importance croissante des observations spatiales

Dans le domaine des sciences de la Terre et dans l'étude des changements globaux et de leurs impacts, les moyens spatiaux ont apporté des capacités d'observation et de mesure de notre planète, globales, homogènes et couvrant de longues périodes temporelles. En synergie avec les mesures *in situ* et aéroportées (et les observations sous ballon, qui sont un complément indispensables aux expériences aéroportées pour les sondages stratosphériques), ils sont devenus des outils essentiels des sciences du système Terre (océan, atmosphère, surfaces continentales, terre solide) et constituent parfois des composantes essentielles de

systèmes opérationnels qui prennent une part croissante dans l'activité économique et les gouvernances nationales, européenne et mondiale (aménagement du territoire, agriculture, gestion des ressources, télédétection, météorologie, climatologie, surveillance des territoires et suivi d'alerte. . .). Ces activités opérationnelles ne sont pas à finalité scientifique mais les données acquises sont une source d'information précieuse et d'importance grandissante pour les scientifiques. Remarquons que certains de ces systèmes opérationnels ont une vocation duale et servent des objectifs de sécurité et de défense¹.

Assurer la continuité des données est nécessaire pour la compréhension du système Terre ; la demande par la communauté scientifique de missions récurrentes ou quasi récurrentes va s'accroître avec l'importance accordée par la société aux changements globaux.

Dans le domaine des sciences de l'Univers, nous cherchons à accroître la connaissance et la compréhension de l'origine et de l'évolution de l'Univers et des objets qui le constituent, galaxies, étoiles, planètes. L'astrophysicien combine des données issues d'observatoires spatiaux et non spatiaux, les premiers permettant d'observer le ciel dans des fenêtres de longueurs d'onde inaccessibles depuis le sol et en s'affranchissant des turbulences atmosphériques. Et bien entendu l'étude *in situ* des objets du Système solaire n'est possible que grâce aux sondes interplanétaires. Par ailleurs, de nouvelles technologies très pointues rendent possible l'utilisation de l'espace en tant que laboratoire scientifique, ouvrant un champ nouveau de recherches dans le domaine de la physique fondamentale qui, elles-mêmes, ouvrent de nouvelles applications. Enfin, notons que la « météo de l'espace », et en particulier l'observation et le suivi de l'activité solaire, devraient à terme aboutir à la mise en place d'un réel système opérationnel. Ces programmes, souvent à la pointe extrême des technologies disponibles, sont un puissant moteur d'innovation. En effet les missions scientifiques spatiales s'appuient en général sur des objets uniques, véhicules ou instruments, à la limite de la technologie, qui constituent un défi pour les laboratoires comme pour les industriels. Elles contribuent aussi à renforcer la coopération internationale et l'identité européenne.

Les projets scientifiques spatiaux, tant par leur volume financier (quelques dizaines à quelques centaines de millions d'euros) que par le nombre important de scientifiques qu'ils agrègent, directement (dans la conception des missions, le

¹ Les systèmes spatiaux à vocation militaire ont pris une très grande place aux États-Unis et en Union soviétique puis en Russie, depuis les années 1960/1970. En Europe, ces programmes ont été beaucoup plus tardifs et sont aujourd'hui limités, car développés aux niveaux de certains États membres, la convention de l'Agence spatiale européenne excluant ce type de programmes (cf. article 2 : « l'Agence a pour mission d'assurer et de développer, à des fins exclusivement pacifiques, la coopération entre États européens dans les domaines de la recherche et de la technologie spatiale et de leurs applications spatiales. . . »).

développement des instruments et leur étalonnage) ou indirectement (à travers l'exploitation des données spatiales), constituent de très grandes infrastructures de recherche (TGIR). Ils s'inscrivent presque toujours dans un contexte coopératif avec un financement multipartite et nécessitent un engagement pluriannuel tant pour la phase de définition et de développement que pour la phase d'exploitation. De ce fait, les projets, issus d'une évaluation rigoureuse, ont un caractère structurant, qui renforce la coopération européenne et internationale, et une grande visibilité.

Recommandation

L'importance des observations et des mesures à partir de l'espace va continuer à croître puisqu'elles jouent un rôle unique, tant pour la science (le propos de ce rapport), que pour les systèmes opérationnels toujours plus nombreux au service de la société, et pour les applications de sécurité et de défense. L'accès par les scientifiques à ces données de différentes sources, et les mécanismes associés pour les valider, constituent donc une nouvelle problématique critique, rapidement grandissante, tout particulièrement pour l'observation du système Terre. Il conviendrait que cette évolution soit prise en compte par les organismes concernés.

2 | Les évolutions en cours

Le paysage international relativement stable qui a prévalu pendant les vingt-cinq premières années de l'aventure spatiale (1958-1983), où les États-Unis et l'URSS dominaient complètement ces activités, l'Europe jouant un rôle de partenaire mineur, a laissé place à une situation en évolution importante et rapide. Au niveau technique, des tendances, voire des ruptures, se précisent ou s'affirment, de même que pour la genèse et le déroulement des projets. Enfin, l'organisation de la recherche en France change profondément.

2.1 Le contexte mondial

Même si le poids de l'agence spatiale américaine reste sans égal, de nouveaux acteurs sont apparus et, point remarquable, n'ont cessé d'augmenter leurs efforts au fil du temps, démontrant ainsi que les bénéfices retirés de ces investissements sont reconnus, quels que soient les systèmes politiques ou économiques.

Le Japon a tout d'abord développé son propre programme spatial sur toutes les thématiques. Aujourd'hui, il s'attache à proposer des missions scientifiques, soit complémentaires de celles des agences américaine et européenne, soit réalisées dans un cadre de coopération. De plus, le Japon investit actuellement lourdement dans des programmes de sécurité et de défense.

La Chine s'est intéressée plus tardivement à l'espace, mais sa vitesse de progression est fulgurante : en quelques années, elle est devenue capable de maîtriser tous les domaines techniques et programmatiques, et constitue pour toutes les autres agences un acteur majeur et un partenaire potentiel important.

L'Inde, Israël, le Brésil et la Corée ont des programmes spatiaux en croissance forte mais sont dépendants, à un titre ou à un autre, de pays étrangers pour un certain nombre de technologies clés.

La Russie, après une période très difficile liée à la fin de l'Union soviétique, réapparaît sur la scène internationale, la plupart du temps dans le cadre de coopérations ou collaborations internationales. Son rôle pour la desserte de la Station spatiale internationale (ISS) va accroître son importance dans le court et moyen terme.

La Nasa enfin, à défaut d'orientation claire à long terme, notamment pour les vols habités, vient de modifier profondément sa stratégie à court et moyen terme, en abandonnant son ambitieux programme Constellation de retour de l'homme sur la Lune, en décidant d'allonger l'exploitation de la Station spatiale internationale au moins jusqu'à 2020 et en accroissant l'effort mis sur les sciences spatiales (notamment les sciences de la Terre et du climat ainsi que l'exploration du Système solaire) et la R&D. Ces choix, couplés avec le contexte politique et économique, laissent à penser que les coopérations avec l'Europe pourraient être plus faciles.

La décision américaine déjà mentionnée ci-dessus concernant l'extension de l'exploitation de l'ISS lève les menaces pesant sur cette infrastructure, et relance la réflexion concernant l'utilisation des potentialités de l'ISS pour la science : certaines thématiques liées à la microgravité vont bénéficier de cette extension (physique des fluides, changements de phase, médecine, biologie, métrologie du temps. . .). Cette possibilité doit être exploitée au mieux pour des programmes scientifiques prioritaires.

NB. *L'extension de l'utilisation de la Station spatiale internationale ne résout pas la question d'une stratégie à long terme concernant les vols habités et sa justification ne peut pas être fondée sur sa seule utilité pour la recherche.*

Avec des acteurs plus nombreux et des aspects politiques lourds, le contexte de la recherche spatiale menée en coopération mondiale a changé. Cela conduit naturellement à une diversification des coopérations multilatérales.

Ces collaborations nouvelles devront être utilisées pour mettre en œuvre au mieux les priorités scientifiques, tout en restant vigilant sur les risques et les coûts. Quand les États-Unis auront redéfini leur stratégie à long terme dans le domaine des vols habités, il sera nécessaire de définir la position française dans ce domaine.

2.2 L'échelle européenne

La fondation en 1975 de l'Agence spatiale européenne (Esa) a constitué une étape fondamentale pour l'Europe. Depuis, cette agence a connu une longue série de succès, en particulier dans les sciences de l'Univers et l'observation de la Terre. Les programmes de l'Esa associés à ces thématiques constituent et continueront de constituer les éléments structurants de toutes les programmatiques européennes et nationales en ces domaines.

Une seconde étape vient d'être franchie avec la ratification du traité de Lisbonne : l'Union européenne se voit en effet conférer une compétence partagée avec ses États membres dans le domaine spatial et ce traité lui permet ainsi d'élaborer une véritable politique spatiale avec une vocation d'« acteur spatial global ». L'accord Commission européenne-Esa constitue l'un des outils devant permettre à l'Union européenne de jouer ce rôle de maître d'ouvrage, sans dupliquer les moyens existant au sein de l'Esa (ou des agences nationales et chez les industriels). À terme, la mise en œuvre des procédures de décision et de gestion communautaires classiques, qui diffèrent de celles de l'Esa, devrait intervenir pour les activités dont l'Union européenne est le maître d'ouvrage.

Dans ce contexte, la place de la France est historique (le Cnes a été créé en 1961), et particulière : elle a su coopérer très tôt avec l'Union soviétique et a été le leader du spatial en Europe, en particulier comme acteur principal du développement d'une capacité de lancement autonome. Aujourd'hui, on constate que trois agences spatiales dominent le paysage européen, aux côtés de l'Esa : celles de la France (le Cnes), de l'Allemagne (le DLR) et de l'Italie (l'ASI) mais seule la France avec le Cnes (et à un moindre degré l'Allemagne) possède l'ensemble des techniques et des compétences système permettant de maîtriser de bout en bout la réalisation d'un projet spatial complexe, de la conception à l'exploitation. À noter aussi les ambitions espagnoles, avec une nette montée en puissance, qui risque toutefois de s'infléchir du fait des difficultés économiques

rencontrées par ce pays, et la récente création d'une agence spatiale britannique qui devrait être à terme pourvue d'un budget propre. Même si l'essentiel de la mise en œuvre de la coopération européenne continuera à se faire dans le cadre Esa, cette évolution favorisera le développement de programmes en coopération multilatérale ciblés notamment sur des missions scientifiques.

Recommandation

En complément des activités nationales et multilatérales européennes focalisées sur les aspects scientifiques, le mouvement d'intégration et de pilotage vers le niveau européen communautaire est naturel et souhaitable pour la structuration des programmes opérationnels (GMES par exemple). Il doit être poursuivi à condition, évidemment, de mettre en place des règles de décision et de gestion efficaces entre les différents acteurs (Union européenne, États membres, Esa...) et dans un strict respect de la subsidiarité.

Le contexte lanceurs et infrastructure spatiale a également évolué, tant pour les lanceurs que pour les satellites, pour leurs segments sol et opérations associées et d'autres vecteurs comme les ballons. Il en est de même pour l'outil industriel.

Durant les prochaines années, l'Europe disposera, sur le port spatial de Kourou, d'une véritable panoplie de lancement, avec le lanceur lourd Ariane 5 puis son évolution de mi-vie Ariane 5 ME, le lanceur moyen Soyouz modernisé et le lanceur Vega. Cette gamme apporte une réponse presque complète au souhait exprimé dans le rapport de 2005 de disposer, pour les missions scientifiques, d'une hiérarchie de lanceurs permettant d'optimiser les coûts de lancement. Néanmoins, l'absence de lanceur européen dédié aux satellites de petite masse (≤ 300 kg) entraîne une contrainte sur les opportunités de lancement qui doit donc être prise en compte dans la définition des programmes. À long terme, il faut noter les premières réflexions menées sur un lanceur futur (rapport *L'enjeu d'une politique européenne de lanceurs : assurer durablement à l'Europe un accès autonome à l'espace* de B. Bigot, Y. d'Escatha et L. Collet-Billon) et suivre attentivement ses prolongements, en particulier vis-à-vis des capacités offertes pour les missions scientifiques.

La tendance à l'augmentation de la taille/masse/complexité/coût des satellites se poursuit pour certaines applications (télécommunications). À l'inverse, des projets comme Envisat et Metop regroupant un très grand nombre d'instruments d'observation de la Terre sur un même satellite ont été certes un succès mais apparaissent aujourd'hui comme une source de risque élevé et manquant de souplesse. La tendance est donc ici vers la répartition des instrumentations sur plusieurs satellites plus petits comme dans le cas de l'A-Train, grâce notamment

à la panoplie de lanceurs disponibles. Il faut noter cependant qu'aucune gamme en masse de satellite ne se dégage nettement pour les applications scientifiques.

Dans le domaine des sciences de l'Univers, la tendance que l'on perçoit est un degré de complexité en accroissement constant, induisant des coûts également croissants et la nécessité de coopérations, comme on peut le constater avec les premières missions présélectionnées pour le programme Cosmic Vision de l'Esa.

En ce qui concerne les segments sol, le principal enjeu est de permettre la prise en compte de volumes de données de plus en plus importants qui doivent être accessibles par une communauté d'utilisateurs géographiquement dispersée et hétérogène et qui doivent être conservés sur des périodes très longues. Une telle démarche devrait s'accompagner d'un effort de réduction des coûts (développement, maintenance et exploitation) par optimisation et mutualisation.

Un autre élément à considérer est l'outil industriel d'ingénierie, réalisation et test des modules de services (plates-formes) et d'intégration et test des satellites complets. L'industrie européenne a acquis depuis longtemps les technologies nécessaires pour la plupart des missions scientifiques en cours d'étude, à l'exception, déjà notée dans le rapport de 2005, de modules de production d'énergie nucléaire pour les missions lointaines vers l'extérieur du Système solaire. Il faut noter cependant qu'après une phase de regroupement industriel laissant de fait deux grands maîtres d'œuvre en Europe (EADS Astrium et Thales Alenia Space), on assiste à la montée en puissance d'un troisième acteur, OHB, pour le moment dans le domaine des télécommunications, de la navigation, de la sécurité/défense et de l'observation de la Terre à finalité météorologique, mais qui ne devrait pas tarder à se placer aussi dans le domaine des sciences spatiales, en particulier pour les missions en orbite basse, grâce par exemple à la réutilisation de la plate-forme développée pour Galileo. Par ailleurs, de nombreuses PME se sont impliquées dans le spatial venant ainsi renforcer le tissu industriel.

2.3 Le cadre français

Le cadre de la recherche spatiale en France évolue, en particulier avec celui de l'organisation de l'ensemble de la recherche/autonomie des universités, PRES, RTRA, pôles de compétitivité, politique des régions.

2.3.1 Le cadre programmatique

En se limitant ici au seul cadre français, les aspects de prospective proviennent de diverses sources, nationales, mais aussi largement internationales :

- l'Insu : la prospective en astronomie astrophysique pour la période 2010-2015 a été conduite durant l'année 2009 et les conclusions ont

- été finalisées par le colloque de La Londe-les-Maures en novembre 2009, la prospective en surfaces et interfaces continentales (SIC) pour la période 2008-2013 a été conduite durant l'année 2007 et les conclusions ont été finalisées par le colloque de Strasbourg en mars 2007, la prospective en Océan-Atmosphère (OA) pour la période 2006-2011 a été conduite durant l'année 2005 et les conclusions ont été finalisées par le colloque de Lille en novembre 2005. Enfin, la prospective en sciences de la Terre pour la période 2009-2014 a été conduite durant l'année 2008 et les conclusions ont été finalisées par le colloque d'Aussois (octobre 2008) ;
- le Cnes, avec les séminaires de Biarritz (mars 2009 : Étude et exploration de l'Univers, sciences de la Terre, sciences de la vie et de la matière), de Paris (Exploration, octobre 2007), de Pau (Ballons, septembre 2008) ;
 - l'Agence spatiale européenne, dans son plan Cosmic Vision pour le programme obligatoire, le programme Aurora pour l'exploration robotique du Système solaire, les programmes Earth Explorer et Earth Watch ;
 - l'European Science Foundation, notamment son rapport de 2007 *A science driven exploration programme* ;
 - la Commission européenne, avec le programme GMES et le 7^e programme cadre puis le 8^e en cours de genèse ;
 - le réseau Européen (Eranet) Astronet pour les sciences de l'Univers ;
 - Eumetsat, opérateur de système opérationnel fournissant en continu des données sur le temps et le climat ainsi que les produits associés tels que ceux concernant l'atmosphère ;
 - les autres agences spatiales nationales (Nasa, Jaxa, CSA, ISRO. . .) offrant des opportunités soit de missions en coopération, soit d'embarquement d'instruments français ;
 - les decadal surveys US ;
 - le séminaire du réseau de télédétection de l'Inra de Bordeaux (22-24 mai 2007).

Tous ces exercices de prospective mettent en avant la complémentarité entre les observations spatiales et les observations au sol. Cela est vrai depuis longtemps en observation de la Terre, et apparaît de plus en plus nécessaire en sciences de l'Univers (suivi des sursauts gamma, détection des exoplanètes. . .).

Recommandation

Le cadre programmatique des sciences spatiales doit être élaboré par discipline en même temps que la programmation de leur composante sol. C'est ce qui a commencé à se faire et qui doit être pérennisé.

2.3.2 Les infrastructures spatiales nationales

Les infrastructures spatiales sont aujourd'hui principalement européennes. Cependant pour les mini- et micro-satellites, les filières nationales ont joué un rôle important. La question de la suite des filières Myriade et Proteus du Cnes est en cours d'analyse avec l'évolution Myriades vers une gamme 200 kg et pour les mini-satellites, une gamme de satellites entre 400 et 1 200 kg au travers de l'initiative Isis visant entre autres à standardiser les servitudes ainsi que les interfaces charges utiles.

