



Rapport de synthèse du CERES

Séminaire de prospective scientifique ■ 16-19 mars 2009

5

1. Préambule

Dans le domaine des sciences de l'univers, le séminaire de prospective scientifique de Biarritz a été l'aboutissement d'un exercice engagé sur toute une année, qui a concerné une large fraction de la communauté spatiale. Près d'une centaine de projets ont été reçus suite à l'appel à idées lancé par le CNES en avril 2008. Dès la réception des dossiers, à partir de juin 2008, les cinq groupes thématiques (Astronomie, Système Solaire, Soleil-Héliosphère-Magnétosphères, Physique Fondamentale, Exobiologie,) ont examiné les propositions dont l'évaluation technique a été menée parallèlement par le PASO au CNES. Des échanges avec les proposant ont eu lieu en cas de besoin. Des fiches descriptives de chaque proposition examinée par les groupes thématiques (regroupant éventuellement plusieurs propositions voisines) ont été élaborées par chaque groupe et transmises aux participants au séminaire. Les rapports des groupes ont été finalisés en janvier 2009 puis discutés au sein du CERES en vue de l'élaboration d'une synthèse. Fin janvier 2009, une réunion entre le CERES et les directeurs des laboratoires spatiaux a permis à ceux-ci d'exprimer leurs priorités et leurs messages.

Lors du séminaire de Biarritz, les participants de la communauté des sciences de l'univers et du CNES ont été regroupés en quatre groupes transverses, sans coloration thématique, pour discuter des propositions présentées par le CERES au début du séminaire sur les priorités programmatiques. Les groupes transverses se sont aussi prononcés sur un ensemble de questions portant notamment sur les grands équilibres programmatiques, les questions liées aux processus de décision, les relations entre le CNES et les laboratoires, l'interaction avec les autres communautés et les autres exercices de prospective. La séance de restitution des groupes transverses a mis en évidence une excellente convergence des priorités programmatiques, ce qui illustre le soutien de l'ensemble de la communauté aux propositions décrites dans le présent rapport. Elle a aussi fait émerger des recommandations plus ponctuelles qui sont aussi décrites ci-dessous.

Le séminaire s'est déroulé dans un contexte budgétaire extrêmement contraint, qui ne laissait pas de place à des ouvertures significatives en 2009 et 2010. Dans ce contexte, la communauté a dû prendre acte de l'arrêt de la mission SIMBOL X en fin de phase A, malgré un investissement important de la communauté concernée depuis cinq ans. Prenant acte de cet échec, la communauté s'est positionnée clairement sur quelques priorités très fortes.

- 1) La communauté a réaffirmé son attachement au « socle » de la programmation que constitue l'ESA, via son programme scientifique obligatoire et son programme optionnel d'Exploration (Aurora et ISS). En particulier, elle a recommandé en première priorité l'achèvement des missions en cours Bepi Colombo et ExoMars et une participation significative à l'instrumentation des missions du programme « Cosmic Vision » actuellement en phase A à l'ESA.
- 2) Elle a recommandé le passage en phase C/D du microsatellite TARANIS à l'issue de la phase B.
- 3) Elle a insisté sur l'importance de l'instrumentation à bord de missions d'opportunité, dont le retour scientifique est souvent très élevé au regard de leur coût. Dans ce contexte, elle a recommandé une participation instrumentale (au niveau d'une contribution d'opportunité) à un réseau sismique lunaire, dans la perspective d'une participation ultérieure à un réseau sismique martien. Elle a recommandé la poursuite des expériences d'exposition sur l'ISS.
- 4) Elle a recommandé un certain nombre d'étude de phase O, parmi lesquelles (par ordre de priorité) DADA (Dark Energy Data Analysis), ODYSSEY (gravitation à grande distance) et les ballons planétaires (Vénus, Titan).
- 5) Elle a insisté sur le rôle essentiel de la R&T dans les phases préparatoires de soumission aux appels d'offre, et a proposé un certain nombre d'axes prioritaires à partir des recommandations des groupes thématiques.
- 6) Elle a souligné l'importance croissante des phases d'exploitation des données et d'archivage à long terme, une question qui doit aussi être traitée en concertation avec les autres organismes.
- 7) Sur un plan plus organisationnel, la communauté a soulevé le problème posé par le processus de décision de plus en plus long et tardif, qui se traduit par une grande incertitude au niveau des plans de charge des laboratoires spatiaux.
- 8) Enfin, elle a souligné le besoin d'une concertation étroite entre le CNES et l'INSU, notamment pour l'évaluation des moyens humains et matériels nécessaires à la réalisation et à l'exploitation des missions spatiales, ainsi que pour les problèmes liés à la structuration des communautés et à la synergie sol-espace. Cette concertation devra être étendue aux autres organismes concernés en fonction des besoins et des problèmes traités.

2. Les grands défis des sciences de l'univers : une perspective européenne

L'exploration de l'univers embrasse un large éventail de questionnements scientifiques, allant de la compréhension des lois fondamentales de la physique et de l'origine de l'univers à la naissance et l'évolution des galaxies et des étoiles, jusqu'à la formation des systèmes planétaires et l'origine de la vie, sans oublier la formation et l'évolution de notre système solaire. Dans le cadre de deux exercices de prospective menés dans un contexte

européen, Cosmic Vision par l'ESA et Science Vision par le réseau Astronet, les astronomes ont résumé, de façon très voisine, les enjeux de leur discipline sous forme de quatre grandes questions. La formulation de Cosmic Vision est la suivante :

- Quelles sont les conditions de la formation planétaire et de l'émergence de la vie ?
- Quels sont les mécanismes à l'œuvre dans le système solaire ?
- Quelles sont les lois physiques fondamentales de l'univers ?
- Comment l'univers est-il né, et quels sont ses constituants ?

Ces problématiques rejoignent celles présentées par la communauté des sciences de l'univers lors du séminaire de 2004. A cette occasion, l'accent avait été mis sur la compréhension des relations de l'espace et du temps, de la nature de la matière noire et de l'énergie noire ; l'importance de la phase d'inflation, la formation des galaxies et des grandes structures ; la naissance des systèmes planétaires et des exoplanètes ; sur l'histoire du système solaire et plus particulièrement de la planète Mars ; la recherche de la vie dans le système solaire et au-delà ; les mécanismes à l'œuvre dans la couronne solaire et dans les relations Soleil-Terre.

