

Bilan du CERES

Les priorités scientifiques

Les grandes questions scientifiques dans le domaine des sciences de l'Univers peuvent s'organiser autour de quatre grands thèmes :

- la formation des planètes et l'émergence de la vie
- le fonctionnement global du système solaire
- les lois physiques qui gouvernent l'Univers
- l'origine et l'évolution de l'Univers

Ces grandes questions ressortent de prospectives menées en Europe, dans le cadre de l'ESA (Cosmic Vision, 2005) et d'Astronet (Science Vision et sa mise à jour de 2012), et aux Etats-Unis dans le cadre des « Decadal Surveys » (2010-2013). La formulation des grands thèmes n'a pas changé depuis le séminaire de prospective de Biarritz, mais la façon de les aborder a sensiblement évolué, comme on verra sur trois exemples.

En ce qui concerne l'origine et l'évolution de l'Univers, Planck a mesuré avec une précision inégalée la géométrie et le contenu de notre Univers ; matière noire et énergie noire dominent largement (96%) le contenu énergétique de l'Univers par rapport à la matière baryonique, mais dans des proportions quelque peu différentes de ce qui était estimé jusqu'alors. Planck a conforté ce qu'il est convenu d'appeler le « modèle standard » et montré que les fluctuations primordiales n'étaient pas tout à fait invariantes d'échelle, ce qui est une prédiction générique des modèles faisant appel à l'inflation, fraction de seconde pendant laquelle la taille de l'univers a crû exponentiellement par plusieurs dizaines d'ordres de grandeur (au moins 10^{30}). A l'horizon 2020, Euclid, mission M2 de l'ESA dont la France assure le « consortium lead » s'intéressera à l'énergie noire, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers, et à la matière noire. Les questions ouvertes concernent la phase d'inflation – et Planck ouvre la voie à la caractérisation de cette période par la détection des modes dits « B » de polarisation du fond diffus cosmologique – et la sortie des âges sombres, période pendant laquelle se sont formées les premières étoiles et les premières galaxies.

Mars est un autre exemple de l'évolution rapide d'une question, celle de l'origine des planètes et de l'émergence de la vie. L'exploration de cette planète a été affichée comme une priorité en Europe et aux Etats-Unis, et pas moins de 3 orbiteurs, 3 rovers et un atterrisseur ont visité Mars depuis 2000. On sait depuis plusieurs années que l'atmosphère de Mars a été autrefois beaucoup plus dense, que de l'eau liquide a coulé à la surface, comme le montrent les images d'écoulement et les argiles découvertes par Mars Express, et que Mars a donc sans doute rempli les conditions pour être habitable. Mais ce sont les observations récentes de Curiosity qui l'ont démontré : l'analyse des sédiments prouve la présence d'eau peu salée, de pH neutre, et donc favorable au développement de la chimie prébiotique ou biotique. Par ailleurs, la composition de l'atmosphère a été mesurée précisément, ce qui contraint fortement les mécanismes responsables de sa quasi-disparition. Les progrès passeront désormais par la recherche de molécules (pré)biotiques à la surface ou à la subsurface, d'abord par une analyse in situ, puis, à plus long terme, par retour d'échantillons. Les questions d'évolution du climat martien, en lien avec l'évolution passée du climat terrestre, et celles relatives à l'évolution géologique de Mars passeront également au premier plan.