Connexes aux satellites, les ballons stratosphériques représentent pour la communauté nationale une opportunité essentielle dans le dispositif de la recherche spatiale. Les ballons permettent de tester les technologies nouvelles dans un environnement assez représentatif de l'espace pour un coût bien moindre. De plus, les ballons permettent d'obtenir des résultats scientifiques qui peuvent être très compétitifs dans des délais beaucoup plus courts qu'une expérience sur satellite, malgré des temps d'observation courts et les limitations associées à l'atmosphère résiduelle. Enfin, le rôle de formation et d'attraction de jeunes chercheurs vers la recherche spatiale est très important en particulier par la rapidité du retour scientifique en deux ou trois ans, alors que le délai peut être de 10 à 20 ans pour les expériences sur satellites.

Les coûts des infrastructures ballon sont élevés et celles-ci doivent être utilisées efficacement par une mutualisation internationale quand elle est possible.

Recommandation

Il est indispensable de maintenir une filière ballon qui est un outil pour le développement des technologies nouvelles et pour le renouvellement des équipes de recherche spatiale. La collaboration internationale est une voie qui peut permettre d'optimiser l'utilisation et les coûts de l'infrastructure ballon (qui a été utilisée pour les vols de longues durées).

2.3.3 Le contexte national d'organisation de la recherche spatiale

Le programme scientifique du Cnes s'oriente vers des missions nationales moins nombreuses mais plus de missions en coopération et de participations d'opportunité sur des missions étrangères, en assurant bien sûr le socle fondamental que représentent nos participations instrumentales aux missions Esa.

Par le passé, principalement au sein des laboratoires spatiaux mis en place par le Cnes dans les années 1960, les missions pouvaient être étudiées, les instruments développés et calibrés, les données exploitées dans un même laboratoire, en particulier en sciences de l'Univers (en sciences de la Terre, la partie développement se faisant plutôt dans l'industrie). Cette situation, permettant de maîtriser toute la chaîne, de l'idée de mission à l'exploitation des données, est clairement en cours d'évolution, compte tenu de :

- raisons internes (sociologie des laboratoires, nombre et profils variés de laboratoires impliqués dans un projet. . .) ;
- raisons externes (complexité des instrumentations et/ou de l'exploitation des données, nouvelles thématiques exigeant de nouvelles compétences, contexte international. . .) ;
- l'élargissement rapide de la communauté des utilisateurs scientifiques de données spatiales ;
- l'accroissement des coûts.

En amont, la conception de missions spatiales visant à apporter des éléments de réponse à de grandes questions scientifiques relève des équipes scientifiques. Ces équipes sont intégrées dans des laboratoires faisant partie eux-mêmes de regroupements universitaires existant ou en cours de constitution (PRES, grands campus, RTRA, GIS). Elles contribuent toutes à la définition des missions et à leur exploitation scientifique sans pour autant avoir forcément des compétences en ingénierie spatiale ou en traitement massif de données. Les regroupements universitaires permettent d'associer un ensemble de compétences scientifiques larges à côté de laboratoires ayant ces compétences techniques et servant un large ensemble d'utilisateurs.

Au sein des laboratoires spécialisés dans le spatial, au-delà de l'expertise scientifique, des compétences en ingénierie sont indispensables pour concevoir des charges utiles, évaluer leur faisabilité technique, leurs performances scientifiques, les ressources et performances exigées du module de service et enfin évaluer un ordre de grandeur de coût et de durée de développement.

Les équipes ainsi constituées (éventuellement pluri-organismes) sont indispensables comme intermédiaires entre les laboratoires, les agences spatiales et les industriels, même lorsque la maîtrise d'œuvre est à l'extérieur des laboratoires.

En ce qui concerne les segments sol, on constate aujourd'hui encore une très grande hétérogénéité ; une réflexion doit être menée pour définir des outils permettant de mettre en place des phases d'exploitation optimisées au service de la recherche. Le premier axe d'évolution consiste à mettre en place des centres thématiques multi-missions permettant notamment de mutualiser les infrastructures matérielles et logicielles coûteuses et les équipes compétentes associées. Le second axe vise à implémenter les services standards d'accès aux données issus des recommandations internationales afin de garantir l'inter-accessibilité des données. Le troisième axe a pour ambition de développer des produits génériques de segments sol de contrôle sur le modèle des filières de centre de contrôle Myriade/Proteus ou Spot/Helios qui ont prouvé leur efficacité opérationnelle et économique. Une première étape est en cours dans le domaine de la pérennisation des données à long terme.

Cet effort est d'autant plus nécessaire que le nombre de missions en phase d'opération et d'exploitation est élevé et ne cesse de croître. Ceci se traduit par un besoin de ressources accru pour l'exploitation, qui ne doit pas être perçu au détriment du développement de nouvelles missions. Par ailleurs, les nouveaux partenaires liés à l'élargissement de l'utilisation des données spatiales pourront apporter des ressources supplémentaires. Ils devront être associés à la définition et l'exploitation des missions au plus tôt.

Au niveau national, la constitution de plusieurs pôles spatiaux, regroupements régionaux de ces compétences en recherche spatiale mutualisées et servant un ensemble de laboratoires de profils différents, est en cours de discussion. Deux pôles en province (Sud-Est et Sud-Ouest) et deux en Île-de-France (campus Saclay et campus Tolbiac) semblent une configuration optimale. Ces regroupements doivent rester des structures de coordination n'ayant pas de fonction exécutive.

Il est à noter qu'il existe une très grande concentration en Île-de-France et notamment autour du plateau de Saclay, de très grands laboratoires spatiaux, habitués au développement des charges utiles des missions satellitaires et/ou à la mise en œuvre de leurs segments sol ; dans cette situation, qui représente une opportunité rare pour marier études fondamentales et développements technologiques de pointe en lien avec l'industrie, la création d'ensembles organisés de laboratoires experts dans l'instrumentation spatiale est à implémenter de façon prioritaire.

En réponse aux orientations de la SNRI, les différents organismes hébergeant des laboratoires dans la zone et la périphérie du Plateau de Saclay² ont entamé une réflexion stratégique commune visant à promouvoir les capacités de recherche et les savoirs technologiques de ces laboratoires, notamment en matière d'instrumentation et d'observation spatiales. Cette démarche rendra l'activité spatiale plus visible encore au niveau européen et mondial.

Ces pôles spatiaux au sein de campus regroupant des universités et des grandes écoles sont le niveau où définir et développer des filières de formation spécialisées dans le spatial, que ce soit les ingénieurs, les chercheurs instrumentalistes ou les spécialistes du traitement et de l'archivage des données. Une relation forte avec le monde industriel est nécessaire pour définir ces filières.

Recommandation

Le Comité inter-organismes mis en place par le Cnes doit organiser, évaluer et labéliser ces pôles et les plates-formes technologiques en leur sein.

2.4 Le rôle des laboratoires

Il convient donc de savoir comment organiser des réseaux de laboratoires et leur interaction avec le Cnes permettant la meilleure utilisation des compétences.

La notion de laboratoire spatiaux sélectionnés par le Cnes nécessite une adaptation dans un contexte où les laboratoire impliqués forment un continuum de distribution des tâches tout au long de la chaîne allant de la conception des missions à l'utilisation des données complètement traitées en passant par toutes les phases de construction et d'opérations. Ils doivent se transformer en plates-formes technologiques servant un cercle élargi de laboratoires. Seules les plates-formes technologiques organisant les moyens les plus lourds doivent être organisées au niveau européen ou national (simulateurs spatiaux lourds, archivage et pérennisation des données sur le long terme).

L'organisation régionale sera particulièrement utile pour coordonner les participations entre laboratoires spatiaux et nouvelles équipes utilisatrices de données. C'est donc au niveau des structures universitaires nouvelles (PRES, grands campus) qu'il faut organiser les pôles spatiaux.

²Universités Versailles-Saint-Quentin, Paris XI, grandes écoles, Onera, CNRS-Insu, CNRS-IN2P3, CNRS-INP.

Recommandation

Des plates-formes technologiques multilaboratoires doivent être créées pour la réalisation des charges utiles et pour les segments sol des missions, celles-ci fédérant les activités à caractère spatial et pouvant offrir des services à un ensemble d'utilisateurs. Ces plates-formes pourraient être constituées sur une base régionale, une coordination nationale étant nécessaire.

En milieu et fin de développement, la réalisation et les tests fonctionnels/étalonnages scientifiques des charges utiles (ou de parties de celles-ci) sont menés selon plusieurs modèles, qui dépendent des thématiques et de chaque mission :

- maîtrise d'œuvre par un grand laboratoire spatial sur le modèle de ceux créés par le Cnes ; sous-systèmes réalisés dans l'industrie (pouvant être sous la responsabilité d'équipes scientifiques extérieures) ; intégration dans le laboratoire maître d'œuvre ou dans l'industrie, tests et étalonnage dans un laboratoire et livraison à l'intégrateur du satellite ;
- maîtrise d'œuvre par un consortium Cnes-laboratoires avec une distribution des autres tâches semblable au cas précédent ;
- maîtrise d'œuvre par un industriel sur spécifications de l'agence spatiale maître d'ouvrage, basées sur le concept défini avec les scientifiques : modèle plus adapté à des missions représentant des sauts technologiques limités ou conduisant à des missions plus ou moins récurrentes. C'est le cas de certaines missions (par exemple Microscope, Pharao) qui ne sont pas adossées à un laboratoire spatial.

En aval, les opérations en vol liées aux satellites et au suivi/pilotage des instruments sont le plus souvent du ressort des agences spatiales maîtres d'ouvrage. Pour le contrôle des instruments sophistiqués, il est parfois préféré de faire intervenir les équipes les ayant construits et/ou calibrés.

Pour ce qui est du traitement des données scientifiques, plusieurs niveaux sont en général identifiés (figure 1.1) :

- le premier niveau consiste à recevoir la télémétrie (TM) puis à introduire les données telles qu'elles sont produites à bord par les instruments dans une infrastructure informatique (bases de données, sécurisation, archivage de premier niveau, traçabilité) dans laquelle le traitement sera fait par

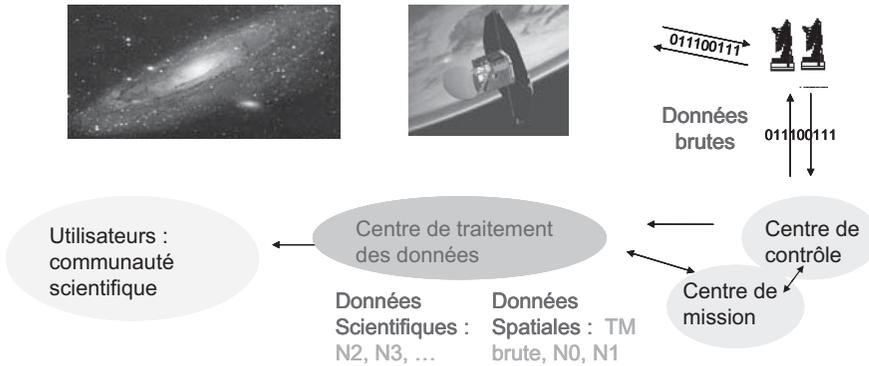


Figure 1.1

Niveaux de traitement des données scientifiques.

différents spécialistes. Il est plutôt du ressort des agences spatiales qui disposent de moyens lourds et mutualisés entre plusieurs missions ;

- le deuxième niveau est la réduction des données pour transformer les données brutes en données étalonnées corrigées des effets instrumentaux et dont on a déterminé le degré de fiabilité. Intervient ensuite leur mise à disposition auprès de la communauté scientifique utilisatrice ; ces données sont en général traitées d'abord par les agences spatiales ou les laboratoires proches de l'instrument avant d'être éventuellement transmises dans un pôle thématique qui traite, archive et distribue les données de cette thématique, optimisant ainsi les aspects communs et l'utilisation des ressources ;
- le troisième niveau est celui de l'analyse scientifique de ces données avec un lien de plus en plus étroit avec la modélisation par simulation numérique : extraction des paramètres physiques du système observé, confrontation à des modèles, application de méthodes mathématiques d'évaluation de la vraisemblance d'un modèle ou d'une valeur d'un paramètre : nécessairement un travail confié aux équipes scientifiques.

Selon les thématiques, leur degré de maturité dans le spatial, la difficulté et la nouveauté des techniques à mettre en œuvre, ces différents modèles généraux et leurs variantes peuvent être plus ou moins adaptés. Ils seront donc discutés par thématique dans les chapitres suivants. Il n'en reste pas moins que les équipes scientifiques doivent intervenir en priorité dans les phases les plus en amont et en aval. Certaines réalisations industrielles spécifiques (par exemple détecteurs très complexes) peuvent néanmoins nécessiter un suivi rapproché et une forte interaction avec une équipe scientifique.

Un fait remarquable est que l'augmentation rapide du nombre d'utilisateurs scientifiques de données spatiales dans des thématiques plus nombreuses, et la complexification des instruments et de leurs traitements, font apparaître aussi une nouvelle classe de laboratoires dont l'activité spatiale est uniquement concentrée sur l'aval (exploitation des données).

This page intentionally left blank

CHAPITRE 2

Sciences du système Terre

This page intentionally left blank

La structure et le fonctionnement du système Terre demeurent des enjeux de recherche majeurs en raison de nos limitations importantes dans la compréhension de certains mécanismes agissant au sein des différentes enveloppes (fluides et solides). Les interfaces entre ces enveloppes, et leur importance relative, en particulier celle avec la biosphère restent certainement, en raison de leur complexité, un axe de recherche à développer.

Ces limitations réduisent la capacité à prévoir l'évolution de notre environnement, même à des échéances de temps relativement courtes comme celles de la demande sociétale. Le développement de la recherche fondamentale dans ce domaine est essentiel.

1 | Accroître les connaissances : continuité des données et nouveaux observables

Mieux comprendre le fonctionnement du système Terre suppose évidemment de mieux décrire les processus mal compris ou mal quantifiés, de mieux cerner les paramètres clés en augmentant la gamme des résolutions spatiales et temporelles auxquelles ils sont observés ou en accédant à de nouveaux observables à fort niveau de contrainte. De nouvelles méthodologies doivent être développées pour cela, ce qui suppose le maintien à un haut niveau des activités de recherche et développement. Sur elles reposent les potentiels d'innovation scientifique et technique et donc notre capacité à réaliser les (ou à participer aux) grandes missions spatiales de demain.

Par ailleurs, de par sa dynamique naturelle mais également en raison des perturbations induites par les activités humaines, de nombreuses composantes du système terrestre montrent des évolutions quantifiables à l'échelle de quelques décennies. Il est donc indispensable d'effectuer des observations régulières ou continues sur des périodes pluridécennales. Ces observations ne peuvent évidemment être conduites que pour quelques paramètres bien choisis, fortement indicateurs de l'état de la planète (niveau de la mer, champ de gravité, couleur de la mer, extension de la glace de mer, salinité, contenu atmosphérique en gaz à effet de serre, champ magnétique, occupation des sols, état de la végétation, humidité des surfaces continentales. . .).

Recommandation 1

Il faudra veiller à l'implication croissante des biologistes dans la préparation des missions pour définir les nouveaux observables et dans l'analyse et l'utilisation des données. Le rôle croissant de la biosphère dans les

interfaces nécessite de développer des approches interdisciplinaires des interfaces concernées.

Il faut souligner que cette continuité des mesures, pour être pertinente, implique d'y associer des capacités importantes d'archivage, d'inter-étalonnage, de contrôle qualité et de ré-analyse des séries d'observations. Enfin, la continuité des observations de qualité et validées implique aussi d'innover dans la réduction des coûts et dans l'ingénierie de l'organisation.

Recommandation 2

Une spécificité forte de l'observation de la Terre, tant pour sa composante spatiale qu'*in situ*, réside dans la complémentarité entre innovation scientifique et instrumentale et continuité observationnelle, qui ne doivent surtout pas être mises en concurrence.

2 | Répondre à une demande sociétale forte

La demande sociétale en observation de la Terre couvre des domaines très variés, imposant parfois des contraintes quasi opérationnelles. C'est par exemple le cas des aléas (volcaniques, sismiques, météorologiques) pour lesquels sont attendues à la fois des capacités de prédiction mais également de l'aide à la gestion des situations d'urgence ou de crise. Par ailleurs, il y a également une demande visant à mettre en place des systèmes d'information environnementale pour gérer au mieux les milieux face aux pollutions ou par rapport à la disponibilité des ressources (eau, alimentation, énergie. . .). Ces systèmes d'information environnementale reposent en partie (et sans doute de plus en plus dans un futur proche) sur l'observation spatiale. Les « services » associés à ces systèmes d'information demandent de l'innovation en amont, une continuité des observations et la mise en place d'un opérateur de service.

Aujourd'hui se mettent en place des programmes (GMES) ou des organes de coordination (Geoss. . .), au niveau européen et international, visant à faciliter l'émergence de ces services et la mise en place de production opérationnelle de cette information environnementale. Néanmoins, concrètement, ce passage vers les services se fait à un niveau très variable selon les communautés (acquis en météo, en transition en océanographie et pour la composition de l'atmosphère, naissant dans d'autres domaines).

Recommandation 1

La mise en place à l'échelle européenne des nouveaux programmes mettant en œuvre les missions opérationnelles doit rester une priorité pour les gouvernements.

Recommandation 2

Les laboratoires de recherche doivent intervenir en amont au niveau de l'amélioration des systèmes d'information et au niveau de l'expertise scientifique nécessaire pour spécifier la qualité des produits, y compris en phase opérationnelle. Ils doivent spécifier en particulier le besoin de la partie recherche pouvant être rempli par ces phases opérationnelles.