Toutes ces questions, reprises dans la prospective européenne de l'ESA, sont plus que jamais d'actualité, même si des progrès notables ont été réalisés au cours des cinq dernières années, en particulier grâce à la recherche spatiale. A titre d'exemple, on peut citer deux résultats particulièrement marquants pour lesquels le CNES et les équipes françaises ont joué un rôle déterminant. La mission spatiale COROT, réalisée sous la responsabilité du CNES et lancée en décembre 2006, a permis, en février 2009, la découverte de la plus petite exoplanète connue à ce jour, et aussi de la plus étrange : avec un rayon de moins de deux fois celui de la Terre, cette « super-Terre » tourne autour de son étoile en moins d'une journée. Autre mission à forte participation française, la sonde européenne Huygens de la mission Cassini, opérée conjointement par la NASA et l'ESA, nous a permis, le 14 janvier 2005, de découvrir les premières images du sol de Titan. A côté de ces deux résultats spectaculaires, il faut également noter, parmi les missions à forte participation française, l'exploration de la surface et de l'atmosphère de Mars avec la mission européenne Mars Express, ainsi que l'analyse de la circulation atmosphérique de Vénus avec la mission Venus Express, elle aussi européenne. Les observations à partir des sondes américaines STEREO ont permis de mettre en évidence la structure tridimensionnelle de la couronne solaire ; dans la magnétosphère terrestre, les observations de CLUSTER ont permis d'étudier les phénomènes de reconnexion magnétique dans des vortex de plasma géants. Enfin, toute la communauté astronomique attend beaucoup du lancement, au printemps 2009, des missions Planck et Herschel. Planck réalisera une cartographie complète du fond cosmologique millimétrique; Herschel observera l'univers dans une nouvelle fenêtre spectrale, le domaine submillimétrique.

3. Pourquoi l'espace ?

Les résultats mentionnés ci-dessus n'auraient pas pu être acquis par l'utilisation des télescopes au sol, même de grande dimension. Sol et espace sont complémentaires, mais l'accès à l'espace est indispensable pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, une large gamme du spectre électromagnétique est inaccessible depuis le sol du fait de l'opacité de l'atmosphère terrestre dans les domaines submillimétrique, IR, UV, X et gamma. En infrarouge, les quelques fenêtres atmosphériques ne permettent pas de fournir une couverture spectrale suffisante pour caractériser le spectre des sources infrarouges, ce qui impose également des observations dans l'espace. L'espace permet aussi de s'affranchir de la turbulence atmosphérique. Les observatoires en orbite terrestre peuvent aussi observer en continu les astres (c'est le cas de COROT pour les observations stellaires, et de SOHO pour le Soleil) et permettent le fonctionnement des détecteurs à basse température, avec un moindre niveau de bruit et dans de meilleures conditions de stabilité.

Avec le lancement programmé d'Herschel et de Planck en 2009, les observatoires spatiaux auront couvert la quasi-totalité du spectre électromagnétique. Il reste à acquérir plus de sensibilité, pour voir des objets plus faibles. Ceci implique des télescopes spatiaux de plus grande dimension, des détecteurs plus sensibles, des instruments éventuellement refroidis à des températures inférieures à 0,1 K pour accroître leur sensibilité. Il faut aussi accroître la résolution spatiale des observations, ce qui implique des télescopes à grandes focales (qui seront rendus possibles, en particulier, par le vol en formation) ou des interféromètres spatiaux. En plus du spectre électromagnétique, de nouveaux messagers restent à explorer, comme celui des ondes gravitationnelles, qui nécessite lui aussi le développement de nouveaux récepteurs et de nouveaux collecteurs ; c'est le projet européen LISA.

Les sondes planétaires et cométaires permettent de s'approcher des objets du système solaire pour une étude *in situ* de leur surface, de leur atmosphère et de leur interaction avec l'héliosphère. Après la génération des survols (par exemple Voyager vers les planètes géantes, ou Giotto et Vega vers la comète de Halley) est venu le temps du sondage à distance de longue durée à partir d'orbiteurs dédiés (tel Cassini pour le système de Saturne). L'étape suivante consiste en une exploration *in situ* de la surface par des sondes de descente, comme Huygens à la surface de Titan, les rovers Spirit et Opportunity sur Mars, et la future mission ExoMars. Le troi-

sième volet de cette stratégie consistera en un retour d'échantillons extraterrestres, en provenance d'un astéroïde géocroiseur (comme la mission Marco Polo, présélectionnée par l'ESA dans le cadre de Cosmic Vision) ou de Mars (c'est le projet Mars Sample Return, en préparation à l'ESA et à la NASA).

L'étude de l'héliosphère et des relations Soleil-Terre et Soleil-Planètes nécessite elle aussi une combinaison d'observations de sondage à distance (comme SOHO et STEREO, et dans le futur Solar Orbiter avec une résolution améliorée) et des mesures *in situ* dans les zones de transition de la magnétosphère terrestre (Cluster et peut-être ensuite Cross-Scale) et des magnétosphères planétaires (Cassini, EJSM). Un autre objectif prioritaire de cette discipline est l'accès, au plus près du Soleil, à des mesures *in situ* de la couronne et du vent solaire naissant. Cet objectif est étudié par les projets PHOIBOS à l'ESA et Solar Probe + à la NASA.

Enfin, l'utilisation de la Station Spatiale Internationale permet l'étude de la matière interplanétaire (telle que l'expérience EXPOSE d'étude d'échantillons en exposition interplanétaire prolongée) et la réalisation d'expériences de physique fondamentale en micropesanteur (avec le projet d'horloges à atomes froids PHARAO/ACES). D'autres expériences de physique fondamentale en micropesanteur nécessitent un satellite dédié, c'est le cas de Microscope. L'espace devient ainsi un nouveau laboratoire, présentant des propriétés exceptionnelles parce que c'est une arène libérée des contraintes liées à l'environnement terrestre.