La découverte il y a 20 ans de la première exoplanète autour d'une étoile et la moisson de résultats qui ont suivi ont bouleversé notre conception de la formation et du fonctionnement du système solaire ; ce fut une très grande surprise que de trouver une planète géante plus proche de son étoile que Mercure ne l'est du Soleil. L'enjeu a évolué, passant du stade de la découverte à celui du recensement, puis à celui de la caractérisation des atmosphères, un des objectifs à long terme étant la recherche de biomarqueurs. Ce domaine est très interdisciplinaire : si les enjeux sont aussi ceux de l'exploration du système solaire, les compétences sont partagées entre l'astronomie pour les méthodes (observation à distance au moyen de grands télescopes au sol et de missions satellitaires), la planétologie pour la complémentarité entre l'exploration in situ et à distance, l'observation de la Terre pour les aspects atmosphère et Terre primitive, la chimie, la biologie, etc. Un résultat marquant de Curiosity est que Mars a été une planète habitable, ce qui fait au moins deux planètes habitables dans le système solaire et ouvre la possibilité qu'il en existe beaucoup d'autres dans un voisinage proche sur lesquelles des biomarqueurs pourront être recherchés.

Enfin, le questionnement a évolué dans le domaine de la physique solaire. Les nouvelles missions sont aujourd'hui américaines – celles de l'ESA dans le domaine de la physique solaire et des plasmas seront lancées d'ici la fin de la décennie – et ont montré l'importance d'une vision globale du Soleil, avec en particulier la possibilité d'obtenir des images du Soleil entier par la sonde Stereo. En parallèle, l'ensemble Soleil – héliosphère – magnétosphère(s) est de plus en plus appréhendé comme un système global, avec un poids accru sur la problématique des relations Soleil-Terre, qui a des répercussions sociétales importantes, avec le développement de la météorologie de l'espace, et de l'étude de l'impact de la variabilité solaire sur l'atmosphère terrestre et le climat. Les développements dans ces domaines supposent aussi des progrès dans la connaissance de la physique des plasmas, ce qui veut dire explorer de nouveaux régimes spatiaux et temporels inaccessibles aux instruments actuels.

Une stratégie globale en sciences de l'Univers

Répondre à ces questions nécessite bien souvent de faire appel à des observations depuis le sol et dans l'espace, voire de réaliser des expériences au laboratoire. En effet, un problème donné, en raison de sa complexité, ne peut se résoudre par un seul type d'observations ; il faut pouvoir accéder à plusieurs longueurs d'ondes, effectuer un suivi de grands relevés, compléter des observations in situ par des observations à distance, disposer de mesures de laboratoire, etc., ce qui impose souvent l'utilisation de données hétérogènes d'origines diverses. Il importe donc d'élaborer une stratégie globale des moyens sol et spatiaux. En raison du coût et des contraintes du spatial, les observations ou les expériences ne sont réalisées dans l'espace que si elles sont impossibles depuis le sol, que ce soit à cause de la présence de l'atmosphère, opaque à certaines longueurs d'ondes ou siège d'une turbulence dont tous les effets ne peuvent être corrigés, à cause d'une nécessaire stabilité ou continuité des observations ou des mesures, ou évidemment à cause de la nécessité de réaliser des observations in situ. Un couplage fort entre les perspectives sol (INSU) et spatiale (CNES) est donc indispensable et la proximité des dates des deux prospectives dans le domaine de l'astronomie est une opportunité qui a été saisie.

Le poids du spatial

Les publications sont un indicateur traditionnel (même s'il est controversé) de l'impact de la recherche. L'analyse des publications françaises (première affiliation du premier auteur ou corresponding author en France) parues en 2012 ou 2013 dans des revues dont le facteur d'impact

est supérieur à 2 et couvrant le périmètre du CERES montre que la moitié de celles-ci présentent de nouvelles données d'observation. Parmi ces dernières, près des 2/3 proviennent majoritairement de satellites ou de sondes spatiales. Cela montre à l'évidence l'importance du spatial dans le domaine des sciences de l'Univers, et le retour scientifique est bien à la hauteur des investissements consentis dans le spatial.