L'acteur « recherche » doit également intervenir en aval en tant qu'utilisateur pour s'assurer de la qualité de ces services.

Les retours d'expérience dans ce domaine (Spot Image, Mercator) montrent que les premières phases des cycles opérationnels nécessitent des durées de l'ordre de vingt ans après que l'opérateur correspondant a été identifié et progressivement mis en place. Il convient de garder cet ordre de grandeur à l'esprit pour définir les engagements respectifs du Cnes et des organismes participants dans les phases de démarrage et surtout de transition opérationnelle des activités.

3 | Les observations spatiales et *in situ* : deux composantes complémentaires

Sur Terre, l'observation *in situ* en surface, en fond de mer et dans l'atmosphère (grâce en particulier aux ballons instrumentés, cette activité relevant du secteur spatial) est possible. Néanmoins, les observations spatiales donnent accès à une vision différente de celle fournie par les mesures *in situ* pour certains observables, en termes d'échelles, de précision et de résolution. Ces deux types d'observation sont donc complémentaires.

L'observation *in situ* est très souvent organisée en réseaux ou en campagnes, le plus fréquemment internationaux. Certaines de ces données *in situ*, nécessairement discrètes spatialement, sont ensuite, en combinaison avec les données

spatiales, analysées ou assimilées dans des modèles pour produire une information spatialement et temporellement homogène. Cependant, ces démarches demeurent encore trop peu fréquentes et limitées à quelques domaines dans lesquels soit la dimension opérationnelle des services (la météorologie en est un bon exemple), soit le questionnement scientifique associé (le champ magnétique par exemple) ont favorisé cette intégration des sources de données. Des systèmes de même nature sont aujourd'hui en train de se mettre en place pour l'environnement et les risques. La communauté française a de nombreux atouts en ce domaine : elle a été précurseur au niveau européen dans la mise en place de services d'observations comme ceux de l'Insu, de réseaux de surveillance de la qualité de l'air et de l'eau, de réseaux de surveillance des risques volcaniques et sismiques ; elle a joué un rôle majeur dans le développement de l'observation spatiale avec des outils innovants de grande qualité comme l'altimétrie, la gravimétrie ou la filière Spot. Enfin, la communauté nationale a été très en avance dans le développement de systèmes opérationnels couplant les divers systèmes d'observations avec des modèles numériques, par exemple en océanographie (Mercator) ou en sciences de l'atmosphère (Prev'air).

La mise en place ces dernières années de **pôles thématiques** dans certains domaines s'est avérée également très bénéfique pour les communautés de recherche concernées. Ces pôles ont fortement amélioré la validation, l'archivage, l'assimilation et la diffusion des données de nombreuses missions spatiales, voire de campagnes de terrain s'y rattachant. La mise à disposition de produits à valeur ajoutée (multicapteurs, logiciels de traitement, outils d'interpolation, de géopositionnement. . .) a également favorisé l'accès aux données issues de l'observation spatiale.

Recommandation 1

Les diverses perspectives scientifiques nationales ont toutes fait ressortir des demandes visant à la création de nouveaux pôles thématiques. Compte tenu du succès indéniable de ces structures, nous recommandons également que des pôles thématiques soient mis en place de façon à couvrir la totalité des champs disciplinaires des sciences de la planète Terre.

La mise en place (il y a près de 15 ans) des premiers pôles thématiques a été dépendante des thématiques et des communautés associées mais aussi de l'implication de divers organismes ou institutions (régions). Cependant, il faut noter qu'à l'époque un tel dispositif a été mis en place dans un objectif essentiellement national, l'Europe n'ayant pas encore alors la dimension qu'elle a acquise depuis sur le traitement et la diffusion des données.

Pour ces structures, il est important de souligner l'évolution rapide et significative du contexte, tant au niveau national dans les besoins et les approches qu'aux niveaux européen et international.

On note la mise en place des infrastructures de recherche de l'Union européenne et du programme GMES qui visent une distribution européenne des activités, comme la montée en puissance d'Eumetsat et de son approche Satellite Application Facility (SAF) proche de la logique de pôles thématiques, mais à vocation opérationnelle.

Recommandation 2

Une réflexion visant à positionner les pôles thématiques et leur devenir au sein du contexte européen voire mondial doit être menée rapidement, sur la base d'un dialogue entre partenaires européens.

Cette réflexion devra aussi traiter des structures adéquates pour ces pôles thématiques en termes de statut, fonction, moyens, ressources pour participer et assurer la pérennisation des services (et donc des sources de données qui y concourent), si nécessaire aux besoins de « temps réel » et à la fiabilité des centres de données.

Recommandation 3

Pour capitaliser sur ces réussites indiscutables, il conviendrait que soit définie plus précisément la forme que doit prendre la contribution française aux systèmes européens et mondiaux d'observation de la Terre et de gestion de l'environnement. Cette contribution doit naturellement être basée sur des critères de subsidiarité et de non-duplication des fonctions. Au niveau national, cette contribution doit être consolidée au travers d'accords de partenariats formels entre organismes.

Par ailleurs, pour jouer pleinement leur rôle dans le développement de ces observatoires, les équipes françaises doivent participer à la définition des systèmes à même de combiner les diverses sources d'information. Il y a là une responsabilité sociétale (celle qui consiste à élaborer les informations les plus pertinentes pour aider les décideurs publics à gérer de façon optimisée, si ce

n'est optimale, l'environnement et les ressources non renouvelables). Cette responsabilité nécessite de traiter l'ensemble du problème de l'observation pour les questions sociétales, et pas seulement la dimension scientifique.

4 | Les missions spatiales et leurs spécificités

On peut schématiquement classer les missions d'observation en deux catégories :

- **les missions à caractère *a priori* unique**, pour lesquelles le besoin de continuité n'est pas identifié. Il s'agit par exemple d'un système spatial pour l'analyse d'un processus particulier, la détermination d'un observable relativement stable, ou encore de la mise au point d'une technique de mesure innovante. Ces missions de recherche sont à définir, décider et financer selon des processus de type R&D, dans la mesure où elles impliquent une prise de risque technique et/ou scientifique, et où il n'est pas *a priori* nécessaire de pérenniser ces observations au-delà de la durée de vie de la mission considérée ;
- **les missions préparant ou assurant une continuité d'observation**. Il s'agit dans ce cas d'assurer sur le long terme la mesure d'un paramètre important du système Terre et de son évolution, dans une logique proche de celle prévalant dans un observatoire sur une durée longue. Puisque l'observation continue de ce paramètre exige une série de missions spatiales, il est nécessaire de prendre en compte ce besoin de continuité et de penser la mise en place d'une **filière** dès le premier satellite. On distingue ainsi **trois phases** dans le cycle de ce type de missions, pour lesquelles les montages techniques et institutionnels pourront différer, même s'il s'agit de la mesure du même paramètre physique selon la même technique : la phase 1 correspond à un **démonstrateur**, destiné à qualifier les techniques et à valider les performances de mesure. L'innovation et le risque technique associé sont *a priori* importants, et les services aval d'exploitation des nouvelles observations sont encore à créer. Le financement de ces missions provient donc majoritairement de budgets R&D, de façon analogue aux missions « uniques ». Entre par exemple dans cette catégorie la mission SMOS, qui vise à démontrer la capacité de mesurer l'humidité des sols et la salinité des océans, deux variables clés pour une modélisation précise de la météorologie et du climat. La phase 2 correspond au **premier exemplaire d'une série**. Ici la technique de mesure et le traitement du signal ont déjà été validés. Il s'agit d'optimiser et d'assembler pour la première fois dans un contexte opérationnel les composants spatiaux ainsi que les systèmes de réception, de traitement et de distribution des données et informations.

Cela nécessite généralement un certain nombre de nouvelles études afin de garantir la disponibilité et la qualité des données répondant aux besoins des services opérationnels qui en feront usage. Comme le risque technique associé à ces développements est variable, le financement de ces missions peut éventuellement mixer des budgets R&D et opérationnels, répartis en fonction du niveau de risque résiduel. Par exemple, le premier l'instrument IASI sur un satellite polaire météorologique d'Eumetsat, ou les premiers satellites « Sentinelles GMES » relèvent de cette phase 2. La phase 3 correspond à la **récurrence opérationnelle** de la série démarrée en phase 2. La composante spatiale est constituée d'une série de capteurs qui évoluent peu. Les chaînes de traitement sol assurent la continuité de fourniture des produits dérivés des capteurs spatiaux. Le risque technique associé à ces missions est faible, puisqu'il ne s'agit que d'assembler des éléments existants du système spatial, et que les services opérationnels ont déjà développé la capacité à exploiter les données. Le financement de ces missions doit se faire en quasi-totalité au travers de budgets provenant des entités utilisatrices ou représentant les utilisateurs privés ou publics. Les exemples de missions en phase 3 sont les instruments météorologiques récurrents ou la seconde série des Sentinelles GMES. Dans un schéma idéal, les phases 2 et 3 sont traitées de façon simultanée, permettant ainsi une optimisation des décisions, des investissements et des approvisionnements (voir les programmes de météo). La principale difficulté concerne le financement des missions récurrentes dont la vocation est principalement l'acquisition pour les besoins de la recherche de données continues sur des paramètres à évolution lente, pour lesquels il est difficile d'identifier aujourd'hui l'opérateur en charge.

Ce cycle opérationnel en trois phases permet de couvrir un besoin d'observation sur une durée de l'ordre de vingt ans dans les meilleures conditions possibles : la continuité des observations sur une série de 3 ou 4 satellites est garantie, la mise en place de services aval pérennes est facilitée, le risque technique est minimisé, et les processus d'approvisionnement particuliers pour des éléments du système spatial peuvent être optimisés.

Comme tout schéma de principe, cette notion de cycle peut être adaptée en fonction de cas particuliers et doit être interprétée avec souplesse.

En particulier, il faut rappeler que certains observables nécessitent d'être mesurés dans la durée pour des finalités scientifiques, sans que se dessine, du moins à court terme, une perspective d'application opérationnelle. C'est le cas par exemple du suivi temporel de la mesure du champ magnétique. Pour ces cas où la phase 3 ne peut être mise en œuvre, il est indispensable que le besoin de la continuité de la mesure soit assuré dans un contexte de coopération élargie.

Une autre spécificité de l'observation de la Terre est qu'une thématique peut également reposer sur des produits dérivés de missions non dédiées à cette thématique (exemple radio-occultation, GPS). Ceci suppose une certaine adaptabilité des laboratoires et des agences.

Enfin, certaines missions ont clairement une dualité civile-militaire, aussi bien par l'utilisation de données civiles à des fins de missions défense (par exemple l'océanographie opérationnelle) que dans le sens inverse par l'accès à des données de défense pour des missions de recherche (par exemple l'imagerie à haute résolution spatiale).

On peut en particulier noter que le Livre blanc sur la Défense et la Sécurité nationale (juin 2007) mentionne la nécessité d'une « démarche d'ensemble, aux niveaux national et européen, [...] pour structurer la capacité globale de collecte et d'emploi [des données géographiques numériques, [...] hydrographiques et océanographiques, et [...] météorologiques] dans les systèmes d'armes ».

À ce sujet, la recherche de synergies entre les programmes civils et militaires est un axe de travail au niveau national de l'équipe défense Cnes-DGA-EMA, et au niveau européen de la Commission européenne et de l'Agence européenne de défense.

Il est parfois difficile pour les communautés de recherche d'accéder à certaines données collectées par les missions de défense et qui pourraient pourtant avoir un grand intérêt pour l'observation de la Terre. Il s'agit de difficultés en termes de coût, de priorité de planification et de confidentialité « Défense ». Nous souhaitons en particulier que des mécanismes de déclassification prenant en compte les intérêts des scientifiques comme des divers partenaires soient mis en place pour pouvoir surmonter ces difficultés.

Recommandation

Une réflexion pour une prise en compte des besoins de la communauté de recherche dans les programmes spatiaux militaires et réciproquement pour une valorisation de l'utilisation des données civiles au profit des missions de défense devrait être menée, en particulier, au sein de l'équipe défense du Cnes via une interface de dialogue formalisée avec le Tosca.

5 | Un partage public/privé fort en observation de la Terre (OT)

L'usage sociétal des données d'observation de la Terre, les spécificités des missions traduites au travers des différentes phases de mise en place opérationnelle, associées au caractère souvent récurrent des missions « observation de la Terre » qui induisent l'existence de filières, la déclinaison vers des applications spatiales et les éventuels marchés associés, explique la présence forte de l'industrie ou des acteurs privés dans le thème observation de la Terre.

Un bon élément d'illustration est la répartition des budgets de R&T du Cnes respectivement pour les activités en observation de la Terre et en science de l'Univers : ainsi, en observation de la Terre, la composante « laboratoires » n'atteint que 30 % alors qu'elle représente 95 % en sciences de l'Univers (*cf. infra*).

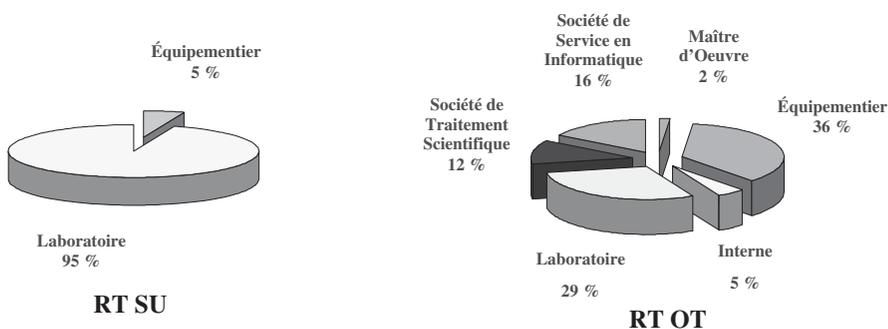


Figure 2.1
Répartition des budgets R&T pour les activités sciences de l'Univers (SU) et observation de la terre (OT).

En observation de la Terre, le positionnement des laboratoires spatiaux est moins fort sur les développements instrumentaux que chez leurs homologues des sciences de l'Univers, et plus axé sur l'utilisation des données.

En effet, l'aspect sociétal des applications de l'observation de la Terre permet l'émergence d'un véritable marché sur certains domaines. Se pose donc la question des partenariats public/privé (PPP) ou celle liée à l'apparition d'initiatives privées (Spot 6/7, Terrasar X) dans la mise en place d'infrastructures spatiales. Dans ces situations nouvelles, comment la recherche peut-elle bénéficier au mieux de ces mécanismes ?

On note donc depuis quelques années un renforcement des liens laboratoires-industrie. Les compétences système/projet/instrument des principaux maîtres d'œuvre (Astrium, TAS...) leur permettent d'aider les laboratoires à améliorer leurs propositions, en particulier dans le cadre des appels d'offres de l'Esa. En retour, la connaissance que ces maîtres d'œuvre tirent de ces collaborations leur permet d'être plus pertinents lors des appels d'offre industriels des agences.

Pour la puissance publique souhaitant accéder à une infrastructure ou utiliser ses ressources ou ses produits, les deux motivations de base pour l'établissement d'un PPP sont d'une part le lissage et la prévision dans le temps des dépenses et d'autre part la réduction des coûts globaux.

Cela implique un rôle à la fois financier, commercial et technique de la part d'un industriel ou groupe d'industriels : financier pour le montage et la mobilisation des ressources nécessaires pour le développement des infrastructures ; commercial car le modèle économique de ces infrastructures et de leurs opérations doit prendre en compte les recettes, publiques mais aussi complémentaires de la part d'autres utilisateurs ; technique car il développera et opérera à ses propres risques les infrastructures dont il est question.

Les mises en place de PPP pourraient concerner :

- L'infrastructure spatiale :
 - certains satellites comme les satellites d'imagerie haute résolution ou très haute résolution, susceptibles de générer des recettes commerciales à partir de la vente de données,
 - des systèmes de collecte de données *via* le spatial à partir de dispositifs de mesure au sol, comme les systèmes ARGOS ;
- Les services payants (donc complémentaires à d'éventuels services fournis gratuitement à partir de financements de la puissance publique) dérivant des données d'observation, et notamment les services aval GMES ou des services à l'export hors Europe.

Le besoin de rentabilité de tels partenariats exclut généralement de l'épure les missions de démonstration scientifique (concepts, méthodes de mesure) qui ont généralement un niveau significatif de risque technique et un coût non compensable.

Si l'on prend en compte d'une part les compétences des laboratoires (instrumentation, physique de la mesure, traitement des données, etc.) et d'autre part les spécificités des missions, différents schémas de partenariats coexistent :

- l'agence passe le contrat industriel avec le laboratoire associé au suivi et à la recette ;
- une équipe intégrée agence-laboratoire avec un contrat industriel en support ;
- l'agence agissant en tant que maître d'ouvrage avec plusieurs maîtres d'œuvre distincts, soit des laboratoires, soit des industriels.

Recommandation

Le Comité inter-organismes doit mandater un groupe de travail pour formaliser les principes énoncés ci-dessus dans le but d'améliorer la qualité des propositions et sécuriser les montages faits par les laboratoires répondant aux appels d'offres de l'Esa et de la Nasa.

6 | Renforcer les capacités dans le domaine de l'instrumentation innovante

Dans un contexte de plus en plus concurrentiel, en particulier dans le cadre européen, la capacité de la communauté française à porter des projets de missions originales nécessite un programme de R&T ambitieux et comportant nécessairement une part de risques importante. Le contexte en observation de la Terre est assez particulier : comme mentionné précédemment, il nécessite de la continuité dans les observables et le rôle du privé dans la construction d'instruments est important. Aussi, aujourd'hui et plus encore dans les années à venir, outre le traitement des données, le rôle des laboratoires sera principalement de développer les concepts instrumentaux, de contribuer à la réalisation de démonstrateurs scientifiques, et de préparer les approches de physique de la mesure (étalonnage, inversion, validation).