4. Les grands axes de la programmation en sciences de l'univers

L'ampleur des défis scientifiques qui se posent à la communauté des sciences de l'univers demande, de plus en plus, une prise en charge internationale des moyens spatiaux. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) est naturellement le partenaire privilégié du CNES. Le « programme scientifique obligatoire » de l'ESA est l'élément de base de ce partenariat. Financé comme un programme à enveloppe dont le niveau de ressources est décidé lors des Conseils de l'ESA au niveau ministériel, il permet la réalisation de missions ambitieuses, souvent en partenariat avec d'autres agences : c'est le cas par exemple des missions Cassini-Huygens et Bepi Colombo (actuellement en développement) qui sont menées respectivement en collaboration avec la NASA aux Etats-Unis et la JAXA au Japon. La fourniture des instruments scientifiques est, en règle générale, assurée par les pays membres. A côté du programme obligatoire, la France s'investit aussi dans le programme optionnel d'exploration, avec une participation au programme Aurora (axé sur l'exploration de Mars), et au programme d'utilisation de l'ISS, pour des expériences liées à l'exobiologie et, dans un avenir proche, à la physique fondamentale.

A côté du partenariat avec l'ESA, axe principal de la stratégie française, la coopération multilatérale permet, avec des degrés d'investissement divers, des opportunités supplémentaires. Les missions peuvent être d'initiative nationale, comme par exemple COROT, ou faire l'objet d'un partenariat bilatéral ou multilatéral ; c'est le cas de la mission SVOM, menée en collaboration avec la Chine, dédiée à l'étude des sursauts gamma. Enfin, la France peut participer à la fourniture d'instruments sur des missions d'initiative extérieure : c'est le cas des missions américaines STEREO pour l'étude du Soleil et MSL-11 vers Mars.

Quel que soit le contexte de leur développement, les missions spatiales se réalisent toujours en collaboration étroite entre le CNES et la communauté scientifique. Celle-ci est à l'origine du choix des problématiques scientifiques et des propositions qui sont discutées à l'occasion des séminaires de prospective du CNES.

5. La communauté des sciences de l'univers

L'exploration spatiale des sciences de l'univers s'est d'abord axée sur la magnétosphère terrestre, la physique solaire, l'étude du système solaire et l'astronomie. Depuis une dizaine d'années, elle s'est ouverte à de nouvelles disciplines, la physique fondamentale et l'exobiologie. Au CNES, l'évaluation et la prospective scientifique des sciences de l'univers sont maintenant menées au sein de cinq groupes thématiques : Astronomie, Système Solaire, Soleil-Héliosphère-Magnétosphères (SHM), Physique Fondamentale et Exobiologie.

Parallèlement à l'élargissement des champs scientifiques, la communauté scientifique spatiale concernée par les sciences de l'univers s'est considérablement accrue. Concentrée il y a une vingtaine d'années dans une douzaine de laboratoires spécialisés dans la fourniture d'instrumentation spatiale, elle regroupe aujourd'hui plus d'une trentaine d'unités de recherche participant à des titres divers à l'exploration spatiale. On y trouve la quasi-totalité des laboratoires d'astronomie (au sens du CNRS/INSU), impliqués soit dans la préparation et la réalisation d'instruments, soit dans les développements de logiciels associés, ou l'analyse et l'archivage des données spatiales. A ces laboratoires s'ajoutent des unités de recherche de physique fondamentale, de physique des particules, des sciences de la Terre et d'exobiologie.

Une autre évolution notable, qui va de pair avec les précédentes, est l'évolution des métiers de la recherche spatiale. Travaillant approximativement à moyens constants en termes de budgets et plutôt décroissants en termes de personnels, la communauté spatiale, face à l'élargissement des thématiques et des enjeux, s'est spécialisée sur les métiers relevant plus spécifiquement de la compétence des laboratoires de recherche. C'est ainsi que les activités « amont » (concepts, pré-études, prototypage d'instruments) ont été favorisées, de même que les activités « aval » (recettes, calibration et tests des instruments), la réalisation des instruments elle-même étant de plus en plus sous-traitée au monde industriel. Les laboratoires se sont aussi davantage investis dans les développements logiciels, pour la préparation des missions et des instruments mais, aussi et surtout, pour le traitement des données, leur analyse et leur archivage.

La profonde mutation observée aujourd'hui dans la communauté des sciences de l'univers soulève des questionnements et nécessite des évolutions sur lesquelles nous reviendrons ci-dessous (voir 7.4 et 7.5).

6. Bilan des cinq dernières années et état des lieux

Lors du séminaire de prospective de 2004, la communauté avait réaffirmé son très fort soutien aux missions réalisées dans le cadre ESA (missions du programme Horizon 2000+ et du programme Aurora) ; elle était alors dans l'attente du premier appel d'offres associé au nouveau programme Cosmic Vision. En parallèle, l'accent avait été mis sur d'autres filières (vol en formation, microsatellites) ainsi que sur les collaborations bilatérales et l'instrumentation pour les missions d'opportunité. Parmi les projets prioritaires et/ou recommandés pour des études ou des phases O/A, certains ont pu se poursuivre, parfois dans un contexte différent de celui initialement prévu ; en revanche, l'un d'entre eux, SIMBOL X, a dû être abandonné (voir 7.2.2).

6.1. L'évolution des thématiques et de la programmation spatiale

6.1.1. Astronomie

Dans le domaine de la cosmologie, la question fondamentale, posée depuis les résultats de WMAP et de BOOMERANG, reste la nature de la matière noire et de l'énergie noire, ainsi que l'origine de l'inflation. La mission Planck, dont le lancement a eu lieu le 14 mai, apportera une contribution décisive à cette question par l'étude des anisotropies du fond diffus cosmologique (CMB). L'étape suivante consistera à détecter une contribution aux anisotropies du CMB provenant d'un champ d'ondes gravitationnelles primordiales. Le projet BPOL, soumis à Cosmic Vision mais non sélectionné, constitue le prolongement du projet Sampan, sélectionné par le CNES en 2004 pour une étude de Phase O. Parallèlement, le projet d'imagerie grand champ, destiné à l'étude de l'énergie noire et proposé pour une phase O en 2004 (projet DUNE) a été pré-sélectionné dans le cadre de Cosmic Vision (projet EUCLID). La Mission pour l'Energie Noire (MEN, mission étudiée actuellement en partenariat ESA/NASA¹) qui en est le prolongement constitue aujourd'hui la première priorité de la communauté des astrophysiciens qui soutient fortement l'investissement de la France dans un pôle de traitement des données d'énergie noire.