Evolution du contexte

Le séminaire de prospective de La Rochelle se situe dans un contexte programmatique ESA qui est bien éclairci par rapport à celui de Biarritz ; la prochaine échéance de l'ESA est l'appel à mission pour la 4^{ème} mission moyenne, qui devrait avoir lieu cette année, alors que les thèmes des missions L2 et L3 ont été sélectionnés ; les lancements correspondants sont prévus en 2026 pour M4, et 2028 et 2034 pour L2 et L3. Les missions, réalisées sur des calendriers plus courts, apporteront un peu de flexibilité et de réactivité au programme scientifique. Aux Etats-Unis les priorités de la communauté ont été affichées lors des 3 Decadal Surveys du périmètre CERES, qui ont eu lieu entre 2010 et 2013.

Le paysage de la recherche française a été profondément modifié par les investissements d'avenir (IDEX, LABEX, EQUIPEX), par le renforcement de la place des universités dans le dispositif et par la structuration du CNRS en instituts. A noter des évolutions des laboratoires spatiaux traditionnels qui ont presque tous perdu leur caractère exclusivement spatial, tandis que la quasi-totalité des laboratoires d'astronomie – au sens INSU – mènent des activités financées par le CNES. En parallèle, la communauté utilisatrice de l'espace s'est élargie, avec une implication croissante des laboratoires des sciences de la Terre, mais aussi des laboratoires de physique des particules et de physique fondamentale appartenant aux instituts IN2P3 et INP du CNRS, qui interviennent sur des projets tels que Planck, Fermi, Euclid, eLISA, etc.

Enfin, ce séminaire de prospective se déroule dans un contexte budgétaire difficile qui a causé de fortes tensions sur les ressources des laboratoires, en particulier sur les ressources humaines, et plus récemment sur le budget du CNES, sans qu'on puisse prévoir d'amélioration significative à court terme. La vigilance sur la disponibilité des ressources nécessaires pour la mise en œuvre des recommandations du SPS sera plus que jamais nécessaire.

Bilan programmatique

La figure 1 montre l'état actuel du programme dans le périmètre CERES, avec en bleu les phases d'exploitation à venir, en vert clair les phases d'exploitation actuelle et en vert foncé les phases de post-exploitation.

Le programme est conséquent, avec de nombreuses missions qui alimentent la communauté scientifique en données. Certaines sont en opération depuis longtemps (plus de 15 ans), et il est clair qu'un équilibre est nécessaire entre les exploitations, qui assurent le retour scientifique, et la préparation des futures missions qui conditionne l'avenir. Le ratio actuel construction / exploitation actuelle apparaît satisfaisant ; il importe de le maintenir à son niveau présent.