Depuis quelques années, on peut noter une diminution régulière du nombre de chercheurs et ingénieurs instrumentalistes dans beaucoup de laboratoires, rendant de plus en plus délicate la formation de nouvelles générations d'instrumentalistes. Aujourd'hui, lorsque des postes sont fléchés en instrumentation, le nombre de candidats en mesure de postuler est faible.

Recommandation

Les organismes, en particulier l'Insu, doivent montrer clairement l'importance qu'ils attachent à l'instrumentation innovante dans le domaine de l'observation de la Terre : il est fortement recommandé de lancer un programme spécifique dédié à l'instrumentation innovante au sens large accompagné par des allocations pour doctorants.

Il faut assurer aux chercheurs instrumentalistes un espace spécifique pour proposer et développer les instruments de demain ; il faut d'autre part préparer et former la future génération d'instrumentalistes.

7 | Une meilleure exploitation des données spatiales : l'accompagnement des missions spatiales

La communauté a exprimé de façon unanime, lors du Séminaire de prospective scientifique du Cnes à Biarritz en mars 2009, son désappointement à propos des moyens mis en œuvre pour assurer une exploitation optimale des données obtenues à partir des missions spatiales. Ce message s'adressait à l'ensemble des organismes impliqués (Cnes, CNRS, CEA, universités, . . .) ou utilisateurs de données spatiales qui n'ont que trop rarement mis en place une phase d'exploitation avec une organisation, des moyens, et des ressources répondant aux enjeux des missions. Si l'on néglige les moyens d'accompagnement dans les budgets (système d'observations sol, terre, mer, fond de mer, aéroportés (avions, ballons), modèles numériques, assimilation. . .) y compris en ressources humaines, la valorisation des missions en termes scientifiques ne pourra pas être optimale.

Une des critiques essentielles porte sur l'absence de concertation et surtout d'engagement formel entre organismes en amont des missions. En particulier, l'exploitation d'une mission spatiale doit se préparer bien avant le lancement de la mission et cela impose de programmer suffisamment tôt les moyens humains, les travaux de développement et les campagnes de validation nécessaires à cette exploitation. Bien que cette phase d'exploitation soit celle qui parachèvera la réussite d'une mission, on constate qu'elle n'est pas correctement évaluée, préparée et organisée. L'organisation souhaitée est celle qui permet aux acteurs de la mission d'avoir les moyens nécessaires pour traiter correctement et rapidement les données de mission et conduire l'analyse de ces résultats afin d'en assurer la meilleure valorisation possible.

L'organisation à mettre en place doit tenir compte des exigences de la mission, des forces et compétences des différents partenaires. Elle doit être construite autour d'un accord où les bases sont bien posées, en particulier afin d'éviter des écueils connus et les surcoûts associés. On mentionnera deux catégories principales de difficultés, l'une liée aux ressources humaines affectées et l'autre aux moyens mis en œuvre pour assurer le traitement et la gestion des données. Pour la première catégorie, un des problèmes majeurs est celui posé par le maintien des compétences durant toute la phase d'exploitation de la mission, problème résultant de l'utilisation parfois excessive de contrats à durée déterminée entraînant un *turn-over* trop important. De même, un certain déficit d'organisation conduit à ce que les activités de support technique empiètent sur les activités de recherche. Concernant le second point, on notera par exemple les difficultés résultant :

- d'une composante segment sol de la mission non qualifiée pour le lancement en raison de la sous-estimation des développements informatiques associés nécessaires (complexité du système côté laboratoires et complexité des algorithmes scientifiques côté Cnes) ;
- des problèmes de gestion des données (complétudes, retraitement, archivage).

Recommandation 1

Une approche réellement pluri-organismes de l'accompagnement des missions spatiales nécessite une « contractualisation » des moyens humains et financiers mis au service de la mission par les différents partenaires dès la phase A.

Recommandation 2

Une systématisation des comités inter-organismes par projet, avec engagement des partenaires au travers de revues de moyens, est recommandée.

Enfin, améliorer l'exploitation des données spatiales c'est aussi s'assurer que les ingénieurs et chercheurs actuels et futurs soient formés à leur utilisation. Il est nécessaire de mener une réflexion visant à mettre en place des outils de formation, tant initiale que continue, afin de permettre aux utilisateurs potentiels de disposer des bases nécessaires pour manipuler ces données. Ceci compléterait de façon cohérente l'action des pôles thématiques, eux-mêmes contribuant à faciliter l'accès aux données spatiales.

Recommandation 3

Un soutien fort aux filières d'enseignement existantes ou émergentes dédiées aux sciences spatiales appliquées à la planète Terre est recommandé. Au-delà, il est essentiel que les étudiants inscrits dans les filières de sciences de la Terre aient accès à des modules de formation spécialisés en exploitation de données spatiales.

Pour faciliter cela, les allocations doctorales, post-doctorales et les chaires d'excellence Cnes/universités peuvent constituer un outil intéressant. Par ailleurs en complément des étudiants destinés à développer des instruments d'observation ou à faire de la recherche sur leurs données, il est aussi très important de former les étudiants à l'utilisation de ces données dans les processus de prise de décision (médiation, délibération, communication), notamment autour des aspects réglementaires nationaux et européens et des grands débats de société actuels (par exemple changement climatique).

8 | Un cas particulier en observation de la Terre : les surfaces et interfaces continentales (SIC)

Les surfaces et interfaces continentales (SIC), sont un ensemble complexe et hétérogène de par :

- les thématiques larges qu'elles couvrent telles que agriculture et forêt, ressources en eau, cycle du carbone et de l'eau, aménagement du territoire, littoral, glaces continentales, urbain. . . ;
- la variété des échelles de perception (parcelle, territoire, global. . .) ;
- la variété des acteurs : recherche, décideurs internationaux, nationaux et locaux (collectivités territoriales), industrie liées à l'aménagement du territoire et à la gestion des ressources, PME et bureaux d'étude, etc.

Le thème des « surfaces et interfaces continentales » est lié à deux enjeux majeurs :

- des enjeux climatiques, qui nécessitent une meilleure prise en compte de la composante continentale des grands cycles (eau, carbone, azote) et des changements d'occupation du sol ;

- des enjeux liés à la gestion des territoires (aménagement du territoire, urbain, littoral, etc.) et des ressources (eau, agriculture, forêt, etc.) et leur lien avec les impacts des changements globaux (dont l'impact et les rétroactions des changements climatiques).

En ce qui concerne les activités de recherche et de développement, on peut noter une forte fragmentation des organismes et entités travaillant dans ces domaines, qui incluent en particulier le CNRS, l'Inra, le Cemagref, le Cirad, l'IRD, le BRGM, l'IGN...¹. Aux côtés de quelques laboratoires ou groupements principalement spécialisés sur les techniques d'observation spatiale et leur utilisation, il existe une multitude de petites structures travaillant sur des applications thématiques très diverses (faune sauvage, suivi de milieux naturels (zones humides, parc nationaux), hydrologie, surveillance du paysage (mitage, urbanisation, etc.).

Par rapport aux problématiques liées à l'observation des surfaces et interfaces continentales, un premier constat est que l'on dispose de quantités importantes de données satellitaires (en particulier des séries historiques de 20 ou 30 ans), et que celles-ci sont sous-utilisées.

Par ailleurs, les produits à valeur ajoutée sont en général liés à des projets ou à des sites pilotes, et ne sont pas fournis régulièrement ou même rendus disponibles pour les utilisateurs.

Peu de documentation existe sur les séries de données spatiales disponibles, les logiciels de traitement adaptés, mais aussi sur les programmes nationaux ou les appels d'offres ouverts régulièrement. On constate également que trop peu de réseaux de validation au sol ont été déployés aux échelles appropriées, et qu'il n'y a pas d'évaluation systématique des produits spatiaux par les utilisateurs.

Enfin, le problème de la chaîne de l'information (de la physique de mesure vers la fourniture de produits/services et leur utilisation dans les applications ou les processus de décision) est incomplètement posé et donc mal traité au niveau national.

Cette dispersion et ce manque de structuration des communautés concernées plaident pour la mise en place d'une organisation et d'une animation dynamique au niveau national.

Alors que la demande sociétale est particulièrement forte dans cette thématique autour de la problématique du changement global et des interactions entre

¹ Regroupés dans l'Alliance AllEnvi.

les changements d'origine anthropique (aménagement du territoire, adaptation des systèmes de culture, etc.) et ceux d'origine naturelle, le développement d'approches opérationnelles semble piétiner. Les préoccupations concernent ici en particulier l'analyse des impacts d'événements extrêmes (tempêtes, canicules, incendies, inondations, etc.) ou de tendances climatiques à long terme sur les écosystèmes en termes de perte de productivité (agriculture) et de biodiversité, de dépérissement forestiers, de modifications des bilans hydriques et carbonés, etc. Toutes ces questions font intervenir la biologie qui ne doit pas se limiter à sa partie agronomie.

La question de la valorisation (production de variables quantitatives et appropriation des produits issus des recherches en observation de la Terre par des communautés potentiellement utilisatrices) est ainsi une question centrale. Il faut faire se rencontrer les requis scientifiques de la recherche, la demande sociétale et les processus de décision, notamment au niveau national (Loi sur l'environnement, Plan d'action Grenelle) et européen (Plan d'action sur l'environnement, directives et règlements).

L'objectif premier consiste, au travers d'une concertation entre organismes, à définir une « base d'intérêt commun » en termes de produits et d'utilisations, et à se fixer un objectif à moyen terme (3-5 ans) pour la mise en place effective des éléments techniques et de l'organisation et de la gouvernance associée. Cette approche à moyen terme doit en particulier s'appuyer sur des priorités et un équilibre en termes d'efforts/investissements entre le développement de démonstrateurs scientifiques, où la question de « concept instrumental innovant » peut être motrice, et celui de dispositifs spatiaux bien adaptés à une surveillance environnementale, pour lesquels la continuité d'observation en termes de couverture, de résolution spatiale et de répétitivité temporelle, et donc de fourniture régulière de produits dérivés, est primordiale.

Nous retrouvons ici, comme pour les autres compartiments terrestres, les besoins de continuité des observations (issues de l'espace et des réseaux *in situ*) et de concertation entre organismes pour assurer l'accompagnement des missions depuis l'amont jusqu'à une utilisation opérationnelle des données.

Il est important de rappeler que cette réflexion, comme celles précédemment mentionnées, ne peut être conduite qu'avec une ouverture européenne, voire mondiale, de façon à optimiser les efforts et construire en tenant compte de l'existant (recherche de subsidiarité indispensable).

Les communautés de recherche « surfaces et interfaces continentales » utilisant les données d'observation spatiale de la Terre mettent en premier lieu l'accent sur la possibilité de disposer de données fiables et facilement accessibles. Leurs besoins concernent l'ensemble des résolutions spatiales et des plages du

spectre électromagnétique (rayonnement visible solaire réfléchi, IR thermique, micro-ondes actives et passives) pour une couverture nationale, mais aussi, pour certaines applications, continentale et mondiale.

Recommandation

Nous recommandons la création d'un pôle thématique spécifique aux surfaces et interfaces continentales avec 4 objectifs principaux :

- développer l'interdisciplinarité avec la biologie fondamentale au-delà des questions agronomiques ;
- fédérer les besoins des acteurs afin d'accroître les collaborations et les synergies nationales et internationales, en particulier autour des thèmes aménagement et gestion des territoires, gestion des ressources, contribution au suivi des grands cycles globaux et de leurs impacts ;
- améliorer, au travers notamment d'actions d'animation scientifique et de formation, l'utilisation de la donnée spatiale par l'ensemble des acteurs au regard des potentialités scientifiques et applicatives qu'elle offre ;
- mutualiser les outils et ressources d'acquisition, de traitement et de gestion des données afin d'élargir leur utilisation.

Remarque

Fonctionnellement, ce pôle pourrait être constitué :

- d'un Centre technique national (CTN), ayant pour vocation de fournir les données génériques à l'ensemble de la communauté concernée. Ce CTN sera en particulier en charge du développement de chaînes « opérationnelles » assurant la production de données et de séries temporelles homogènes, incluant corrections géométriques et radiométriques. Il mettra également à disposition un ensemble d'outils (logiciels notamment) ;
- d'un ensemble de centres de compétences, s'appuyant sur un réseau de laboratoires, d'équipes ou de chercheurs plus isolés mais disposant de compétences spécifiques ;
- de la mise en place rapide d'un portail contribuant à la distribution de produits, la mutualisation d'outils et de méthodes, l'animation de la communauté (relais d'informations sur catalogues d'images et de séries de données, les appels d'offre, etc.).

This page intentionally left blank

CHAPITRE **3**

Étude et exploration de l'Univers

This page intentionally left blank

L'observation en astrophysique a été un des premiers utilisateurs de l'espace pour détecter les signaux émis dans les domaines de fréquence du spectre électromagnétique qui sont bloqués par l'atmosphère terrestre (ultraviolet, rayons X et gamma, infrarouge lointain et submillimétrique) et pour les observations en visible à haute résolution qui est limitée par la turbulence atmosphérique au sol. En outre l'utilisation des moyens spatiaux pour des observations *in situ* de la magnétosphère terrestre et du milieu interplanétaire a été aussi un domaine pionnier.

Au cours des deux dernières décennies, la recherche spatiale dans le domaine de l'exploration de l'Univers a connu une profonde mutation. Celle-ci porte à la fois sur l'élargissement du champ disciplinaire relevant de la recherche spatiale, sur l'élargissement des communautés concernées par cette activité (ce dont on ne peut que se féliciter), et sur l'évolution du contexte programmatique, tant au Cnes qu'à l'Esa. Au-delà du domaine de l'exploration de l'Univers, les profondes modifications de la structuration de la recherche, au niveau national comme au niveau européen, ont aussi d'importantes répercussions sur la vie des laboratoires de la discipline.

1 | L'élargissement du champ disciplinaire lié à des nouvelles questions

Jusqu'à la fin des années 1980, l'activité spatiale dans le domaine de l'exploration de l'Univers a principalement concerné trois thématiques : l'astronomie, le Système solaire et la physique des plasmas (Soleil et magnétosphère). Après cette date et dans un premier temps, les nouvelles thématiques ayant besoin de l'accès à l'espace l'ont obtenu par un élargissement des domaines de compétence des laboratoires spatiaux aux nouveaux besoins de l'astrophysique et de la planétologie : observations dans l'infrarouge et le submillimétrique, sondes européennes vers les planètes du Système solaire succédant à une activité de développement d'instruments sur des missions américaines ou soviétiques. Des satellites destinés à effectuer des relevés systématiques du ciel dans tout le spectre électromagnétique porteur des informations sur la physique des objets astronomiques ont été mis en œuvre. On a par ailleurs découvert plus de 300 planètes extrasolaires gravitant autour d'étoiles proches, dont les caractéristiques sont radicalement différentes des planètes de notre Système solaire, mais il devrait être possible dans un futur proche, grâce à des observatoires spatiaux dont le satellite Corot est le précurseur, d'imager des planètes de la taille de la Terre et de détecter dans leur atmosphère la signature d'une activité biologique.

Dans la même période, de grands observatoires spatiaux spécialisés dans chacun de ces domaines spectraux développés en collaboration internationale et comportant un arsenal d'instruments d'imagerie fine, de spectroscopie et d'analyse temporelle ont été développés en complément aux grands télescopes optiques et radiotélescopes au sol.

Deux problématiques majeures structurent ce domaine aujourd'hui : l'origine de l'Univers, l'existence de vie extraterrestre et l'origine de la vie.

Quarante années d'exploration spatiale du Système solaire ont révélé une diversité d'objets, de stades d'évolution, de niveaux d'activité et de degrés de complexité d'une richesse insoupçonnée. La planétologie comparative a pour objectif d'expliquer les spécificités planétaires et d'élucider les mécanismes de leurs évolutions ; quatre étapes successives jalonnent cette démarche : observation à distance d'un objet, télédétection rapprochée globale, mesures *in situ* et enfin retour d'échantillons. Afin de comprendre la formation du Système solaire au cours du premier milliard d'années de son évolution, les prochaines décennies seront celles du retour au laboratoire terrestre, d'une part, d'échantillons conservant la trace des conditions originelles du Système solaire et provenant des petits corps résidus de sa formation, astéroïdes et comètes, et d'autre part, d'échantillons de corps différenciés ayant subi différentes étapes d'évolution planétaire, et au premier chef de Mars, la seule planète du Système solaire, en dehors de la Terre, qui ait peut-être présenté à un moment de son histoire les conditions propres à l'émergence et au développement de la vie.

L'histoire de l'Univers a beaucoup progressé tout en ouvrant plus de questions que de progrès sur sa compréhension. Seulement 5 % de la matière et de l'énergie que contient l'Univers est pour l'essentiel constitué de la matière que nous connaissons, faite de neutrons et de protons, ainsi que d'électrons ; 25 % environ est dû à des particules massives inconnues, « la matière noire », et le reste, près des deux tiers, est une mystérieuse forme d'énergie, « l'énergie noire ». Quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire, quel est leur lien avec la nouvelle physique que l'on tente d'élaborer, comment l'Univers primordial s'est-il structuré ? L'Univers est-il stationnaire et immuable ou en évolution, sommes-nous dans une hiérarchie des structures de plus en plus grandes dont on ne voit pas la limite ?

L'étude et l'exploration de l'Univers sont ainsi au centre de grandes questions philosophiques de l'humanité, présentes depuis l'antiquité et en partie à l'origine du développement de la science elle-même dès cette époque. Ces questions sont celles de notre place dans l'Univers et des origines.

Ces questions, et les réponses que la science a pu leur donner, font partie de la culture et la recherche spatiale y contribue beaucoup. Ce rôle doit être reconnu

comme tel, hors des aspects de développements technologiques pouvant avoir des retombées sociétales qui ne sont pas son objectif premier.