L'étude des galaxies les plus lointaines qui rayonnent principalement dans l'infrarouge va bénéficier des observations du satellite Herschel, lancé avec Planck le 14 mai 2009 et, plus tard, de celles du JWST, dont le lancement est prévu en 2014. Le projet SPICA présélectionné à l'ESA se situe également dans cette perspective. Une autre sonde de l'univers jeune réside dans l'étude des sursauts gamma : c'est l'objectif de la mission franco-chinoise SVOM. Toujours dans le domaine des hautes énergies, les observations X et gamma permettent d'étudier entre autres l'accrétion et l'éjection de matière dans des systèmes astrophysiques très variés ; les missions en opération sont INTEGRAL, XMM-Newton et plus récemment FERMI (ex GLAST). Deux projets sont prioritaires pour la communauté française, la mission SIMBOL X, sélectionnée en 2004 par le CNES pour une phase O dans le cadre du vol en formation, et l'ambitieuse mission IXO, pré-sélectionnée dans le cadre de Cosmic Vision et actuellement à l'étude dans un partenariat ESA/NASA/JAXA. Pour des raisons budgétaires, la mission SIMBOL X a dû être abandonnée, au grand regret de la communauté (voir 7.2.2).

Dans le domaine de la physique stellaire et galactique, Gaia, pierre angulaire du programme Horizon 2000+, fournira les paramètres stellaires de tous les types d'étoiles avec une précision inégalée. Dans la lignée de la mission astrométrique Hipparcos, la France est très fortement impliquée dans le segment sol de la mission Gaia, dont le lancement est prévu pour 2012.

Une autre priorité forte de l'astrophysique est la physique des systèmes planétaires et des exoplanètes. Avec le succès de la mission COROT, la France occupe aussi une place de choix dans le domaine de la détection et la caractérisation des exoplanètes. La mission PLATO, présélectionnée dans le cadre de Cosmic Vision, se positionne dans la poursuite de cette recherche.

1. Situation en mars 2009.

6.1.2. Système solaire

Dans le domaine de la planétologie, la communauté scientifique française connaît son âge d'or avec l'exploitation simultanée de Cassini-Huygens, de Mars Express et Venus Express, trois missions dans lesquelles elle a joué un rôle majeur. La mission Rosetta, pierre angulaire du programme Horizon 2000+ de l'ESA, atteindra son objectif, la comète Churyumov-Gerasimenko, en 2014, après deux survols d'astéroïdes. Deux autres grandes missions de l'ESA, actuellement en préparation, mobilisent la communauté : Bepi Colombo vers Mercure et ExoMars vers Mars. Des participations instrumentales sont aussi fournies sur la mission américaine MSL-11 (exploitation *in situ* de Mars) et la mission russe PHOBOS-GRUNT (retour d'échantillons du satellite Phobos de Mars). Enfin, les équipes françaises ont été très présentes dans les réponses à l'appel d'offres de Cosmic Vision, avec la présélection des missions EJSM et TSSM vers Jupiter et Saturne respectivement (suivie de la sélection récente de EJSM devant TSSM), et la présélection de Marco Polo vers un astéroïde géocroiseur.

6.1.3. Soleil, Héliosphère, Magnétosphères

En ce qui concerne la physique de l'héliosphère (couronne solaire, relations Soleil-Terre, magnétosphères planétaires), la communauté bénéficie elle aussi de plusieurs missions en exploitation : Ulysses, SOHO, Cluster, STEREO, Cassini. Le microsatellite Picard, dédié à l'étude de la variabilité solaire et de son influence possible sur le climat, verra son lancement dans l'année qui vient.

Parmi les missions à venir, la mission Solar Orbiter, maintenant considérée dans le cadre de Cosmic Vision, est, avec Bepi Colombo, la première priorité de la discipline pour le programme obligatoire de l'ESA. Au niveau national et multilatéral, le microsatellite TARANIS, axé sur l'étude du couplage atmosphère-ionosphère-magnétosphère terrestre et sélectionné par le CNES pour une phase A en 2004, constitue la toute première priorité de la communauté. L'autre priorité est le microsatellite franco-chinois SMESE lui aussi issu de la prospective de 2004, pour l'étude à différentes longueurs d'onde des phénomènes éruptifs solaires. Malheureusement, le CERES constate que l'absence d'ouverture budgétaire en 2009 et 2010 ne rend pas possible la réalisation de cette mission, dont le calendrier est fortement dépendant du cycle solaire. A plus long terme, l'étude *in situ* de la couronne solaire et du vent solaire naissant à moins de 10 rayons solaires (projets PHOIBOS à l'ESA ou Solar Probe + à la NASA) est fortement soutenue par la communauté SHM.

6.1.4. Physique Fondamentale

La communauté de physique fondamentale est entrée récemment dans l'ère spatiale, avec la mise en orbite de T2L2, expérience de transfert de temps par télémétrie laser embarquée à bord du satellite altimétrique Jason 2, lancé en 2008. D'autres projets spatiaux sont en développement : le microsatellite Microscope, destiné aux tests du principe d'équivalence, et PHARAO, horloge à atomes froids destinée à voler sur l'ISS à l'horizon 2013 dans le cadre du projet international ACES, principal outil de test de la relativité générale dans l'espace, destiné à la mise en réseau de toutes les horloges atomiques au sol, dans les domaines optique et micro-onde. Enfin, la communauté de physique fondamentale réaffirme sa priorité pour l'ambitieuse mission européenne LISA, dédiée à la détection des ondes gravitationnelles dans le domaine 0,1-100 mHz, et présélectionnée dans le cadre de Cosmic Vision. Les projets futurs de cette discipline portent sur les tests de la loi de gravitation à grande distance (projet Odyssey et instrument GAP sur EJSM) et la poursuite de la synchronisation depuis l'espace d'horloges atomiques (projet GEOSTAR).

6.1.5. Exobiologie

La communauté des exobiologistes s'intéresse à la recherche de formes ou de traces de vies extraterrestres, ainsi qu'à l'origine de la vie terrestre. Dans le domaine spatial, son intérêt se porte sur des missions de natures très diverses, puisque les thématiques qui la concernent font appel à la fois aux sciences de l'univers, aux sciences de la Terre, à la physique, la chimie et la biologie.

