

Etat des lieux en Sciences de l'Univers
Rapport du CERES
Séminaire de prospective
Biarritz, 16-19 Mars 2009

1. 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 en sont ses constituants ?

Cette problématique rejoint celle présentée par la communauté des Sciences de l'Univers lors du séminaire de 2004, au cours duquel 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, en avril 2009, des missions Planck et Herschel. Planck réalisera une

cartographie complète du fonds cosmique millimétrique; Herschel observera l'Univers dans une fenêtre spectrale peu explorée, le domaine submillimétrique et infrarouge lointain.

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

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 celui des 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 l'expérience EXPOSE d'étude d'échantillons en exposition interplanétaire prolongée) et la réalisation d'expériences de physique fondamentale en micro-pesanteur (avec le projet d'horloges à atomes froids PHARAO/ACES). D'autres expériences de physique fondamentale en microgravité 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.

3. 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 nécessite, 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 conférences 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 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 SIMBOL X actuellement à l'étude. 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, ainsi que de la mission chinoise SVOM d'étude des sursauts gamma.

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 scientifique du CNES.

4. 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 dizaine 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 5.3).

5. Bilan des cinq dernières années

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'offre associé au nouveau programme Cosmic Vision. En parallèle, l'accent avait été mis sur d'autres filières (vol en formation, microsattelites) ainsi que sur les collaborations bilatérales et l'instrumentation pour les missions d'opportunité. Il est intéressant de noter que parmi les projets prioritaires et/ou recommandés pour des études ou des phases 0/A, la plupart ont pu se poursuivre, parfois dans un contexte différent de celui initialement prévu (voir ci-dessous).

5.1 L'évolution des thématiques

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 est prévu en avril prochain, apportera une contribution décisive à cette question par l'étude des fluctuations de densité 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 0. Parallèlement, le projet d'imagerie grand champ destiné à l'étude de l'énergie noire et proposé pour une phase 0 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 en partenariat ESA/NASA) 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 centre de traitement des données d'énergie noire.

L'étude des galaxies les plus lointaines qui rayonnent principalement dans l'infrarouge lointain va bénéficier des observations du satellite Herschel, lancé avec Planck en avril 2009 et, plus tard, de celle du JWST, dont le lancement est prévu en 2013. Le projet SPICA pré-sélectionné 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 qui reprend celui du microsatellite ECLAIRS, soutenu pour une phase A en 2004. Toujours dans le domaine des hautes énergies, les observations X et gamma permettent d'étudier l'accrétion et l'éjection de matière dans des systèmes astrophysiques très variés ; les missions en opération sont INTEGRAL, XMM-Newton et plus récemment GLAST. Deux projets sont prioritaires pour la communauté française, la mission SIMBOL X, sélectionnée par le CNES en 2004 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.

Dans le domaine de la physique stellaire et galactique, Gaia, pierre angulaire du programme Horizon 2000+, fournira les paramètres fondamentaux de tous les types d'étoiles avec une précision inégalée, ainsi que la première cartographie tridimensionnelle de notre Galaxie. 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.

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'échantillon du satellite Phobos de Mars). Enfin, les équipes françaises ont été très présentes dans les réponses à l'appel d'offre de Cosmic Vision, avec la présélection des missions EJSM et TSSM vers Jupiter et Saturne respectivement, suivie de la sélection récente de EJSM, et celle de Marco Polo vers un astéroïde géocroiseur. Ces trois missions sont d'initiative française.

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 satellite franco-chinois SMESE lui aussi issu de la prospective de 2004, pour l'étude à différentes longueurs d'onde des phénomènes éruptifs solaires. A 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.

Enfin, la communauté de physique fondamentale a vu 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 optiques au sol. 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 et la poursuite de la synchronisation depuis l'espace d'horloges atomiques (mission GEOSTAR).

5.2 L'évolution de la programmation en Sciences de l'Univers

Des évolutions importantes ont vu le jour depuis le séminaire de prospective de 2004. La première est la sortie du premier appel d'offre Cosmic Vision du programme obligatoire de l'ESA. Les huit missions présélectionnées par l'ESA pour une étude de Phase A sont toutes à participation française, dont quatre à PI français. La première préoccupation de la communauté est de conforter ce succès en obtenant du CNES un soutien suffisant pour l'instrumentation 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 pré-sélections de Cosmic Vision. A ces problèmes budgétaires s'ajoutent ceux 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. Des problèmes budgétaires apparaissent aussi dans le cadre de la programmation bilatérale et multilatérale du CNES, notamment dans le cas des projets Simbol X et SVOM, suite à des contraintes ou des défections liées à nos partenariats.

5.3 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 est compétitif jusqu'en 2011, suite 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 notoirement 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 mentionné 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 (CNRS, CEA) et se tourner vers les pourvoyeurs de fonds extérieurs (ANR, Union Européenne).