Plus récemment, ce domaine s'est étendu vers de nouveaux champs, eux-mêmes en étroite interaction avec les champs existants mais impliquant des communautés scientifiques nouvelles. C'est particulièrement le cas de la cosmologie et de la détection des planètes extrasolaires.

1.1 Les liens avec astroparticules

Des liens privilégiés se sont développés entre astrophysiciens et physiciens des particules depuis 30 ans pour l'astrophysique de haute énergie et au cours de la dernière décennie autour de la cosmologie, tant pour des raisons d'intérêt scientifique (interactions fondamentales et Univers primordial, particules cosmiques de haute énergie et accélérateurs cosmiques ou propriétés des trous noirs) que de méthodologie (traitement massif de données, détecteurs de physique des hautes énergies dans l'espace). Ceci a conduit à développer une stratégie multi-rayonnements d'étude de l'Univers qui développe et enrichit l'approche traditionnelle de l'astrophysique fondée sur la détection du rayonnement électromagnétique dans le visible et le domaine radio. Ainsi l'étude des objets compacts (trous noirs, étoiles à neutrons) et de leur environnement devrait être fortement enrichie par la détection des particules cosmiques très énergétiques : photons mais aussi neutrinos, protons, ions et ondes gravitationnelles émis dans les phénomènes violents associés à la formation de ces objets ou dans les champs intenses régnant à leur voisinage. Les ondes gravitationnelles devraient aussi permettre une connaissance de l'Univers primordial plus directe et très complémentaire de celle fournie par le fonds cosmologique micro-ondes. Cette approche ne concerne pas que les observations faites à partir de l'espace mais aussi de nouveaux moyens d'observation au sol. Il est essentiel de bien analyser et comparer les performances de ces moyens pour les questions scientifiques auxquelles elles sont dédiées.

1.2 Les liens avec la physique fondamentale

L'astrophysique et la physique fondamentale tendent à se rapprocher à travers divers problèmes liés à l'unification des interactions fondamentales et au rôle singulier de la gravitation par rapport aux autres interactions (faible, électromagnétique, forte). Pour tenter de répondre à ces questions, l'outil spatial joue désormais un rôle essentiel alors que les accélérateurs de particules terrestres approchent leurs limites.

La cosmologie scientifique est née il y a près d'un siècle avec la relativité générale qui a permis de construire un modèle d'évolution de l'Univers dépendant de son contenu : matière ordinaire froide à pression négligeable, particules relativistes de pression comparable à la densité d'énergie, constante cosmologique à pression négative. Le programme des cosmologistes consistant à mesurer ces différentes composantes a finalement été rempli dans les dix dernières années. Ce succès spectaculaire s'est toutefois accompagné de l'apparition de questions inattendues mettant fortement en cause la physique fondamentale décrivant les composants élémentaires et leurs interactions. Le contenu en énergie de l'Univers semble dominé par deux composantes de nature inconnue : la matière noire et l'énergie sombre. Cette question comme celle de la physique de l'Univers primordial sont donc clairement à la fois celle de la cosmologie et celle de la physique fondamentale. Ceci a conduit les physiciens des particules et théoriciens de la cosmologie à prendre une part active dans des projets spatiaux en cours comme Planck ou le projet Euclid destiné à l'étude de l'énergie noire.

L'accès à l'espace, nouveau pour cette discipline, va permettre aussi des progrès sur la gravité (champs forts et/ou rapidement variables) et la relativité (métrologie du temps et de l'espace, invariance de Lorentz), progrès impossibles à atteindre en laboratoire.

Les équipes françaises occupent une place privilégiée dans cette thématique. Dans ce cadre, des liens étroits se sont créés au sein du CNRS entre les laboratoires d'astronomie, de physique et de ST2I, ainsi qu'avec l'Onera autour de projets en opération (T2L2), en développement (Pharao-Aces, Microscope, LisaPathfinder) ou à l'étude (Lisa). Les motivations scientifiques viennent de la physique des hautes énergies et de la théorie de la gravitation : les tests associés (principe d'équivalence, constance des constantes physiques, invariance de Lorentz) sont souvent liés à la résolution d'un des problèmes centraux de la physique : celui de l'unification de la gravité avec la théorie quantique des autres interactions fondamentales (le Modèle standard). Les méthodes sont souvent celles de la physique atomique : interférométrie, utilisation des atomes froids. Les technologies associées sont des technologies de pointe qui nécessitent des programmes importants de développement pour obtenir une qualification spatiale.

Des liens très intéressants existent également avec les sciences de la Terre (les premières évaluations de géodésie relativiste seront réalisées au cours de la mission Aces) et avec l'exploration du Système solaire en ce qui concerne l'étude de la gravitation à grande distance. Enfin, il faut noter que les développements technologiques dans ce domaine sont étroitement liés à des applications associées à des développements industriels de grand intérêt en navigation (programme Galileo), observation de la Terre...

1.3 Les liens avec les sciences de la Terre : planétologie comparée

Le développement de l'exploration planétaire a favorisé le rapprochement entre planétologues et physiciens des sciences de la Terre autour de plusieurs thèmes :

- (1) la climatologie comparée des planètes du Système solaire (missions Cassini, Mars Express et Venus Express) ;
- (2) la structure interne comparée de la Terre, des planètes et satellites (missions Cassini, Mars Express) avec des perspectives d'expériences de sismologie lunaire et planétaire ;
- (3) l'analyse de la matière extraterrestre (missions StarDust et Genesis et surtout Rosetta qui analysera *in situ* du matériau cométaire ; perspectives de retour d'échantillons extraterrestres avec les projets Marco Polo et Mars Sample Return).

La découverte d'un nombre rapidement croissant de planètes extrasolaires et de systèmes planétaires a permis la mise en évidence de l'importance des phénomènes de migration des planètes. Pour le Système solaire, le phénomène semble avoir conduit à deux périodes de bombardements intenses des planètes telluriques par des astéroïdes et des comètes. Ceci modifie notablement la compréhension des premières phases de l'histoire de la Terre et de Mars. Plus généralement, l'étude scientifique d'un système unique à histoire unique comme la Terre ou le Système solaire posent de redoutables problèmes de méthodologie. L'apport de l'étude comparée de la Terre avec les autres planètes telluriques ou du Système solaire avec d'autres systèmes planétaires modifie fondamentalement les capacités qu'auront les scientifiques à tester leurs modèles. Il y a là un secteur interdisciplinaire entre les chapitres 2 et 3 de ce rapport qui devra être développé.

Recommandation

Les activités d'équipes développant et testant les modèles d'évolution planétaire (interne, enveloppes fluides ou climat), pour la Terre et conjointement pour les autres planètes du Système solaire ou de systèmes extrasolaires, doivent être encouragées et développées.

1.4 Les liens avec la biologie : exobiologie spatiale

Cette discipline émergente met des chimistes et des biologistes en étroite interface avec les sciences de la Terre pour les études de la Terre primitive, et avec les astronomes sur les thématiques de la détection et la caractérisation des exoplanètes (mission CoRoT, projet Plato) et de l'étude des disques protostellaires. L'interaction est forte avec les planétologues sur la recherche de traces de vie dans le Système solaire (projet ExoMars) et la recherche de processus de chimie organique complexe conduisant à la production de molécules prébiotiques (EJSM, Marco Polo. . .). La motivation et la problématique est de nature similaire à ce qui a été discuté au paragraphe précédent. La modélisation de l'origine de la vie sur Terre sans la comparaison avec des observations détaillées de planètes telluriques avec un spectre de conditions différentes sera extrêmement difficile à tester. Ce programme est clairement à très long terme mais les premières étapes sont en cours avec les programmes de recherche de planètes telluriques extrasolaires, la préparation des moyens d'étudier leur atmosphère, d'y rechercher des signatures biologiques fiables et non ambiguës.

En résumé, l'interdisciplinarité qui résulte de ces élargissements thématiques est un facteur extrêmement enrichissant pour la recherche spatiale qui bénéficie d'une part de nouvelles forces vives pour la conception et le développement de ses missions, et d'autre part d'expertises élargies pour l'exploitation scientifique des données. Elle s'accompagne naturellement d'un accroissement sensible du nombre de laboratoires impliqués dans des projets spatiaux à divers stades de leur évolution. En parallèle, l'engagement de l'IN2P3 dans la recherche spatiale à travers les missions d'astronomie et de physique fondamentale, ainsi que celui de l'INP et de l'INST2I pour la physique fondamentale, est un atout majeur pour nos disciplines. Plus généralement, le soutien croissant de nouveaux organismes (universités, grandes écoles) dans la recherche spatiale offre des perspectives et des moyens accrus qu'il faut intégrer de manière optimale dans le dispositif actuel.

Recommandation

Le secteur de la recherche spatiale a besoin que des structures de type programmes et commissions interdisciplinaires soient mises en place entre physique fondamentale, biologie, astrophysique et sciences de la Terre pour faciliter et inciter les collaborations et échanges de savoir-faire sur ces sujets.

2 | L'évolution du périmètre des laboratoires spatiaux

Il y a une vingtaine d'années, moins d'une dizaine de laboratoires (les « laboratoires sélectionnés du Cnes », créés dans les années 1960) étaient impliqués dans la recherche spatiale en sciences de l'Univers. Aujourd'hui, toutes les unités mixtes de la section Insu-AA (astronomie-astrophysique) sont concernées au titre de l'exploitation scientifique des données ; en pratique il s'agit non seulement d'UMR relevant des champs thématiques de l'Insu-OA (océan-atmosphère) et ST (sciences de la Terre) de l'IN2P3 ou de l'INP/INST2I du CEA-IRFU. Beaucoup de ces laboratoires font des propositions de R&T au Cnes et accueillent des doctorants ou des post-doctorants (co)financés par le Cnes pour traiter et interpréter des données spatiales. Un grand nombre de ces laboratoires interviennent également dans la réalisation des missions spatiales, allant de la maîtrise d'œuvre d'un instrument à la fourniture d'un sous-système ou la fourniture de logiciel.

2.1 Les laboratoires d'étude de l'Univers extraterrestre

Pour décrire l'implication des laboratoires d'astronomie¹ dans la recherche spatiale, nous définissons ci-dessous trois catégories, en fonction de leur niveau d'implication :

1. capacité de maîtrise d'œuvre d'instruments complets (y compris l'intégration, tests et étalonnage)² ;
2. fourniture de sous-systèmes ;
3. fourniture de logiciels spécifiques (dans les phases de définition ou pour le traitement des données).

De plus, on peut noter que la quasi-totalité des laboratoires de la discipline utilisent des données spatiales traitées pour les modélisations et des analyses théoriques.

La première catégorie regroupe les laboratoires spatiaux « traditionnels » qui ont à leur actif la réalisation de nombreux instruments spatiaux et qui disposent de moyens lourds en matière d'intégration, de tests et d'essais³.

¹ En pratique il s'agit non seulement de laboratoires relevant de l'Insu/astrophysique, mais aussi de l'Insu/océan-atmosphère (Latmos, Lisa), de l'Insu/ST (IPGP), de l'IN2P3 (APC, LAL, LPTA) ou de l'INP/INST2I (LCFIO).

² On note que la maîtrise d'œuvre d'un instrument n'a pas les mêmes implications s'il s'agit d'une mission d'astronomie (dont l'instrumentation est complexe) ou d'une mission de planétologie (souvent constituée de plusieurs instruments de type *principal investigator* (PI)).

³ Ce sont le CESR, l'IAS, l'IRFU/SAP, le Lam, le Latmos, le Lesia, le LPC2E, le LPP et l'Onera/DMPH.

La seconde catégorie regroupe une dizaine de laboratoires impliqués à des titres divers dans la fourniture de sous-systèmes ou de prototypes⁴.

La troisième catégorie, elle aussi en évolution rapide, regroupe des laboratoires fournissant des logiciels, soit pour la phase de conception et de définition de la mission, soit pour le développement du pipeline de réduction des données⁵. L'ensemble des trois catégories regroupe une trentaine de laboratoires, soit plus des trois-quarts de la discipline. L'implication d'un nombre croissant de laboratoires est un atout certain pour la recherche spatiale qui dispose ainsi de forces nouvelles à différents stades de l'évolution des projets. Elle nécessite aussi l'allocation par les organismes et établissements universitaires de moyens humains et financiers suffisants pour permettre à tous ces laboratoires d'assurer pleinement leurs engagements.

2.2 Les laboratoires de l'IN2P3 travaillant dans le domaine des astroparticules et de la cosmologie

Comme il a été souligné plus haut, les domaines de recherche couverts par les laboratoires de l'IN2P3 représentent un champ d'étude commun avec ceux des laboratoires d'astrophysique. C'est ainsi que dans le cas d'Integral, Planck, Fermi, SVOM, Euclid, Ixo et Lisa, chaque projet est développé en partenariat étroit entre laboratoires de l'Insu, du CEA et de l'IN2P3.

Parmi les laboratoires de l'IN2P3, l'APC (astrophysique-cosmologie) est un cas particulier. Une partie importante des moyens spatiaux à l'IN2P3 a été placée à l'APC : salles blanches, petit simulateur spatial, cellule qualité, centre de traitement des données. L'APC est organisé à peu près comme un laboratoire spatial d'astrophysique ; il est impliqué dans la fourniture de petits instruments ou sous-systèmes, dans la conception de prototypes (surtout dans Lisa), et fournit des logiciels pour plusieurs missions spatiales. Il a l'ambition d'aller vers une capacité de réalisation d'instruments complets.

Les autres laboratoires de l'IN2P3 ont un fonctionnement assez différent du point de vue du spatial : ils peuvent mobiliser des moyens significatifs, tant

⁴La liste, rapidement évolutive, comprend l'IPGP, le Lab, le Lerma, le Lisa, le LPG, l'OCA et le Syrte. On trouve des laboratoires travaillant en partenariat avec d'autres laboratoires spatiaux pour la fourniture de sous-systèmes spécifiques (ex. : Lisa et Latmos, LPG et Latmos, Lab et CESR), mais aussi des laboratoires développant des prototypes (Syrte). Il faut y ajouter les laboratoires de l'IN2P3 discutés dans le chapitre 3 § 2.2.

⁵(Gepi, IAP). L'IMCCE réalise des travaux d'orbitographie pour les agences spatiales (Cnes, Esa). L'Observatoire de Strasbourg, avec le CDS, est impliqué dans l'archivage des données spatiales et leur insertion dans l'Observatoire virtuel. L'Observatoire de Besançon, comme le Gepi, est impliqué dans la préparation de la mission Gaia.

techniques qu'humains, sur un projet spatial donné, pendant un temps donné. L'implication de ces laboratoires dans le spatial est donc fortement variable⁶.

2.3 Les autres laboratoires travaillant dans le domaine de la physique fondamentale

La physique fondamentale dans l'espace se trouve au CNRS à la croisée entre plusieurs instituts⁷ : Insu, IN2P3, INP. Le développement de T2L2, Pharao, Microscope et Lisa Pathfinder a permis aux laboratoires impliqués de développer une expertise qui en fait des leaders dans leur domaine. Une des leçons apprises de la période récente est que les activités de haute technologie nécessaires pour le développement de ces missions (accéléromètres, horloges, interféromètre à ondes de matière) nécessitent un couplage important entre les laboratoires, détenteurs de l'expertise, et les industriels. Par ailleurs, les moyens de test spécifiques au domaine (par exemple les horloges ultrastables), qui permettent de tester les performances scientifiques des instruments, ne peuvent se concevoir qu'utilisés au sein des laboratoires qui les ont conçus.

L'Onera a joué un rôle important dans le développement en France du domaine de la physique fondamentale dans l'espace. Son caractère semi-industriel est un atout précieux mais il permet plus difficilement d'absorber les fluctuations de la programmation spatiale. Il manque pour le moment en France une entité développée au sein du monde académique qui soutienne, en partenariat avec l'Onera, le développement spatial de la physique fondamentale.

3 | L'évolution du contexte programmatique

3.1 Des missions de plus en plus complexes

Parallèlement à cette évolution, on assiste à une complexification des missions spatiales. La couverture en longueur d'onde du spectre électromagnétique par de grands observatoires spatiaux a été achevée avec la mise en opération de Herschel et l'accès au domaine submillimétrique ; l'accès à de nouveaux messagers est envisagé avec les projets Lisa (ondes gravitationnelles) et JEM-EUSO (rayons cosmiques de très haute énergie d'une portée scientifique plus limitée).

⁶La liste des laboratoires engagés dans le programme spatial est la suivante :

- laboratoires assurant la fourniture de sous-systèmes : LAL, LAPP, LPSC, LLR ;
- laboratoires fournisseurs de logiciels : Centre de calcul de l'IN2P3, LPTA ;
- laboratoires utilisateurs de données spatiales : CENBG.

⁷Insu pour l'Oca et le Syrte, INP pour le LKB et le LCFIO, et IN2P3 pour l'APC.

Les missions astronomiques du futur seront nécessairement plus complexes, car plus exigeantes en termes de performances (sensibilité, pouvoir de résolution spatial et spectral). Elles feront aussi l'objet de défis technologiques dont la résolution nécessitera des travaux de R&T de plus en plus poussés (voir § 3.3). Comme pour les plus grandes missions récentes, elles nécessiteront la mise en œuvre de consortiums internationaux à partenaires multiples dont le management demandera des moyens plus importants. Les laboratoires auront un rôle accru dans la gestion des consortiums scientifiques et des aspects systèmes en particulier quand ils impliquent à la fois les charges utiles et les modules de service.