La première priorité des exobiologistes porte sur la poursuite et l'achèvement de la mission ExoMars avec une charge utile d'exobiologie, conformément à l'objectif scientifique principal affiché pour cette mission. A plus long terme, ce programme se positionne dans la perspective du retour d'échantillons martiens, une priorité affichée depuis plusieurs années par les planétologues et les exobiologistes. Les autres priorités de l'exobiologie concernent le traitement des échantillons de Phobos dont le retour est attendu dans le cadre de la mission Phobos Grunt, et la poursuite des expériences d'exposition à bord de l'ISS. La communauté marque aussi son intérêt pour les missions planétaires EJSM et Marco Polo, ainsi que pour la mission Plato et les projets futurs liés à la caractérisation des exoplanètes.

6.2. L'évolution de la programmation en sciences de l'univers

Des évolutions importantes ont vu le jour depuis le séminaire de prospective de 2004, tant dans le cadre européen que dans le cadre multinational.

6.2.1. Les programmes de l'ESA

La première évolution est la sortie du premier appel d'offres Cosmic Vision du programme obligatoire de l'ESA. Les neuf missions actuellement présélectionnées par l'ESA pour une étude de Phase A (incluant Solar Orbiter) sont toutes à participation française, dont quatre à PI français. La toute première recommandation concernant Cosmic Vision est de conforter ce succès en demandant au CNES un soutien suffisant pour les phases A/B1 des missions candidates puis les phases B2/C/D des missions qui seront finalement sélectionnées.

Au sein du programme obligatoire de l'ESA, d'autres évolutions ont eu des conséquences moins heureuses. Les surcoûts constatés sur Bepi Colombo, pierre angulaire du programme Horizon 2000+, ont nécessité une ré-évaluation de la mission, dont le coût total sera connu en juin 2009. La mission Solar Orbiter a dû elle aussi être remise en question pour des raisons de surcoût, pour être finalement ré-évaluée dans le cadre des présélections de Cosmic Vision. A ces problèmes budgétaires s'ajoutent ceux des surcoûts de Planck-Herschel et de LISA-Pathfinder, du programme obligatoire de l'ESA, et aussi celui de la mission ExoMars du programme optionnel Aurora, dont la gravité pourrait à terme remettre en cause l'ensemble du programme d'exploration de Mars (voir 7.2.1).

6.2.2. Le cadre multilatéral

Des problèmes budgétaires apparaissent aussi dans le cadre de la programmation bilatérale et multilatérale du CNES, notamment dans le cas des projets SVOM et SIMBOL X, suite à des contraintes ou des défections liées à nos partenariats. Le cas de SIMBOL X est discuté ci-dessous (voir 7.2.2.)

Le projet de minisatellite SVOM, mené en partenariat entre la France et la Chine, se situe dans le prolongement du projet de microsatellite ECLAIRs, sélectionné pour une phase A lors du séminaire de 2004. L'objectif est l'étude des sursauts gamma les plus lointains par observations simultanées en optique, X et gamma. Le projet a été décidé dans le cadre d'un accord international, alors qu'il était encore en phase A. L'étude de phase A de la mission a depuis mis en évidence une augmentation significative des coûts du projet ; des incertitudes apparaissent aussi dans le financement de l'une des caméras X, ainsi que celui du télescope de suivi sol qui doit lui être impérativement associé. La communauté regrette qu'une décision d'engagement ait été prise avant la fin de la phase A. Elle rappelle la nécessité de mieux maîtriser les coûts du projet et propose la mise en place d'un groupe de travail pour le suivi du retour scientifique du projet.

6.3. Les questionnements de la communauté scientifique

Les aléas budgétaires et programmatiques, quelle qu'en soit l'origine, alimentent un climat d'incertitude qui inquiète la communauté des laboratoires spatiaux des sciences de l'univers. En effet, ils impliquent dans tous les cas un retard dans les décisions d'acceptation des missions. Pour le programme multilatéral, cette situation fait que les instruments sont souvent en avance sur la mission elle-même (comme c'est le cas pour SVOM et SIMBOL X). Côté ESA, le processus de sélection Cosmic Vision, parmi les différentes missions présélectionnées, n'interviendra pas avant 2011. Ce calendrier permet la poursuite simultanée d'études de phase A sur plusieurs missions, conformément aux conclusions du Comité de Revue du Programme Scientifique de l'ESA (SPRT) qui, en 2007, recommandait une décision plus tardive des missions, afin d'en mieux maîtriser les coûts. Les études de phase A et B1 sur l'instrumentation sont essentielles pour montrer la maturité technologique des missions candidates. Il en résulte pour les laboratoires spatiaux la nécessité de s'investir dans des phases A et B1, sans assurance d'une sélection ultérieure, d'où une grande incertitude sur leurs plans de charge.

Ces difficultés s'ajoutent aux évolutions du contexte déjà mentionnées ci-dessus : besoin de prendre en charge les phases de traitement, d'analyse, d'exploitation et d'archivage des données, au moment où les contrats de post-doctorants, bien qu'en augmentation, restent notablement insuffisants par comparaison aux pays anglo-saxons, et où le potentiel de personnels permanents, chercheurs et ITA, tend à diminuer. L'élargissement de la communauté déjà mentionnée ne fait que renforcer les difficultés dans un système à moyens globalement constants. Ceci illustre la nécessité d'assurer une interface beaucoup plus étroite avec les autres tutelles de la discipline (INSU notamment) et de se tourner vers les pourvoyeurs de fonds extérieurs (ANR, Union Européenne).

7. Messages et recommandations

7.1. Les grands équilibres

Lors des séminaires de prospective antérieurs, la communauté des sciences de l'univers a toujours manifesté son soutien à l'équilibre entre le programme obligatoire de l'ESA, première priorité des scientifiques, et un programme multilatéral incluant des participations de volume budgétaire variable, mais à fort retour scientifique potentiel. Après le succès des équipes françaises au premier appel d'offres de Cosmic Vision, la communauté française est plus que jamais attachée à sa composante européenne, et notre recommandation au CNES porte,

en première priorité, sur un accompagnement suffisant (en termes de budget de phases A/B1, et de soutien à la R&T) à l'instrumentation des missions présélectionnées dans le cadre de Cosmic Vision. Le programme scientifique obligatoire de l'ESA constitue donc plus que jamais le socle de notre programmation.