Principales missions SCIENCE de l'UNIVERS en cours

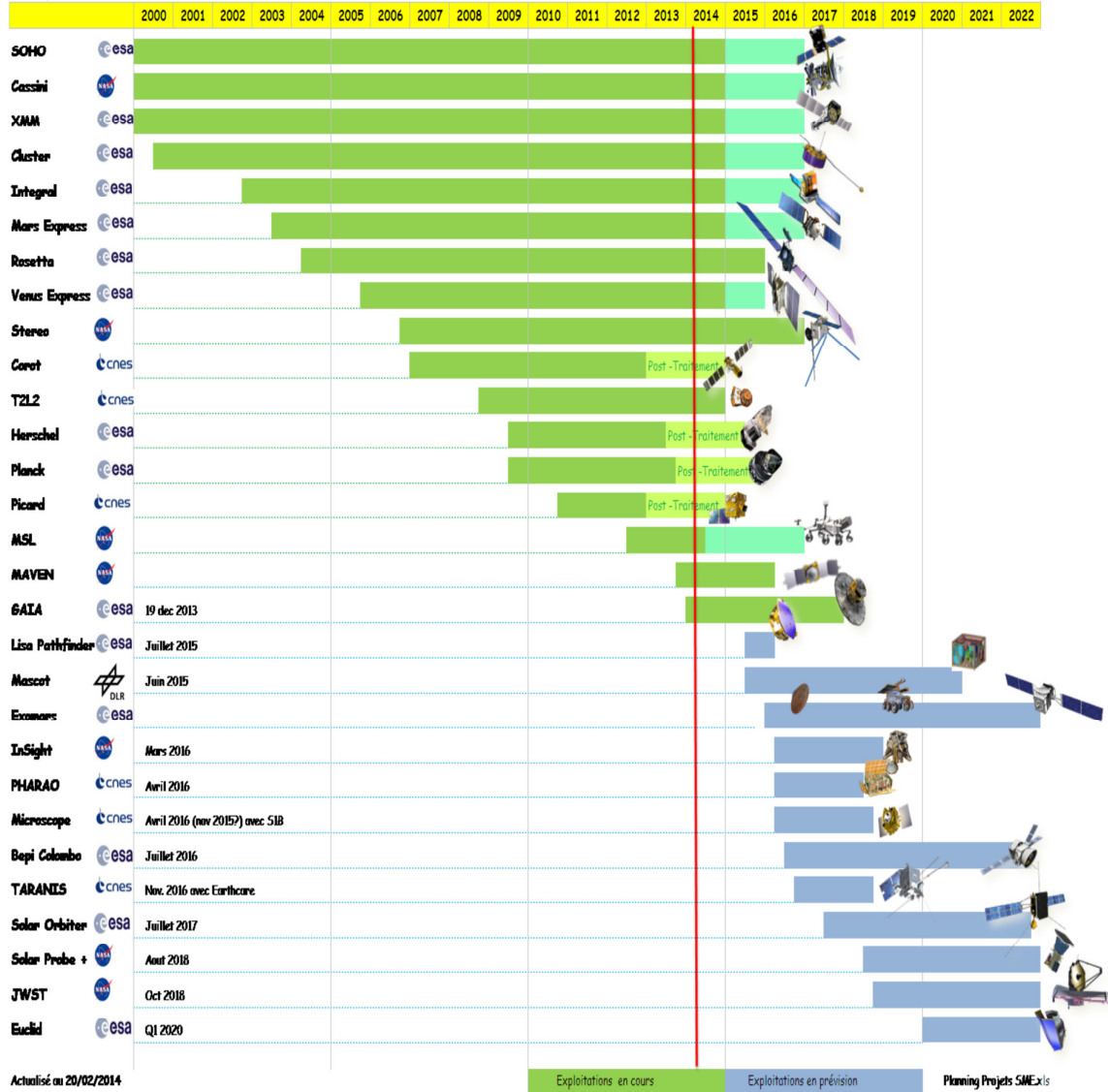


Figure 1. Programme dans le domaine des sciences de l'Univers

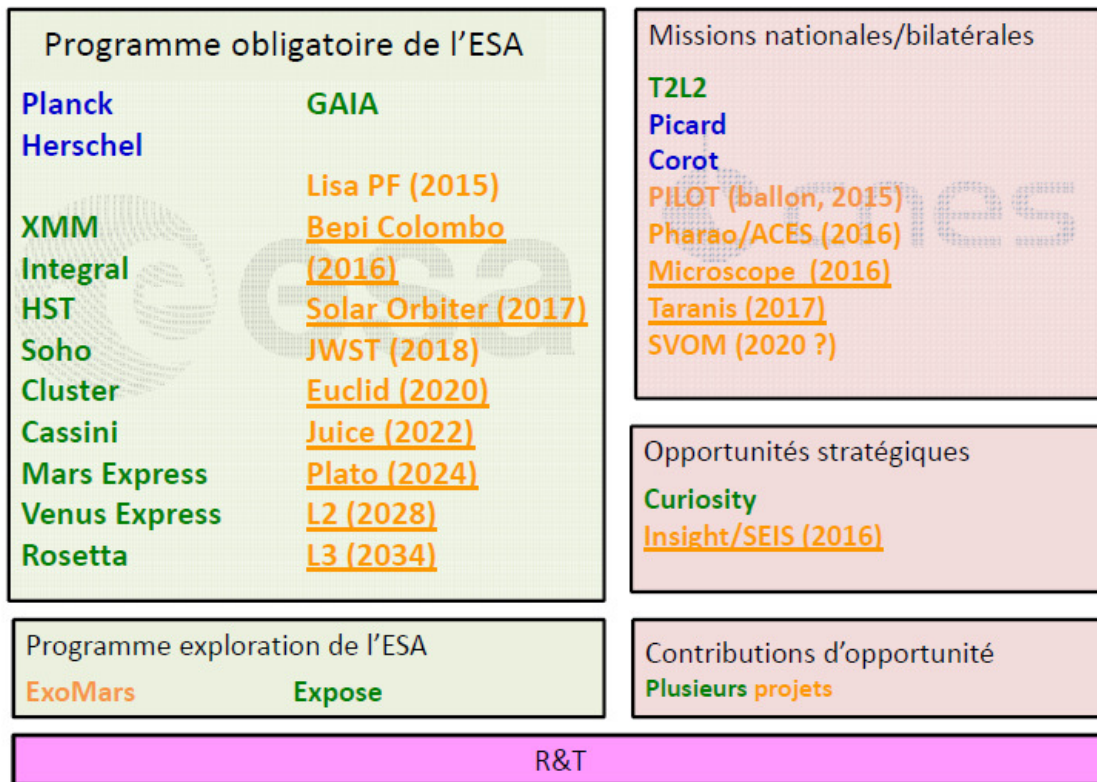


Figure 2 : Programmation dans le périmètre CERES. En orange, les missions en construction, en vert celles en exploitation et en bleu celles en post-exploitation. Les missions ayant fait l'objet de décisions depuis le SPS de Biarritz sont soulignées

Le programme scientifique obligatoire de l'ESA auquel s'ajoute le programme optionnel d'exploration robotique de l'ESA est l'ossature du programme spatial français dans le domaine des sciences de l'Univers. Il est complété par un ensemble de missions nationales ou bilatérales, par des missions dites d'opportunité qui assurent un excellent retour scientifique pour un investissement très faible, et par un programme ballon. Les missions nationales sont issues assez largement de la filière microsattelites du CNES qui devait assurer flexibilité et réactivité à un ensemble de missions ESA devenant de plus en plus lourdes. Le programme ballon a un double objectif : préparer de futures missions spatiales d'une part et obtenir rapidement des résultats sur des questions scientifiques très ciblées d'autre part. Force est de constater que pour diverses raisons, le programme microsattelites s'est avéré beaucoup moins réactif qu'initialement prévu, et que certains des projets ballons se sont avérés