Les succès des équipes françaises aux AO de l'Esa (en particulier l'AO Cosmic Vision) ont illustré l'excellente collaboration entre les laboratoires et le Centre spatial de Toulouse au niveau de la R&T et la préparation des missions. Des exemples d'équipes intégrées Cnes-laboratoires ont été particulièrement positifs ; c'est le cas notamment de la mission Corot et de l'instrument ChemCam sur la mission MSL de la Nasa et des contributions limitées mais critiques du CST sur l'instrument Planck-HFI.

Les équipes des laboratoires assurent la bonne interface entre les scientifiques et les équipes techniques des agences spatiales et industriels impliqués. Ils doivent garder les capacités de management d'instruments petits ou moyens.

Recommandation 1

Nous recommandons fortement l'extension de ce principe à d'autres projets. Les équipes intégrées fourniront la possibilité d'un partage de compétences entre le Centre spatial de Toulouse et les laboratoires pour un certain nombre de profils techniques, d'ingénierie spatiale ou de management (gestion de projet, contrôle qualité, documentation. . .).

Recommandation 2

Les groupes projets des instruments les plus complexes (taille, coût, risques) doivent être constitués de spécialistes des laboratoires et des agences spatiales avec des intervenants industriels pour compléter si nécessaire. Ces équipes peuvent ne pas être géographiquement regroupées.

Recommandation 3

Les laboratoires assurant le pilotage scientifique des grands projets doivent garder néanmoins la capacité de constituer des équipes système comprenant des grandes spécialités techniques spatiales (mécanique, électronique, thermique, logiciels embarqués. . .).

3.2 Un besoin accru de suivi des missions en opération – Observatoire virtuel

Aujourd'hui, le fort taux de succès des missions spatiales (lancements et performances des modules de service et charges utiles) et l'augmentation de la durée de vie des missions conduisent à un nombre élevé des missions spatiales alimentant en données spatiales la quasi-totalité des communautés d'astronomie, de planétologie, de physique solaire et de physique des plasmas mais aussi de nouvelles communautés, comme décrit plus haut. Si l'augmentation de la fiabilité des missions et celle du nombre d'utilisateurs sont globalement largement bénéfiques à la science, elles ont de fortes implications sur la distribution des ressources humaines et financières. La part des budgets de l'Esa et du Cnes consacrée aux opérations et aux exploitations est sensiblement plus élevée que par le passé.

Le nombre élevé de missions en phase d'opération et d'exploitation se traduit par une demande sensiblement accrue dans le domaine du traitement, de l'archivage et de l'exploitation scientifique des données spatiales. La partie de ces activités liées au traitement des données aux niveaux concernés par les étalonnages et les effets instrumentaux doit rester dans des laboratoires ayant participé de près à la conception et/ou la réalisation avec le support du Cnes. En revanche, d'autres activités plus proches du retour scientifique ou de la mise à disposition des données d'une communauté large d'utilisateurs peut être conduite dans des pôles thématiques, dans des laboratoires ou des centres internationaux d'archivage long terme et de distribution (des agences spatiales).

Les pôles thématiques et les centres assurant aux utilisateurs l'interopérabilité des bases de données diverses et multi-sites dont ils ont besoin reçoivent une partie de leur moyens des agences académiques concernées et pas seulement des agences spatiales. Cette part devrait croître avec l'implication croissante des universités, PRES et grands campus.

Le statut de TGIR conféré au Centre de données spatiales de Strasbourg est un exemple d'engagement de support à long terme d'une infrastructure critique à l'échelle internationale dans ce domaine. C'est un élément clé du dispositif

de l'observatoire virtuel en astronomie qui a vocation à se développer dans la prochaine décennie.

Recommandation 1

Il faudra veiller à définir les responsabilités dans l'archivage long terme qui relève le plus souvent des agences spatiales dès la décision de mission (en particulier pour les petites missions).

Recommandation 2

L'augmentation des besoins en exploitation des missions liée au nombre de missions en vol et à l'augmentation du nombre des utilisateurs doit être couverte en partie par les apports en personnel de support des instituts et agences d'où sont issus les nouveaux utilisateurs scientifiques. L'ANR contribue déjà à l'exploitation des données ; un appel d'offres spécifique pour l'exploitation des grandes missions spatiales devrait être proposé.

Recommandation 3

Les dispositions prises suite aux recommandations 1 et 2 doivent tenir compte des spécifications du concept de l'Observatoire virtuel.

3.3 Le rôle essentiel du couplage sol-espace

La nécessité d'un couplage étroit entre activités sol et spatiales apparaît de plus en plus souvent, ceci pour une exploitation optimale des données spatiales. Ainsi par exemple, la mission Gaia nécessitera le suivi spectroscopique au sol d'un grand nombre d'objets. Parfois les observations au sol font intégralement partie du projet. On peut citer en exemple la détection des exoplanètes par la mission CoRoT qui nécessite impérativement un suivi vélocimétrique depuis le sol des planètes candidates. Notons que son importance est bien illustrée, au niveau européen, par la mise en place des groupes de travail Esa-Eso sur les exoplanètes, la cosmologie fondamentale, et la physique de la Galaxie. Au niveau français, une concertation étroite au niveau des instituts et des laboratoires est essentielle pour assurer au mieux cette synergie.

Recommandation

Les perspectives disciplinaires à moyen et long termes comme celles effectuées par Astronet discutant des grandes questions scientifiques puis des

projets aussi bien sol que spatiaux pour y répondre sont essentielles et doivent être pérennisées.

Il faut travailler à leur extension à une échelle mondiale, qui pourrait être conduite par les grandes unions scientifiques internationales pour orienter les rencontres entre agences pour la mise en œuvre des projets.

3.4 L'évolution programmatique au Cnes et à l'Esa

Depuis une dizaine d'années, on assiste à une évolution du calendrier décisionnel des missions. Du côté de l'Esa, les problèmes techniques et les dépassements financiers rencontrés sur quelques missions ont amené l'Esa à renforcer les phases préparatoires et à retarder les décisions de mission jusqu'après la phase B1 afin de mieux maîtriser les coûts complets.

Recommandation 1

Le nombre de missions retenues à chaque phase doit résulter d'un compromis : une compétition large au départ du processus et un choix final en bonne connaissance de la faisabilité et du coût, mais sans multiplier les études dans la dernière phase conduisant à trop d'études détaillées utilisant beaucoup de ressources ne débouchant sur aucune réalisation.

Les cycles associant plusieurs missions sont de ce point de vue optimaux tant qu'ils restent dans un calendrier raisonnable vis-à-vis de l'évolution des technologies et des problématiques scientifiques.

Cette évolution positive du point de vue des phases C-D a pour conséquence le fait que, dans de nombreux cas, les instruments sont en avance de phase sur la définition des missions elles-mêmes, ce qui en augmente les coûts. Ce coût des charges utiles étant aujourd'hui proche du tiers de celui de la mission complète, l'optimisation doit se faire de façon à minimiser les coûts et les risques financiers en prenant en compte les contraintes tant du côté de l'Esa que de celui des agences nationales.

Les « petites » missions (microsats, minisats, voire missions ballon), privilégiées dans les décennies antérieures, ont du mal à trouver leur place dans le nouveau schéma. De plus, les microsatellites dépendent trop aujourd'hui d'une recherche aléatoire d'opportunités de lancement satisfaisant leur besoin. Or les petites missions sont importantes tant du point de vue de leur retour scientifique

rapide que du point de vue du savoir-faire qu'elles apportent aux laboratoires ainsi qu'au Cnes dans la conduite de projets complexes. Les ballons ont joué un rôle irremplaçable de ce point de vue et doivent continuer à le jouer.

Recommandation 2

Il est indispensable de maintenir un volant de petites missions qui permette d'obtenir des résultats sur un sujet très rapidement. Cela permet de former les équipes de chercheurs des grandes missions futures.

La règle de la préférence aux lanceurs européens doit être assouplie pour la classe des satellites de moins de 300 kg pour lesquels il n'y a pas pour l'instant d'offre commerciale en Europe.

Il est essentiel de maintenir une capacité de contribution à des missions d'opportunité, notamment avec la Nasa, qui permettent de remplir certains de ces besoins scientifiques.

3.5 L'importance croissante de la R&T et le rôle des phases 0

L'acceptation d'un projet en réponse à un appel d'offres d'une agence spatiale (en particulier l'Esa) nécessite impérativement l'acquisition d'un niveau de qualification technologique (TRL) suffisant. Celui-ci implique des développements technologiques poussés, menés par les laboratoires souvent en partenariat étroit avec le Cnes/CST⁸.

Les missions présélectionnées dans le cadre du premier appel d'offres Cosmic Vision font actuellement toutes l'objet de Phases 0 et/ou d'actions de R&T. Il en est de même pour certaines des missions qui seront candidates au prochain appel à proposition. Il est essentiel de maintenir à l'avenir à ce niveau les activités d'avant-projets.

Les financements nécessaires aux démonstrateurs requis pour atteindre des niveaux TRL pour les décisions à différentes phases des projets doivent être prévus avec une attention particulière aux technologies nouvelles.

⁸L'expérience du premier appel d'offres du programme Cosmic Vision de l'Esa a été particulièrement positive pour la France puisque sur 11 missions présélectionnées, toutes avaient une implication française importante, 5 d'entre elles avaient un *principal investigator* (PI) français, et deux avaient fait l'objet de phases 0 au Cnes. Elle illustre l'excellente interaction entre les équipes du Cnes (DCT et DSP) et les laboratoires.

Recommandation 1

Il est essentiel de maintenir le niveau relatif des financements de R&T amont par rapport à celui des réalisations et d'exploitations de missions.

À côté des financements Cnes sur les développements de futurs dispositifs spatiaux, l'ANR joue un rôle positif sur des programmes de R&T amont, qui doit être poursuivi tant que ces financements ne sont pas directement liés à des missions et à leur contraintes et en particulier quand ils concernent des laboratoires qui ne sont pas impliqués directement dans les missions spatiales.

Recommandation 2

Nous recommandons que soit mis en place par l'ANR un appel d'offres ciblé (avec des projets pouvant aller jusqu'à 4 ans) sur le développement amont d'éléments d'instrumentation qui permettrait de maintenir la communauté au meilleur niveau dans la compétition internationale.

4 | Propositions d'évolution de l'organisation des laboratoires

Sur la base de l'état des lieux décrit ci-dessus, on peut dégager un certain nombre de recommandations visant à optimiser le dispositif de la recherche spatiale en astronomie et physique fondamentale.

L'implication d'un nombre croissant de laboratoires dans la recherche spatiale est une force dont il importe de tirer le meilleur parti. L'objectif est de définir une organisation permettant à chacun de remplir pleinement ses missions en lui fournissant les moyens nécessaires. Cette organisation passe nécessairement par une mutualisation des moyens lourds qui devront pouvoir être mis à la disposition de tous les partenaires (à l'échelle régionale ou nationale) en fonction des besoins liés à tel ou tel projet.

4.1 Un moyen national lié aux équipements lourds

La mise en place d'un moyen national regroupant les laboratoires disposant d'équipements lourds d'intégration et de tests (qui devrait bénéficier du label de TGR du CNRS) assurant le maintien des moyens à long terme est actuellement envisagée. Ces laboratoires sont, pour tout ou partie, issus des laboratoires

spatiaux. L'actuel GIS MoteSpace⁹ préfigure cette organisation. Les laboratoires pourront s'appuyer sur ce moyen national (qui aura donc une vocation affichée de service vis-à-vis de la communauté) pour mener à bien leur participation instrumentale à des projets spatiaux.

Recommandation

Un tel moyen est une excellente initiative dans le contexte actuel. La gouvernance de cette plate-forme demande une instruction en profondeur du dossier.

Ce premier effort de mutualisation des moyens spatiaux lourds au niveau national nous paraît indispensable avant une réflexion, également nécessaire, vers un élargissement éventuel au niveau européen.

4.2 Le traitement, l'archivage et la distribution des données

Dans ce secteur thématique il existe deux pôles thématiques au niveau national (CDPP, Medoc). Au niveau européen et international le CDS assure des services de type « observatoire virtuel » donnant à l'utilisateur de données les moyens de recherche, d'accès et de mise en forme de données dispersées géographiquement. Le centre ESAC d'archivage des missions du programme scientifique obligatoire de l'Esa (et les centres de la Nasa) couvre une grande partie de l'archivage long terme nécessaire. L'Esa s'appuie dans ce dispositif sur des centres liés à la réalisation et à l'étalonnage des instruments soutenus par les agences nationales. La mise en réseau de ces centres par spécialité (astrométrie avec Hipparcos et Gaia, rayons gamma avec COS-B, Integral, Fermi, infrarouge et submillimétrique avec Iso, Herchel et Planck) assurerait avec une structure légère leur coordination. De tels centres pourraient être communs sol-espace (par exemple le traitement massif de données optiques Terapix).

L'augmentation des missions en opération implique des besoins croissants en matière de traitement de données, d'archivage et d'exploitation scientifique ; ce dernier volet concerne aujourd'hui la totalité des laboratoires de l'Insu-AA.

Pour chaque projet d'astronomie, le traitement de données et l'archivage nécessitent une mutualisation des moyens affectés à la réalisation des pipelines et une coordination des divers laboratoires ou organismes partenaires au sein d'un centre de données dédié (éventuellement sans murs). L'expérience du DPAC-Gaia montre l'intérêt que peut avoir l'implication du Cnes.

⁹Regroupant IAS, SAp, LESIA. . .

Les missions de planétologie, constituées de plusieurs instruments de type PI (*principal investigator*), n'ont pas la même contrainte car le traitement des données peut être géré au niveau du laboratoire PI. L'Esa et la Nasa assurent l'archivage des données traitées par les équipes instrumentales. Les PI doivent s'engager à les transmettre dans un format défini au Planetary Data System de la Nasa ou au Science Data Archive de l'Esa. Par ailleurs, le Latmos a développé une base de données atmosphériques planétaires et l'IPGP envisage un projet de base de données sismiques planétaires.

4.3 L'exploitation scientifique

Pour obtenir une exploitation scientifique optimale des données spatiales, il est nécessaire de faire appel à des ressources autres que celles du Cnes, du CNRS et du CEA. Les contrats de l'ANR et de l'Union européenne (FP7, préparation FP8) offrent une opportunité à saisir, bien que la durée relativement brève des contrats (3 ou 4 ans) puisse poser des problèmes de pérennisation des activités à leur achèvement. L'expérience du réseau Europlanet (FP6 et FP7) paraît une initiative exemplaire, à encourager pour d'autres disciplines.

5 | Organisation d'un pôle spatial autour de la physique fondamentale

Suite au premier appel d'offres du programme Cosmic Vision de l'Esa qui n'a présélectionné aucune mission de physique fondamentale en dehors de Lisa, la communauté européenne concernée a manifesté le besoin de mieux se préparer en vue du prochain appel d'offres pour les missions L (2012-2013), en se donnant les moyens de répondre aux exigences technologiques associées aux projets spatiaux soumis à l'Esa. Au niveau français, les laboratoires de physique fondamentale souhaitent engager une réflexion sur la mise en œuvre d'un pôle spatial de physique fondamentale. Parallèlement, la communauté est en train de se structurer au sein de l'Action spécifique de l'Insu GRAM (gravitation, relativité, astronomie et métrologie de l'espace et du temps).

Dans l'organisation régionale des pôles spatiaux, le pôle spatial associé au PRES Université-Paris-Cité est un de ceux au sein desquels pourrait se constituer une équipe technique susceptible de s'intégrer à la plate-forme nationale de maîtrise d'œuvre des charges utiles. En effet, ce pôle bénéficie des équipes techniques de l'ancien laboratoire du Collège de France, de la collaboration institutionnelle avec l'IRFU de chercheurs/ingénieurs ayant une double appartenance et de ses services techniques, du soutien de l'IN2P3 pour renforcer ces

équipes. Le rôle pris par l'APC dans Lisa France en fait un candidat pour assurer la mise en place d'une telle équipe. L'Observatoire de Paris avec le Syrte, le Lerma en collaboration avec le LKB peut aussi contribuer à la création de ce pôle.

Recommandation

Nous recommandons la mise en place d'un groupe de travail constitué des représentants des équipes de physique fondamentale et d'ingénierie spatiale, issus du Cnes et des laboratoires concernés. Ce groupe travaillera en interaction avec l'Onera et en étroite concertation avec le groupe thématique « physique fondamentale » du Cnes. Il aura pour première mission de faire des propositions partant de ces potentialités.

En fonction des différents projets qui seront considérés, la structure de management pourra soit être intégrée au pôle spatial Tolbiac, soit être un groupe projet regroupant des personnels du Cnes et ceux d'un (ou plusieurs) laboratoire(s) appartenant ou non à la plate-forme.

En parallèle, le groupe de travail devra préparer une feuille de route pour l'élaboration de projets spatiaux de physique fondamentale, en précisant les actions de R&T nécessaires pour que ces projets puissent acquérir le niveau de technologie requis.

CHAPITRE 4

Sciences de la vie et de la
matière en micropesanteur

This page intentionally left blank

Les sciences de la matière en micropesanteur se sont tournées vers l'étude de problèmes fondamentaux de physique des fluides, avec des applications à la gestion des fluides dans les systèmes spatiaux. Les sciences de la vie en micropesanteur dans l'espace se concentrent principalement sur l'étude biologique et physiologique des organismes dans les conditions spatiales, avec des applications au suivi médical des équipages lors des missions habitées. Le volume financier et humain de ces activités est modeste (hormis bien entendu le coût d'exploitation de l'infrastructure ISS), et l'organisation du partenariat entre laboratoires et agence spatiale ne se pose pas dans les mêmes termes que pour les domaines des sciences de la Terre et de l'Univers. Nous avons donc décidé de ne pas traiter ce domaine, dont la situation est fortement liée aux évolutions du contexte en matière de vol habité, dans le présent rapport.