La forte priorité affichée aux programmes de l'ESA s'applique également au programme optionnel d'exploration (Aurora et ISS). Il est toutefois vivement souhaité que les processus de sélection au sein du programme d'exploration se rapprochent, autant que faire se peut, de ceux du programme obligatoire de l'ESA.

Les réponses reçues suite à l'appel d'offres préparatoire au séminaire de Biarritz n'ont pas indiqué de forte pression pour des missions de type microsattelites. A l'exception de la communauté SHM dont certains objectifs peuvent encore être atteints par des microsattelites, il semble que les enjeux scientifiques d'aujourd'hui s'accordent mal des limites associées à ce cadre, et nécessitent des missions plus ambitieuses. Les délais de réalisation des microsattelites, sensiblement plus longs que ceux initialement annoncés, sont aussi peut-être responsables de cette relative désaffection. En revanche, un très fort intérêt est manifesté pour les missions d'opportunité qui offrent la possibilité d'obtenir, pour un coût réduit, un retour scientifique important. Elles permettent aussi d'entretenir et développer le savoir-faire des communautés et leur positionnement international, dans un contexte où les missions (européennes ou bilatérales) tendent à se faire plus rares.

En ce qui concerne les missions menées dans le cadre multilatéral, la communauté s'inquiète des surcoûts rencontrés, pour diverses raisons, dans le cas de certains projets. Elle considère que le coût complet d'une mission menée dans le cadre des minisattelites ne devrait pas dépasser 1,5 fois le budget annuel, en dépenses externes, du programme Etude et Exploration de l'Univers.

7.2. Les grandes lignes d'une programmation en sciences de l'univers

Sur la base des recommandations des groupes de travail, et suite aux échanges avec la communauté, le CERES recommande au CNES la mise en œuvre des projets présentés ci-dessous.

7.2.1. Passage en Phase B2/C/D

7.2.1.1. Bepi Colombo et ExoMars, sous réserve d'une redéfinition des missions dans des coûts compatibles avec les ressources disponibles.

Bepi Colombo, pierre angulaire du programme Horizon 2000+ de l'ESA, est dédiée à l'exploration de Mercure. Les objectifs principaux sont l'étude de la surface et de la structure interne du satellite (pour comprendre en particulier l'origine de son champ magnétique) et l'interaction de la planète avec le vent solaire. La mission se compose de deux orbiteurs, l'un, sous responsabilité ESA, pour la science planétaire, et l'autre, développé par la JAXA, pour l'étude de la magnétosphère. En 2008, des surcoûts liés à un surcroît de masse et un changement de lanceur ont conduit à une redéfinition de la mission et à une ré-évaluation du budget total. Les participants au séminaire et le CERES réaffirment leur attachement à une mission déjà largement engagée (en particulier pour ce qui est des instruments) mais insistent sur la nécessité de maintenir son potentiel scientifique.

ExoMars, première mission du programme Aurora, est menée dans le cadre du programme optionnel Exploration de l'ESA. Il s'agit d'une mission d'exploration robotique de Mars, avec pour premier objectif scientifique la recherche d'éventuelles traces de vie et d'habitabilité. Elle a aussi un fort enjeu technologique, dans la perspective d'un programme futur de retour d'échantillons martiens. Suite à un niveau d'engagement insuffisant des pays membres, la mission est actuellement en phase de redéfinition à l'ESA, avec une réduction prévisible de la charge utile et une recherche de partenaires extérieurs. La communauté rappelle son très fort attachement à cette mission, étape incontournable dans le programme européen d'exploration martienne. Nous soutenons donc la réalisation d'ExoMars en partenariat avec la NASA et la poursuite d'un programme multi-missions ESA/NASA dans la perspective du projet Mars Sample Return. Il est rappelé que la priorité donnée à une mission de retour d'échantillons martiens a été affichée à plusieurs reprises à l'occasion de séminaires de prospective du CNES.

7.2.1.2. TARANIS

Le microsattelite TARANIS a pour objectif l'étude des phénomènes lumineux transitoires et des flashes gamma terrestres observés au-dessus des zones orageuses terrestres ; plus généralement, il vise à étudier tous les transferts impulsifs d'énergie entre la haute atmosphère et l'environnement spatial de la Terre. Le projet a été sélectionné pour une phase A lors du séminaire de prospective de 2004. Des problèmes relatifs à la fourniture de l'un des instruments, initialement prévue par un partenaire étranger, ont trouvé une solution dans un contexte national. Suite au succès de la phase A et au bon déroulement de la phase B actuellement en cours, la communauté soutient la recommandation du CERES : après l'achèvement de la phase B, passage en phase C/D du projet.

7.2.2. Missions candidates à un passage en Phase B : recommandations du CERES

7.2.2.1. SIMBOL X

La mission SIMBOL X est un observatoire en rayons X durs. Elle a été sélectionnée en 2004 pour une phase O dans le cadre de l'appel d'offres relatif au vol en formation, puis sélectionnée pour une phase A en 2006 dans un cadre bilatéral avec l'Italie, à responsabilités également partagées. En 2008, la défection du partenaire italien a obligé le CNES à rechercher des solutions de moindre coût et de nouveaux partenaires. En dépit du fort intérêt manifesté par plusieurs pays européens, il est apparu lors du séminaire de Biarritz que la réalisation du projet n'était pas possible compte tenu de l'absence d'ouverture budgétaire suffisante.

La communauté s'est fortement émue de cette situation, et ne comprend pas le processus qui a mené à cette situation. Elle considère qu'un projet de cette ampleur, à forte composante technologique, n'aurait pas dû émarquer au seul programme des sciences de l'univers. Elle réaffirme que le projet a toujours une forte justification scientifique et souhaite que les acquis de la phase A puissent être réutilisés ultérieurement dans un autre contexte.

7.2.2.2. SMESE

Le projet de microsatellite SMESE est dédié à l'étude de la couronne solaire, par analyse de l'accélération des particules énergétiques solaires et la génération des éjections de masse coronale. Son instrumentation comporte de l'imagerie Lyman α (issue du projet LYOT, déjà proposé pour une phase O au séminaire de 2004), de la photométrie dans l'infrarouge lointain et de la spectrométrie X et gamma. La communauté reconnaît l'intérêt scientifique de ce projet innovant, qui est cependant pénalisé par une forte contrainte calendaire liée au cycle solaire. Compte tenu des très faibles ouvertures budgétaires annoncées, la communauté soutient la recommandation du CERES selon laquelle le passage en phase B de ce projet ne doit être considéré que si son passage en phase C/D est envisageable dans un calendrier compatible avec le cycle solaire.