eux aussi très lourds, pouvant largement dépasser le coût d'une mission d'opportunité. En parallèle, et ceci est une nouveauté qu'il convient de souligner, certaines contributions d'opportunité ont atteint des niveaux très significatifs, qui se comparent presque à la contribution française aux missions du programme obligatoire. Ces contributions importantes, ciblées sur de fortes priorités de la communauté, se sont avérées ou promettent d'être très productives. L'ensemble de ce programme s'appuie sur un socle de R&T, essentiel pour préparer les futures missions.

Si on se réfère aux priorités établies lors du séminaire de prospective de Biarritz, le bilan apparaît très positif. A l'exception notable de Simbol X, et dans une moindre mesure de SMESE qui avait été classé en seconde priorité, toutes les priorités se sont concrétisées, parfois sous une forme quelque peu

différente de ce qui avait été prévu (par exemple l'emport d'un sismomètre se fera finalement vers Mars et non vers la Lune).

Il faut enfin noter que presque toutes les missions ont subi des retards, indépendamment de leur statut (décidées ou pas), et du contexte de réalisation (mission ESA, NASA, nationales, bilatérales), et que ces retards sont souvent importants (4 ans et plus). A défaut de pouvoir y remédier, il importe de prendre en compte cet état de fait lors du processus de sélection des projets, en particulier en s'assurant de la solidité du cas scientifique.