Les sciences de la vie interviennent de façon croissante dans la recherche spatiale comme utilisateurs des données d'observations de la Terre, pour des questions à fort contenu sociétal en agronomie, climatologie, biodiversité, et d'autres planètes pour les questions liées à l'origine de la vie la vie extraterrestre. Tous ces aspects sont traités dans les chapitres 2 et 3.

Recommandation

Les perspectives en sciences en micropesanteur devront faire l'objet d'une analyse dans le cadre des questions liées à l'avenir des vols habités qui se poseront quand d'autres acteurs non européens auront défini leur politique et que l'opportunité d'une participation européenne et/ou française devra être discutée.

This page intentionally left blank

RÉSUMÉ DES RECOMMANDATIONS

Résumé exécutif

3. Les moyens du spatial à adapter à l'évolution des missions

Recommandation

Le Comité inter-organismes mis en place par le Cnes devrait évaluer et préciser la mission et le rôle de ces pôles interdisciplinaires régionaux dans le dispositif futur. La région Toulousaine et le campus de Saclay sont les deux plus grands regroupements de ce type qu'il convient d'évaluer. Ces pôles devraient particulièrement se positionner comme intermédiaires avec les nouvelles équipes utilisatrices (ou utilisatrices potentielles) des données spatiales.

Le Comité inter-organismes devrait inviter la Conférence des présidents d'université à désigner un représentant.

5. Une importante évolution des acteurs du spatial

5.1. Évolution du Cnes

Recommandation

Les moyens du Cnes doivent prendre en compte l'arrivée des nouvelles disciplines pour lesquelles les données spatiales sont essentielles afin qu'il puisse assurer la part spécifiquement spatiale des missions correspondantes, l'exploitation et l'archivage de ces données pouvant être assurées partiellement par les agences spécialisées.

Conclusion : résumé final

Recommandation

Étant donné l'enjeu de ces activités, ce rapport ne les traite pas et il serait judicieux qu'un groupe de travail s'en saisisse.

Chapitre 1 – Le contexte général

1. L'importance croissante des observations spatiales

Recommandation

L'importance des observations et des mesures à partir de l'espace va continuer à croître puisqu'elles jouent un rôle unique, tant pour la science (le propos de ce rapport), que pour les systèmes opérationnels toujours plus nombreux au service de la société, et pour les applications de sécurité et de défense. L'accès par les scientifiques à ces données de différentes sources, et les mécanismes associés pour les valider, constituent donc une nouvelle problématique critique, rapidement grandissante, tout particulièrement pour l'observation du système Terre. Il conviendrait que cette évolution soit prise en compte par les organismes concernés.

2. Les évolutions en cours

2.1. Le contexte mondial

2.2. L'échelle européenne

Recommandation

En complément des activités nationales et multilatérales européennes focalisées sur les aspects scientifiques, le mouvement d'intégration et de pilotage vers le niveau européen communautaire est naturel et souhaitable pour la structuration des programmes opérationnels (GMES par exemple). Il doit être poursuivi à condition, évidemment, de mettre en place des règles de décision et de gestion efficaces entre les différents acteurs (Union européenne, États membres, Esa. . .) et dans un strict respect de la subsidiarité.

2.3. Le cadre français

2.3.1. Le cadre programmatique

Recommandation

Le cadre programmatique des sciences spatiales doit s'appuyer aussi sur celui des infrastructures sol complémentaires ou connexes. C'est ce qui a commencé à se faire et qui doit être pérennisé.

2.3.2. Les infrastructures spatiales nationales

Recommandation

Il est indispensable de maintenir une filière ballon qui est un outil pour le développement des technologies nouvelles et pour le renouvellement des équipes de recherche spatiale. La collaboration internationale est une voie qui peut permettre d'optimiser l'utilisation et les coûts de l'infrastructure ballon (qui a été utilisée pour les vols de longues durées).

2.3.3. Le contexte national d'organisation de la recherche spatiale

Recommandation

Le Comité inter-organismes mis en place par le Cnes doit organiser, évaluer et labéliser ces pôles et les plates-formes technologiques en leur sein.

2.4. Le rôle des laboratoires

Recommandation

Des plates-formes technologiques multilaboratoires doivent être créées pour la réalisation des charges utiles et pour les segments sol des missions, celles-ci fédérant les activités à caractère spatial et pouvant offrir des services à un ensemble d'utilisateurs. Ces plates-formes pourraient être constituées sur une base régionale, une coordination nationale étant nécessaire.

Chapitre 2 – Sciences du système Terre

1. Accroître les connaissances : continuité des données et nouveaux observables

Recommandation 1

Il faudra veiller à l'implication croissante des biologistes dans la préparation des missions pour définir les nouveaux observables et dans l'analyse et l'utilisation des données. Le rôle croissant de la biosphère dans les interfaces nécessite de développer des approches interdisciplinaires des interfaces concernées.

Recommandation 2

Une spécificité forte de l'observation de la Terre, tant pour sa composante spatiale qu'*in situ*, réside dans la complémentarité entre innovation scientifique et instrumentale et continuité observationnelle, qui ne doivent surtout pas être mises en concurrence.

2. Répondre à une demande sociétale forte

Recommandation 1

La mise en place à l'échelle européenne des programmes mettant en œuvre les missions opérationnelles dans les domaines où elles ne le sont pas encore doit rester une priorité pour les gouvernements.

Recommandation 2

Les laboratoires de recherche doivent intervenir en amont au niveau de l'amélioration des systèmes d'information et au niveau de l'expertise scientifique nécessaire pour spécifier la qualité des produits, y compris en phase opérationnelle. Ils doivent spécifier en particulier le besoin de la partie recherche pouvant être rempli par ces phases opérationnelles.

L'acteur « recherche » doit également intervenir en aval en tant qu'utilisateur pour s'assurer de la qualité de ces services.

3. Les observations spatiales et *in situ* : deux composantes complémentaires

Recommandation 1

Les diverses perspectives scientifiques nationales ont toutes fait ressortir des demandes visant à la création de nouveaux pôles thématiques. Compte tenu du succès indéniable de ces structures, nous recommandons également que des pôles thématiques soient mis en place de façon à couvrir la totalité des champs disciplinaires des sciences de la planète Terre.

Recommandation 2

Une réflexion visant à positionner les pôles thématiques et leur devenir au sein du contexte européen voire mondial doit être menée rapidement, sur la base d'un dialogue entre partenaires européens.

Recommandation 3

Pour capitaliser sur ces réussites indiscutables, il conviendrait que soit définie plus précisément la forme que doit prendre la contribution française aux systèmes européens et mondiaux d'observation de la Terre et de gestion de l'environnement. Cette contribution doit naturellement être basée sur des critères de subsidiarité et de non-duplication des fonctions. Au niveau national, cette contribution doit être consolidée au travers d'accords de partenariats formels entre organismes.

4. Les missions spatiales et leurs spécificités

Recommandation

Une réflexion pour une prise en compte des besoins de la communauté de recherche dans les programmes spatiaux militaires et réciproquement pour une valorisation de l'utilisation des données civiles au profit des missions de défense devrait être menée, en particulier, au sein de l'équipe défense du Cnes via une interface de dialogue formalisée avec le Tosca.

5. Un partage public/privé fort en observation de la Terre

Recommandation

Le Comité inter-organismes doit mandater un groupe de travail pour formaliser les principes énoncés ci-dessus dans le but d'améliorer la qualité des propositions et sécuriser les montages faits par les laboratoires répondant aux appels d'offres de l'Esa et de la Nasa.

6. Renforcer les capacités dans le domaine de l'instrumentation innovante

Recommandation

Les organismes, en particulier l'Insu, doivent montrer clairement l'importance qu'ils attachent à l'instrumentation innovante dans le domaine de l'observation de la Terre : il est fortement recommandé de lancer un programme spécifique dédié à l'instrumentation innovante au sens large accompagné par des allocations pour doctorants.

Il faut assurer aux chercheurs instrumentalistes un espace spécifique pour proposer et développer les instruments de demain ; il faut d'autre part préparer et former la future génération d'instrumentalistes.

7. Une meilleure exploitation des données spatiales

L'accompagnement des missions spatiales

Recommandation 1

Une approche réellement pluri-organismes de l'accompagnement des missions spatiales nécessite une « contractualisation » des moyens humains et financiers mis au service de la mission par les différents partenaires dès la phase A.

Recommandation 2

Une systématisation des comités inter-organismes par projet, avec engagement des partenaires au travers de revues de moyens, est recommandée.

Recommandation 3

Un soutien fort aux filières d'enseignement existantes ou émergentes dédiées aux sciences spatiales appliquées à la planète Terre est recommandé. Au-delà, il est essentiel que les étudiants inscrits dans les filières de sciences de la Terre aient accès à des modules de formation spécialisés en exploitation de données spatiales.

8. Un cas particulier en observation de la Terre : les surfaces et interfaces continentales (SIC)

Recommandation

Nous recommandons la création d'un pôle thématique spécifique aux surfaces et interfaces continentales avec 4 objectifs :

- développer l'interdisciplinarité avec la biologie fondamentale au-delà des questions agronomiques ;
- fédérer les besoins des acteurs afin d'accroître les collaborations et les synergies nationales et internationales, en particulier autour des thèmes aménagement et gestion des territoires, gestion des ressources, contribution au suivi des grands cycles globaux et de leurs impacts ;
- améliorer, au travers notamment d'actions d'animation scientifique et de formation, l'utilisation de la donnée spatiale par l'ensemble des acteurs au regard des potentialités scientifiques et applications qu'elle offre ;
- mutualiser les outils et ressources d'acquisition, de traitement et de gestion des données afin d'élargir leur utilisation.

Chapitre 3 – Étude et exploitation de l'Univers

1. L'élargissement du champ disciplinaire lié à des nouvelles questions

1.1. Les liens avec les astroparticules

1.2. Les liens avec la physique fondamentale

1.3. Les liens avec les sciences de la Terre : planétologie comparée

Recommandation

Les activités d'équipes développant et testant les modèles d'évolution planétaire (interne, enveloppes fluides ou climat), pour la Terre et conjointement pour les autres planètes du Système solaire ou de systèmes extrasolaires, doivent être encouragées et développées.

1.4. Les liens avec la biologie : exobiologie spatiale

Recommandation

Le secteur de la recherche spatiale a besoin que des structures de type programmes et commissions interdisciplinaires soient mises en place entre physique fondamentale, biologie, astrophysique et sciences de la Terre pour faciliter et inciter les collaborations et échanges de savoir-faire sur ces sujets.

2. L'évolution du périmètre des laboratoires spatiaux

2.1 Les laboratoires d'étude de l'Univers extraterrestre

2.2. Les laboratoires de l'IN2P3 travaillant dans le domaine des astroparticules et de la cosmologie

2.3. Les autres laboratoires travaillant dans le domaine de la physique fondamentale

3. L'évolution du contexte programmatique

3.1. Des missions de plus en plus complexes

Recommandation 1

Nous recommandons fortement l'extension de ce principe à d'autres projets. Les équipes intégrées fourniront la possibilité d'un partage de compétences entre le Centre spatial de Toulouse et les laboratoires pour un certain nombre de profils techniques, d'ingénierie spatiale ou de management (gestion de projet, contrôle qualité, documentation. . .).

Recommandation 2

Les groupes projets des instruments les plus complexes (taille, coût, risques) doivent être constitués de spécialistes des laboratoires et des agences spatiales avec des intervenants industriels pour compléter si nécessaire. Ces équipes peuvent ne pas être géographiquement regroupées.

Recommandation 3

Les laboratoires assurant le pilotage scientifique des grands projets doivent garder néanmoins la capacité de constituer des équipes système comprenant des grandes spécialités techniques spatiales (mécanique, électronique, thermique, logiciels embarqués. . .).

3.2. Un besoin accru de suivi des missions en opération – Observatoire virtuel

Recommandation 1

Il faudra veiller à définir les responsabilités dans l'archivage long terme, qui relève le plus souvent des agences spatiales dès la décision de mission (en particulier pour les petites missions).

Recommandation 2

L'augmentation des besoins en exploitation des missions, liée au nombre de missions en vol et à l'augmentation du nombre des utilisateurs, doit être couverte en partie par les apports en personnel de support des instituts et agences d'où sont issus les nouveaux utilisateurs scientifiques. L'ANR contribue déjà à l'exploitation des données ; un appel d'offre spécifique pour l'exploitation des grandes infrastructures de recherche devrait être proposé.

Recommandation 3

Les dispositions prises suite aux recommandations 1 et 2 doivent tenir compte des spécifications du concept de l'Observatoire virtuel.

3.3. Le rôle essentiel du couplage sol-espace

Recommandation

Les prospectives disciplinaires à moyen et long termes comme celles effectuées par Astronet, discutant des grandes questions scientifiques puis des projets aussi bien sol que spatiaux pour y répondre, sont essentielles et doivent être pérennisées.

Il faut travailler à leur extension à une échelle mondiale, qui pourrait être conduite par les grandes unions scientifiques internationales pour orienter les rencontres entre agences pour la mise en œuvre des projets.

3.4. L'évolution programmatique au Cnes et à l'Esa

Recommandation 1

Le nombre de missions retenues à chaque phase doit résulter d'un compromis : une compétition large au départ du processus et un choix final en bonne connaissance de la faisabilité et du coût, mais sans multiplier les études dans la dernière phase conduisant à trop d'études détaillées utilisant beaucoup de ressources ne débouchant sur aucune réalisation.

Les cycles associant plusieurs missions sont de ce point de vue optimaux tant qu'ils restent dans un calendrier raisonnable vis-à-vis de l'évolution des technologies et des problématiques scientifiques.

Recommandation 2

Il est indispensable de maintenir un volant de petites missions qui permette d'obtenir des résultats sur un sujet très rapidement. Cela permet de former les équipes de chercheurs des grandes missions futures.

La règle de la préférence aux lanceurs européens doit être assouplie pour la classe des satellites de moins de 300 kg pour lesquels il n'y a pas pour l'instant d'offre commerciale en Europe.

Il est essentiel de maintenir une capacité de contribution à des missions d'opportunité, notamment avec la Nasa, qui permettent de remplir certains de ces besoins scientifiques.

3.5. L'importance croissante de la R&T et le rôle des phases 0

Recommandation 1

Il est essentiel de maintenir le niveau relatif des financements de R&T amont par rapport à celui des réalisations et d'exploitations de missions.

Recommandation 2

Nous recommandons que soit mis en place par l'ANR un appel d'offres ciblé (avec des projets pouvant aller jusqu'à 4 ans) sur le développement amont d'éléments d'instrumentation, qui permettrait de maintenir la communauté au meilleur niveau dans la compétition internationale.

4. Propositions d'évolution de l'organisation des laboratoires

4.1. Un moyen national lié aux équipements lourds

Recommandation

Un tel moyen est une excellente initiative dans le contexte actuel. La gouvernance de cette plate-forme demande une instruction en profondeur du dossier.

4.2. Le traitement, l'archivage et la distribution des données

4.3. L'exploitation scientifique

5. Organisation d'un pôle spatial autour de la physique fondamentale

Recommandation

Nous recommandons la mise en place d'un groupe de travail constitué des représentants des équipes de physique fondamentale et d'ingénierie spatiale, issus du Cnes et des laboratoires concernés. Ce groupe travaillera en interaction avec l'Onera et en étroite concertation avec le groupe thématique « physique fondamentale » du Cnes. Il aura pour première mission de faire des propositions partant de ces potentialités.

Chapitre 4 – Science de la vie et de la matière en micropesanteur

Recommandation

Les perspectives en sciences en micropesanteur devront faire l'objet d'une analyse dans le cadre des questions liées à l'avenir des vols habités qui se poseront quand d'autres acteurs non européens auront défini leur politique et que l'opportunité d'une participation européenne et/ou française devra être discutée.

This page intentionally left blank

Groupe de lecture critique

This page intentionally left blank

Membres du Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences

Alain CARPENTIER	Vice-président de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie Curie
Alain BENOÎT	Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au CNRS
Giovanni BIGNAMI	Membre associé de l'Académie des sciences – professeur à l'Instituto Universitario Studi Superiori (IUSS)
Jacques BLAMONT	Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie Curie
Catherine CÉSARSKY	Membre de l'Académie des sciences – Haut Commissaire à l'énergie atomique
Françoise COMBES	Membre de l'Académie des sciences – Astronome à l'Observatoire de Paris
Pierre ENCRENAZ	Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie
Pierre FAYET	Correspondant de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au CNRS – Professeur à l'École polytechnique
Jean-Pierre KAHANE	Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Paris-Sud
Henri KORN	Membre de l'Académie des sciences – Professeur honoraire à l'Institut Pasteur et directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale
Pierre LÉNA	Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Denis-Diderot – Délégué à l'éducation et à la formation

Michel PETIT	Correspondant de l'Académie des sciences – Président de la section scientifique et technique du Conseil général des technologies de l'information
Jean-Loup PUGET	Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au CNRS
Daniel ROUAN	Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au CNRS
Erich SPITZ	Correspondant de l'Académie des sciences – Conseiller du groupe Thales

Les membres du Groupe de lecture critique, désignés par le président ou le directeur général de leur établissement, ainsi que les membres du Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences, ont examiné le texte du rapport puis, au cours d'une réunion qui s'est tenue au Cnes, le 27 mai 2010, 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 ; trois commentaires font l'objet de contributions signées : elles sont présentées ci-après.

This page intentionally left blank

COMMENTAIRE DU COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Yves Caristan

Le CEA a pris note des recommandations du rapport de l'Académie des sciences concernant « L'évolution de la recherche scientifique spatiale française » dans les prochaines années.

Le CEA partage l'ensemble des recommandations de ce rapport qui appellent désormais à une concertation resserrée entre organismes pour passer à une phase de mise en place opérationnelle de ces conclusions.