7.2.3. Soutien aux Phases A de Cosmic Vision et passage en Phase A

7.2.3.1. Missions en phase A dans le cadre de Cosmic Vision

La communauté recommande en très haute priorité le soutien du CNES pour l'instrumentation des missions actuellement en Phase A à l'ESA, présélectionnées dans le cadre de Cosmic Vision : MEN, Solar Orbiter, Cross Scale, Marco Polo, PLATO, SPICA, pour les missions M ; EJSM, LISA, IXO pour les missions L. Après l'achèvement des missions Bepi Colombo et ExoMars, le soutien à l'instrumentation des missions du programme obligatoire de l'ESA est la toute première priorité de la discipline (voir 7.1).

7.2.3.2. Missions d'opportunité

Les participants au séminaire ont insisté sur l'importance de poursuivre une politique de fourniture d'instruments à bord de missions d'opportunité, dont le retour scientifique est souvent très élevé au regard de son coût. Dans cette catégorie, les recommandations portent sur :

- une participation instrumentale (à la hauteur d'une contribution d'opportunité) à un réseau sismique lunaire, dans un contexte multilatéral impliquant la NASA ou la JAXA. Au-delà de son intérêt scientifique intrinsèque, ce réseau devrait constituer une première étape vers un réseau sismique martien, classé parmi les premières priorités scientifiques par la communauté des planétologues lors des séminaires de prospective antérieurs, mais dont la programmation n'apparaît pas envisageable à court terme aujourd'hui. Ce programme permet aussi la valorisation d'une forte expérience technologique déjà développée au Centre Spatial de Toulouse (CST).
- une participation au projet JEM-EUSO, mission d'opportunité japonaise dédiée à l'étude des rayonnements cosmiques d'extrême énergie par l'analyse des gerbes cosmiques (voir également 7.3).

7.2.4. Etudes de Phase O

Plusieurs études de phase O sont recommandées qui pourront donner lieu à des propositions ultérieures dans divers cadres : ESA essentiellement, mais aussi cadre multilatéral.

L'étude en phase O de l'opération DADA (Dark Energy Data Analysis), qui concerne l'analyse des données de la future mission d'Énergie noire MEN, est placée en première priorité. Une étude de phase O est aussi recommandée pour la mission ODYSSEY (gravitation à grandes distances), ainsi que sur le développement de ballons planétaires. Celui-ci concerne les missions EVE vers Vénus et TSSM vers Titan. Suite à l'appréciation scientifique très positive émise par l'ESA et la NASA au terme de la compétition entre EJSM et TSSM, une étude de phase O est recommandée pour la montgolfière de TSSM, afin de lever les points durs techniques identifiés dans les rapports de l'ESA.

Dans un deuxième temps, et si les ressources le permettent, des études de phase O pourront être menées sur une mission vers les astéroïdes Troyens, la mission bisatellitaire IMEDIA d'étude des aurores, et la mission Geostar pour la synchronisation des horloges atomiques sol et espace. Il est important cependant de conserver

une possibilité de réaction rapide en cas d'évolutions imprévues du contexte programmatique.

7.3. Etudes de R&T

La communauté insiste sur le rôle essentiel qu'ont joué les études préparatoires de R&T pour un grand nombre de projets actuellement évalués au CNES et/ou à l'ESA. Elle note que le soutien du CNES dans le domaine de la R&T et des phases O a été déterminant dans le succès des propositions françaises au premier appel d'offres de Cosmic Vision. Elle encourage la coordination entre l'élaboration du programme de R&T du CNES et les priorités affichées par les groupes thématiques, ainsi que le suivi de ces programmes par ces groupes.

Un soutien technique est demandé pour les projets BPOL, FIRI et Exoplanètes qui seront probablement soumis comme missions L à l'ESA dans le cadre d'un appel d'offres ultérieur. Après l'évaluation technique des points les plus critiques, et dans le cas de la mission Exoplanètes, après la définition d'une feuille de route relative à cette thématique, le CERES soutient la poursuite de travaux de R&T concernant ces trois projets. Une étude technique est aussi recommandée pour l'instrumentation de JEM-EUSO, mission d'opportunité japonaise dédiée à l'étude des rayonnements cosmiques d'extrême énergie par l'analyse des gerbes cosmiques.

Plus généralement, les axes prioritaires de R&T mis en avant par les groupes thématiques sont soutenus par le CERES:

- Astronomie : matrices de bolomètres, vol en formation, cryogénie spatiale (milliKelvin), focalisation gamma, détection cohérente, techniques coronographiques ;
- Système solaire : instrumentation *in situ*, datation *in situ*, ballons planétaires (Vénus, Titan) ;
- SHM : imagerie UV, imagerie X, fonctionnement dans les ceintures de radiation ;
- Physique fondamentale : accéléromètres, capteurs inertiels, horloges à atomes froids, optique laser ;
- Exobiologie : détection et analyse *in situ* de molécules organiques, spectrométrie de masse.

Une collaboration plus étroite est souhaitée entre la prospective scientifique du CNES et la prospective Ballons, dans la mesure où certains projets (ballons planétaires, CIDRE, Gerbe 3D) émergent aux deux exercices de prospective.

7.4. L'importance de la phase d'exploitation et d'archivage des données spatiales

Nous avons déjà mentionné ci-dessus l'importance croissante des phases d'exploitation et, à terme, d'archivage des données spatiales. Cette tendance n'est pas propre à l'astronomie spatiale mais accompagne, dans le domaine de l'astronomie, le développement croissant de l'Observatoire Virtuel (OV). Dans le cas des projets spatiaux, les problèmes se posent à deux niveaux :

- L'exploitation des données fraîchement acquises nécessite le recrutement d'un nombre de post-doctorants conséquent pour en assurer le retour scientifique maximum. En dépit des progrès réalisés au cours des dernières années, la France reste en net retard par rapport aux pays voisins, ce qui la pénalise fortement dans la phase de première exploitation (« écrémage » des données). Le CERES recommande au CNES de poursuivre et développer sa politique d'embauche de post-doctorants en les affectant prioritairement à l'exploitation des données spatiales. D'autres sources de financement (CNRS, UE, ANR, Régions ...) doivent aussi être recherchées.
- Si le CNES soutient l'exploitation des données pour une période de deux ans suivant la fin d'une mission, ce n'est plus le cas ensuite ; de plus, le problème de l'archivage à long terme des données de niveau 2 et plus est posé. Il faut aussi étudier la question de la coordination avec l'Observatoire Virtuel. Une réflexion avec d'autres organismes est nécessaire, de même que la recherche de fonds auprès d'instances internationales (réseaux européens).