Le CEA souhaite plus particulièrement mettre en exergue la nécessité de la création d'un Pôle technologique spatial (voir *infra*) en lien avec les paragraphes suivants du rapport :

- paragraphe 2.3.3 « Le contexte national d'organisation de la recherche spatiale » ;
- paragraphe 2.4 « Le rôle des laboratoires ».

Un Pôle technologique spatial au sein du Campus Paris-Saclay

Rappel de la recommandation de la SNRI

Suite aux prospectives de recherche spatiale menées par les organismes de recherche comme le CEA et le CNRS-Insu sous la houlette du Cnes, l'État a souhaité élaborer une vision d'ensemble des défis à relever dans le domaine de la recherche et de l'innovation, afin de définir un certain nombre de priorités, de mettre en cohérence l'action des uns et des autres afin d'optimiser au mieux les financements publics. Cette **stratégie de recherche et d'innovation nationale**, a donc débouché sur une **définition stratégique des priorités du Gouvernement** pour répondre à quatre familles de défis.

L'espace représente un domaine stratégique pour la France et pour l'Europe, non seulement du fait des enjeux de défense et de sécurité qu'il recouvre, mais aussi en raison de ses applications variées, qu'il s'agisse de l'environnement, des télécommunications ou encore du triptyque localisation/navigation/datation par satellite. La recherche et l'innovation dans le domaine spatial concernent des technologies et systèmes génériques, comme les systèmes de lancement ou les plates-formes de satellite, ou des instruments spécifiques aux applications.

La recherche spatiale irrigue de nombreux secteurs scientifiques et industriels. Satellites et sondes sont de formidables outils d'observation pour les sciences de l'Univers, pour celles de la Terre et pour la physique fondamentale. Les missions spatiales utilisent très souvent des technologies pionnières dans des conditions extrêmes. Elles favorisent ainsi le développement de secteurs technologiques avancés et la fertilisation croisée entre recherche et industrie.

Emprunt national et Campus Paris-Saclay

Le CEA a pris note que, parmi les **sept priorités de l'Emprunt national**, le premier concerne « l'enseignement supérieur, la recherche et l'innovation » avec notamment l'accent mis les « Campus d'excellence ».

« Les campus d'excellence doivent réunir sur un site ou une grande région, les meilleures écoles doctorales, les équipes de recherche d'excellence, les meilleures grandes écoles, et ce dans un partenariat étroit avec l'environnement économique. Les dotations associées faciliteront l'appel à des partenariats privés avec des PME locales. »

En réponse aux orientations de la SNRI, le campus d'excellence Paris-Saclay propose une vision scientifique de recherche fondamentale forte structurée autour de grandes thématiques déclinées en douze domaines : le domaine « sciences physiques » et le domaine « climat & environnement » sont parmi les disciplines qui ont un intérêt direct pour l'utilisation de la composante spatiale. Le domaine « sciences et ingénierie du vivant pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement » est un secteur qui à terme peut également manifester son intérêt dans une approche interdisciplinaire.

La stratégie du Campus s'appuie également sur le renforcement ou la création de pôles de compétences multidisciplinaires autour des priorités de la SNRI (voir *supra*).

Le CEA intègre le **spatial dans sa réflexion stratégique** comme une **composante indispensable de la démarche de recherche** fondamentale et notamment comme un **élément technologique clé au service de la science**.

Dans le cadre de la **création d'un pôle de compétence autour de la « physique des 2 infinis » sur le Plateau de Saclay**, le CEA recommande fortement de créer au sein du Campus Paris-Saclay un **pôle technologique transverse d'ingénierie spatiale interdisciplinaire**, s'appuyant sur les différents laboratoires de la zone Paris Sud ainsi **qu'un pôle de traitement des données spatiales en lien avec les données provenant des observatoires-sol**.

This page intentionally left blank

COMMENTAIRE DE LA CONFÉRENCE DES GRANDES ÉCOLES

Frédéric Thivet

Première observation

Le rapport traite de la recherche spatiale dans ses dimensions observation de la Terre et sciences de l'Univers, en intégrant l'aspect instrumentation spatiale. Une troisième dimension devrait être ajoutée pour couvrir l'ensemble du spectre de la recherche spatiale : celui des systèmes spatiaux, incluant, outre l'instrumentation spatiale, les systèmes satellitaires et les lanceurs.

Les progrès récents et importants en matière d'autonomie des systèmes, de capacité d'auto-adaptation du système à des événements ou circonstances extérieures pour la poursuite de sa mission, de reconfiguration de mission, de coopération de systèmes, de vol en formation, ouvrent de toutes nouvelles perspectives en matière de conception de systèmes satellitaires, mais aussi en matière de conception de missions opérationnelles et scientifiques. Il apparaît clairement la nécessité d'intégrer intimement ces possibilités d'évolution des systèmes satellitaires au sein même de la phase de conception des missions scientifiques afin d'orienter les recherches en la matière et d'en tirer tout le parti possible au profit de ces missions.

En matière de systèmes de mise en orbite, plusieurs aspects doivent faire l'objet de recherches, au moins dans deux directions : celles des systèmes de lancement à bas coût en lien avec des concepts de microsattelites, susceptibles d'ouvrir l'accès à l'espace à une nouvelle et très large classe d'utilisateurs scientifiques et opérationnels et de faire émerger de nouveaux marchés ; le deuxième axe de recherche porte sur la conception de nouveaux systèmes de propulsion, tels que la propulsion hybride pilotable ou, à plus long terme, de modes de propulsion électrique ou nucléaire.

Seconde observation

Le rapport souligne que l'organisation ou le développement de filières de formation liées au spatial et à l'utilisation des données spatiales doit être une partie importante des activités des pôles de recherche spatiale français. Il est souligné qu'une réflexion doit être mise en place pour développer les outils de formation

pertinents. Or des plates-formes technologiques mutualisées doivent être mises en place dans ces pôles. Il paraît donc important de proposer que des modalités particulières d'accès à ces plates-formes soient prévues au bénéfice des établissements d'enseignement supérieur et de recherche afin de soutenir le développement de projets d'étudiants, en particulier dès leur entrée en école d'ingénieur. La mise en œuvre effective de tels projets constituerait un facteur attractif décisif de la filière spatiale pour les meilleurs étudiants du système français.

COMMENTAIRE DE L'ONERA

Michel de Gliniasty

Directeur scientifique général

Depuis le précédent rapport de l'Académie des sciences sur le sujet (2005), il me semble que quatre changements importants ont affecté la recherche spatiale :

1. L'évolution du paysage de la recherche français

On pourra retenir trois points plus précis :

- le rôle accru des universités (pris en compte dans le rapport) ;
- la régionalisation (insuffisamment prise en compte dans le rapport à mon sens) ;
- l'ANR, évoquée comme source de financement dans le rapport mais qui pourrait être plus mise à contribution.

2. L'explosion des besoins en observation de la Terre et leur mondialisation liée aux problèmes d'environnement

Cette situation pose plusieurs questions qui ne sont pas toutes traitées dans le rapport :

- quelle répartition entre national, européen, international ?
- comment organiser la gestion, l'archivage, l'accès aux grandes quantités de données générées et comment financer cela dans la durée (traité dans le rapport) ;
- organisation en national entre laboratoires et Cnes (traité dans le rapport) ;

- augmentation du nombre de laboratoires concernés dans le monde et politique d'accès aux données (pas vraiment traité).

3. L'apparition de problèmes d'encombrement

- En ce qui concerne les fréquences (question posée par T. Encrenaz).
- En ce qui concerne les débris (donc corrélativement le nombre de satellites).

Ces deux problèmes ne peuvent être abordés qu'au niveau international (non traité dans le rapport).

4. La crise économique probablement durable

Elle va impliquer plusieurs types d'actions dont la plupart sont mentionnées dans le rapport mais sans référence à de potentielles difficultés budgétaires :

- partage de données avec d'autres, Défense notamment (traité dans le rapport) ;
- mise en compétition, chaque fois que cela est possible, de l'observation spatiale avec l'observation sol (mentionné mais sans insister dans le rapport) ;
- accroissement d'efficacité en regroupant les compétences de type soutien et en structurant les projets (traité dans le rapport) ;
- renoncement à la notion de démonstrateur puis de prototype avant la « série » pour les missions exigeant une continuité d'observation (c'est le contraire qui est demandé dans le rapport) ;
- partenariat public/privé (mentionné dans le rapport).

Présentation à l'Académie
des sciences
par Pierre Léna

Membre de l'Académie des sciences

- 29 juin 2010 -

En 2003, la Commission européenne s'interrogeait sur l'avenir des activités spatiales en Europe et sur son propre rôle, compte tenu de l'existence d'une Agence spatiale européenne active et aux succès nombreux. Cette interrogation prenait la forme d'un *Livre vert*, sollicitant des contributions. Le Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences avait alors fourni une telle contribution, mais il était apparu qu'elle ne dispensait pas d'un travail en profondeur du Comité, travail dont la responsabilité fut alors confiée à Jean-Loup Puget. Un remarquable rapport RST fut ainsi produit en 2005 sous le titre *La recherche spatiale française* (RST N° 22) ; communiqué aux tutelles et aux acteurs du domaine, il eut sans aucun doute un grand impact.

Entre 2005 et 2010, le paysage de recherche de la France a évolué en profondeur, puisque les universités ont acquis autonomie et responsabilités nouvelles (loi de 2007), tandis que le CNRS était restructuré en instituts, cumulait les fonctions d'agence et d'opérateur, enfin qu'apparaissaient des alliances regroupant plusieurs organismes de recherche. Dans le même temps, le paysage spatial évoluait lui aussi sous plusieurs aspects : perspectives de vols habités remises en cause, entrée d'acteurs nationaux nouveaux, crise économique. Mais l'évolution la plus importante est sans doute ce fait majeur : désormais, les données issues de l'espace – observation du système Terre principalement, mais aussi observations et explorations du Système solaire – concernent de très nombreux acteurs et jouent un rôle sociétal essentiel et souvent global : il suffit de penser à la collecte de données autour du changement climatique.

Le Centre national d'études spatiales a donc mis en place en 2009 un groupe de travail inter-organismes, et plus précisément tripartite (Cnes-CNRS/Insu-CEA) avec la participation d'organismes extérieurs (Météo-France, Ifremer...) et de la Conférence des présidents d'université (CPU). La présidence a été confiée à Jean-Loup Puget et le groupe a activement travaillé en 2009-2010, préparant un rapport centré sur les adaptations que le nouveau contexte pouvait requérir.

Il n'était pas illogique que l'Académie des sciences, auteur du rapport de 2005 sur lequel s'appuyait fortement ce récent travail, souhaite compléter son rapport antérieur en le prolongeant par l'adoption d'un texte complémentaire. Le nouveau rapport a été ainsi soumis aux procédures des rapports RST : un groupe de lecture critique, constitué avec le Comité de la recherche spatiale complété d'autres experts, s'est réuni en mai 2010 et a examiné le rapport. De nombreux compléments ont été alors introduits, conduisant à un texte soumis au vote de l'Académie en Comité secret le 29 juin 2010, sur une présentation de Pierre Léna, dont les points principaux sont rappelés ici.

Le rapport est intitulé *L'évolution de la recherche scientifique spatiale française : perspectives à 15 ans*. Ce titre peut prêter à confusion par rapport à

l'objet limité du rapport, et il en fut adopté un autre en séance. En effet ce rapport ne présente pas une vision d'un second âge spatial, 39 ans après Gagarine et le programme Apollo – vols habités vers la Lune et au-delà –, mais il analyse plutôt quelques-uns des enjeux liés à l'épanouissement du premier âge spatial, 43 ans après Spoutnik et les missions automatiques de tous ordres. Le rapport est structuré en quatre parties, précédées d'un résumé exécutif et suivies de recommandations spécifiques et d'annexes. Ces parties s'intitulent : 1. Le contexte général ; 2. Science du système Terre ; 3. Étude et exploration de l'Univers ; 4. Sciences de la vie et de la matière en micropesanteur.

La première partie analyse en détail et selon quatre volets, rappelés brièvement ici, les changements qui se sont amplifiés depuis 2005 et les conséquences à en tirer.

1. Une importance croissante et interdisciplinaire des données spatiales

- Des données jouant un rôle unique et critique pour la science ;
- des données essentielles pour la société (système Terre) ;
- l'apparition de nombreux acteurs et utilisateurs nouveaux (sciences de l'Homme et de la société notamment) ;
- des missions plus complexes aux coûts croissants ;
- des technologies très audacieuses ;
- des durées plus longues séparant l'analyse d'un besoin, la conception d'une mission, son financement, sa réalisation et son exploitation ;
- des moyens plus lourds d'intégration et test ;
- de gigantesques volumes de données (terabytes et au-delà) ;
- un contexte mondial et européen évoluant profondément.

Recommandation. Une évolution du Comité inter-organismes du Cnes est nécessaire : celui-ci devra à l'avenir davantage rassembler utilisateurs, pôles et partenaires technologiques. Une infrastructure nationale regroupant les moyens régionaux d'intégration et de test devra voir le jour, en tant que grand équipement de recherche.

2. Un rôle des ressources humaines plus capital que jamais

- La durée longue des missions (préparation, vol, exploitation) requiert la stabilité des personnels ;
- les technologies toujours plus complexes et la compétition requièrent des compétences pointues ;
- les partenariats européens requièrent à la fois stabilité et mobilité des personnels ;
- l'interdisciplinarité croissante permet des fécondations croisées, à condition d'assurer le dialogue et la circulation de l'information.

Recommandation. Une coopération croissante entre laboratoires, obtenue en favorisant la création d'équipes intégrées, peut seule répondre à ces difficiles et parfois contradictoires exigences. L'implication croissante des universités dans l'usage des données, alors qu'elles sont souvent peu familières avec les exigences du secteur spatial, demande une programmation des moyens universitaires.

3. Un rôle central du Cnes maintenu, mais une nécessaire adaptation à de nombreux nouveaux utilisateurs

- À ressources pratiquement constantes, le Cnes reste central et décisif dans son support aux missions ;
- les instituts du CNRS sont désormais opérateurs et agences : il faut optimiser l'usage croisé des ressources au sein du CNRS ;
- à nouveaux utilisateurs, nouvelles ressources à mettre en place : ceci implique une programmation sur le long terme (les temps caractéristiques de la recherche spatiale dépassent souvent une décennie) concernant à la fois l'ANR et les universités.

Recommandation. L'élargissement progressif, au-delà de la communauté spatiale traditionnelle, des actions situées en amont et aval des missions, implique des évolutions substantielles dans la programmation des organismes et des communautés nouvelles utilisatrices de l'espace.

4. Les sciences en microgravité (matière et vivant)

- Leur développement est largement conditionné par les politiques des puissances spatiales non européennes. Les perspectives de la politique européenne dans ces disciplines dépend donc de décisions à venir ;
- l'extension à 2020 de la Station spatiale internationale (ISS) ne suffit pas à faire une programmation de recherche dans ces domaines.

Recommandation. Un groupe d'analyse prospective devrait être constitué pour analyser sans tarder les évolutions en cours et souhaitables, et préciser le rôle possible de l'Europe.

De la deuxième partie (*les sciences du système Terre*), très soigneusement documentée et enrichie de contributions venant de multiples utilisateurs, retenons quelques messages importants, parmi d'autres rassemblés dans les recommandations finales :

- accroître les connaissances, assurer la continuité des données et le stockage adéquat des nouveaux observables ;
- répondre à une forte demande sociétale ;
- considérer la complémentarité indispensable entre mesures *in situ* et mesures dans ou depuis l'espace. Cette complémentarité s'organiserait au mieux autour de pôles thématiques ;
- les surfaces et interfaces continentales forment un ensemble d'importance capitale, aujourd'hui trop dispersé : *il faut créer sur ce sujet un centre technique national.*

De la troisième partie fort riche (*Étude et exploration de l'univers*) retenons :

- l'apparition de nouvelles frontières : astroparticules, physique fondamentale, planétologie comparée, exobiologie ;
- l'adjonction, aux laboratoires spatiaux traditionnels et historiques, de nombreux nouveaux groupes de recherche n'ayant pas la même expertise spatiale ;
- un couplage de plus en plus fort entre observations depuis le sol terrestre et observations depuis l'espace. Il impose des stratégies de synergie ;
- une instrumentation complexe, coûteuse, où l'innovation dépend de développements faits très en amont : l'ANR doit ici jouer un rôle prospectif ;

- la physique fondamentale est devenue un champ pour l'expérimentation dans l'espace et l'observation depuis l'espace. La constitution d'un pôle spécifique est désormais nécessaire ;
- le suivi des missions et l'interopérabilité de l'ensemble des outils d'observation, ainsi que les volumes de données et le besoin d'y accéder pour une communauté très nombreuse et dispersée, plaident pour un développement du concept d'**Observatoire virtuel**.

Les sciences de la matière et de la vie, comme déjà rappelé plus haut, ne font pas partie du rapport, qui ne traite pas du futur de l'espace en tant que lieu de vols habités et d'exploration du système solaire par ceux-ci. Pourtant à l'évidence, si l'apport de ces derniers aux connaissances fondamentales reste fort limité, leur rôle d'entraînement vis-à-vis des gouvernements et des opinions publiques demeure majeur, et peut-être même la condition des autres volets de l'exploration spatiale, où dominant la recherche fondamentale et les applications sociétales. Il subsiste donc un déséquilibre dans ce rapport, et la recommandation formulée plus haut, qui concerne justement ces secteurs où la décision se situe largement hors des moyens de l'Europe (États-Unis, Chine et encore Russie), est importante.

En conclusion, le rapporteur estime que le titre du Rapport doit être revu, pour mieux mettre ce titre en cohérence avec le texte, qui apporte des éléments d'actualité, tout à fait essentiels. Il est suggéré par exemple : *Les sciences spatiales. Adapter la recherche française aux enjeux de l'espace (2010-2025)*, ou un titre approchant.