7.5. Les relations entre le CNES et les laboratoires

Au-delà de la douzaine de laboratoires « spatiaux » qui fournissent de l'instrumentation pour les sondes spatiales, la quasi-totalité des laboratoires des sciences de l'univers ont, de près ou de loin, des activités spatiales. Celles-ci peuvent concerner le développement de logiciels pour les phases de préparation des missions ou d'exploitation des données, ou, plus souvent, le traitement et l'analyse des données, voire leur archivage à long terme.

La communauté note la très bonne interaction existant actuellement entre les équipes du CST et les laboratoires. Elle reconnaît le bien-fondé d'une maîtrise d'œuvre CNES dans le cas des instrumentations complexes. Elle considère aussi que l'expérience des équipes intégrées CNES-laboratoires, telles celles de COROT et de ChemCam/MSL-11, est exemplaire et doit être renouvelée. Cependant, elle s'inquiète des problèmes posés au sein des laboratoires spatiaux par les retards rencontrés dans les processus de décision des missions spatiales, tant à l'ESA que sur le plan multilatéral (voir 6.3). Ces retards de décisions se traduisent par une grande incertitude dans les plans de charge de ces laboratoires qui, de plus, ne peuvent pas se contenter de travailler

exclusivement sur des avant-projets. Compte tenu des problèmes liés aux départs à la retraite des personnels, il s'en suit un risque certain de perte de savoir-faire. Il est demandé au CNES qu'un dialogue s'installe entre la direction et les laboratoires spatiaux pour réfléchir à une redéfinition des métiers du spatial. S'il est admis qu'une part accrue des activités de réalisation pourra passer en sous-traitance, les laboratoires spatiaux insistent sur la nécessité absolue de conserver les métiers-clés « amont » (définition, pré-études, prototypage) et « aval » (recette des sous-systèmes, calibration, tests). La communauté préconise la tenue de réunions régulières entre la DSP/E2U et les directeurs des laboratoires spatiaux pour mener cette réflexion.

L'accent est également mis sur la nécessité d'améliorer la communication auprès du public, afin de mieux valoriser le retour scientifique des missions spatiales développées et exploitées dans les laboratoires. Nous suggérons la mise en place d'un groupe de travail incluant des personnels du CNES et des laboratoires, ainsi que des professionnels de la communication.

7.6. Les relations inter-organismes

Les réflexions menées au sein de la communauté scientifique ont clairement fait ressortir le besoin impérieux d'une collaboration entre le CNES et les autres organismes pourvoyeurs de moyens matériels et humains. Le premier concerné est l'INSU. Interviennent également, à des degrés divers, l'IN2P3, le CEA, les universités, l'ONERA, l'Observatoire de Paris ... Le CERES recommande instamment la mise en place d'un comité CNES-INSU fonctionnant sur la base de réunions régulières, les autres partenaires concernés étant consultés au cas par cas en fonction des besoins. Les points à aborder par ce comité seront en particulier les suivants :

- Evaluation des moyens humains et matériels nécessaires pour la mise en œuvre du programme spatial en sciences de l'univers ; cette initiative reprendra un exercice mené avec succès en 2002 entre le CNES et le CNRS.
- Evaluation des moyens spatiaux mutualisés et plan pluriannuel de mise à niveau, dans une perspective éventuelle de mutualisation lorsque celle-ci s'avère possible.
- Réflexion commune sur les moyens nécessaires à l'exploitation et à l'archivage des données (voir 7.4).
- Structuration des communautés, lorsque celle-ci fait défaut. En particulier, il est apparu un fort besoin de structuration autour de la physique fondamentale dans l'espace. La question est également posée du développement, au sein des laboratoires concernés, d'un réseau ou d'un pôle spatial, capable de prendre en charge la conception et le prototypage d'instruments spatiaux de physique fondamentale. Dans un contexte où le développement de nouveaux laboratoires spatiaux avec les moyens humains et matériels associés semble difficile, le CERES encourage fortement une réflexion commune avec le CNRS sur ce point, et la mise en place d'une expertise technique sur les métiers nécessaires à cette évolution. Dans le domaine de la planétologie et de l'exobiologie, une réflexion semble aussi nécessaire autour du montage éventuel, dans un contexte européen, d'un centre de curation et d'analyse d'échantillons extraterrestres. D'autres exemples sont donnés dans les rapports des groupes thématiques.
- Synergie sol-espace : une réflexion croisée est nécessaire pour faire émerger les complémentarités et mérites respectifs des expériences au sol et dans l'espace ayant des objectifs communs (c'est le cas notamment de la détection et caractérisation des exoplanètes). Cette réflexion permettra également de faire émerger les projets d'astronomie sol nécessaires pour la pleine exploitation de projets spatiaux (par exemple un télescope sol pour le suivi de SVOM, ou le suivi sol des observations de la mission Energie Noire ou de GAIA), de même que pour la définition des instruments sol précurseurs de missions spatiales. Cette problématique sera débattue à l'occasion du séminaire de prospective de l'INSU/Astronomie-Astrophysique qui se tiendra en octobre 2009.

En conclusion, le séminaire de prospective a permis de mettre en évidence la vitalité d'une communauté en pleine croissance, qui a élargi avec succès son périmètre à la physique fondamentale et à l'exobiologie, et qui a obtenu, au cours des dernières années, des résultats spectaculaires et très médiatisés. Le succès remporté lors du premier appel d'offres de l'ESA illustre la qualité des laboratoires français, bien soutenus par les équipes techniques du CNES. La communauté témoigne d'une forte attente vis-à-vis du CNES, à la hauteur de ses succès et de ses ambitions.