SCIENCES DE L'UNIVERS

SYNTHÈSE DU CERES

1. LES PRIORITÉS SCIENTIFIQUES

Les grandes questions scientifiques dans le domaine des sciences de l'Univers peuvent s'organiser autour de quatre grands thèmes qui ressortent des 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 États-Unis dans le cadre des Decadal Surveys (2010-2013). Leur formulation n'a pas changé depuis le séminaire de prospective scientifique de Biarritz mais la façon de les aborder a sensiblement évolué.

1.1. Formation des planètes et émergence de la vie

Pour ce premier grand thème, les questions prioritaires concernent, d'une part, l'origine du Système solaire, notamment à partir de l'étude de la matière primitive, pour comprendre comment se forment les systèmes planétaires en général et le Système solaire en particulier et d'autre part, l'habitabilité des planètes et de leurs satellites. Il s'agit de savoir si la vie a pu apparaître ailleurs dans l'Univers et si oui, dans quelles conditions.

Ces questions ont sensiblement évolué depuis le SPS de Biarritz. La découverte il y a 20 ans de la première exoplanète autour d'une étoile et la moisson de résultats qui a 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 depuis évolué, passant du stade de la découverte à celui du recensement, puis de la caractérisation des atmosphères, un des objectifs à long terme étant la recherche de biomarqueurs.

Ce domaine est très interdisciplinaire : il concerne également l'exploration du Système solaire et les compétences requises 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 la physique de l'atmosphère et l'étude de la Terre primitive, la chimie, la biologie, etc.

Un résultat marquant de Curiosity est que Mars a été une planète habitable. Il a donc existé au moins deux planètes habitables dans le Système solaire et ceci ouvre la possibilité qu'il puisse en exister beaucoup d'autres autour d'étoiles proches, sur lesquelles des biomarqueurs pourront être recherchés.

1.2. Fonctionnement global du Système solaire

Il s'agit de comprendre la diversité des planètes de notre Système solaire, leurs interactions avec le Soleil, leur fonctionnement et celui du Soleil, les processus physiques à l'œuvre, etc. Dans ce paysage, les planètes géantes font l'objet d'une attention particulière parce que le système planète-satellite-anneaux-magnétosphère peut être vu comme un modèle réduit du Système solaire. Il faut par ailleurs souligner que notre compréhension du Système solaire a été fortement affectée par la découverte des exoplanètes et de leur diversité.

Le questionnement a également évolué dans le domaine de la physique solaire et des plasmas. Les missions les plus récentes sont aujourd'hui américaines – celles de l'ESA 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 les sondes jumelles Stereo. En parallèle, l'ensemble Soleil–héliosphère–magnétosphères est de plus en plus appréhendé comme un système. L'accent est mis en particulier 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 progrès dans ces domaines supposent aussi une meilleure connaissance de la microphysique des plasmas naturels, ce qui nécessite d'explorer des échelles spatiales et temporelles inaccessibles aux instruments actuels.

1.3. Lois physiques qui gouvernent l'Univers

Les conditions physiques extrêmes qui règnent dans l'Univers très jeune ou au voisinage des trous noirs permettent de tester les lois de la physique dans des régimes inatteignables sur Terre. En outre, l'espace permet de s'affranchir de certaines contraintes terrestres comme la gravité et de bénéficier de conditions de stabilité sur le long terme et sur de grandes distances impossibles à réaliser dans les laboratoires terrestres.

Les questions prioritaires relevant de ces thématiques concernent pour une large part les lois de la gravitation : la relativité générale est-elle la bonne description de la gravitation, y compris à des grandes distances ou en régime de champ fort ? Et sur un plan plus fondamental, comment réconcilier mécanique quantique et relativité générale ? Comment mettre en évidence un champ nouveau qui se superposerait à la gravitation dans une théorie d'unification de toutes les interactions fondamentales ? Par ailleurs, la nature de la matière noire et de l'énergie noire, qui représentent 95 % du contenu en énergie de l'Univers, reste toujours un mystère malgré des progrès significatifs réalisés dans ce domaine, comme on le verra plus loin.

1.4. Origine et évolution de l'Univers

Comment s'est formé l'Univers ? Comment s'est-il structuré pour former les galaxies, étoiles, planètes que nous observons aujourd'hui ? Et quel est son devenir ? Ce sont là des questions auxquelles l'astronomie tente de répondre depuis toujours et sur lesquelles des progrès majeurs ont été faits ces dernières années.

Planck a mesuré avec une précision inégalée la géométrie et le contenu de notre univers. Matière noire et énergie noire dominent largement (95 %) 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. Il a conforté ce qu'il est convenu d'appeler le « modèle standard » et, ce qui est très nouveau, a montré que, conformément à la 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), les fluctuations primordiales n'étaient pas tout à fait invariantes d'échelle. À l'horizon 2020, Euclid, mission M2 de l'ESA dont la France assure le *consortium lead* scientifique s'intéressera à l'énergie noire, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers observée aujourd'hui et à la distribution de la matière noire à grande échelle.

Les questions ouvertes prioritaires concernent la phase d'inflation et la sortie des « âges sombres », période pendant laquelle se sont formées les premières étoiles et les premières galaxies.

1.5. Les évolutions récentes

Parmi les questions prioritaires mentionnées plus haut, deux sujets méritent une attention particulière, en raison de développements récents qui montrent que des avancées importantes sont possibles à court terme. Il s'agit d'une part de la période de l'inflation de l'Univers primordial et d'autre part de la caractérisation des atmosphères des exoplanètes.

D'autres évolutions significatives depuis le séminaire de Biarritz méritent d'être soulignées. Dans le domaine de la planétologie, l'accent est aujourd'hui mis, sur le retour d'échantillons de Mars mais aussi des corps primitifs (Phobos, astéroïdes, régions de la Lune non explorées par Apollo), en lien avec la question de la formation du Système solaire et des origines de la vie. Autre infléchissement significatif, l'importance croissante donnée au couplage entre les diverses régions du Système solaire.

2. UNE STRATÉGIE GLOBALE EN SCIENCES DE L'UNIVERS

Répondre à ces questions nécessite bien souvent une stratégie multiple combinant des observations depuis le sol et dans l'espace, des simulations numériques, voire des expériences en laboratoire. En effet, un problème scientifique donné, en raison de sa complexité, ne peut se résoudre en utilisant 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'onde 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 prospectives sol (en particulier 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.

3. LE POIDS DU SPATIAL

Les publications sont un indicateur traditionnel (et traditionnellement controversé) de l'impact de la recherche scientifique. L'analyse des publications françaises (définies comme celles dont la première affiliation du premier auteur ou du *corresponding author* est 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.

4. LES THÉMATIQUES ET MISSIONS PRIORITAIRES

Dans ce contexte, le SPS a mis en avant trois priorités scientifiques à moyen et long terme qui s'identifient à des missions dont le cadre programmatique est bien défini – les trois missions L de l'ESA et trois autres priorités à moyen terme qui restent à inscrire dans la programmation.

4.1. Les satellites de Jupiter comme modèle de système planétaire : Juice

Juice est la première mission dite « large » (L) de l'ESA, sélectionnée en 2012 pour un lancement prévu en 2022. Juice explorera Jupiter et son environnement (atmosphère, magnétosphère et interactions avec les quatre satellites galiléens). Une attention particulière sera portée à l'exploration des lunes glacées Europe, Ganymède et Callisto qui possèdent des océans d'eau liquide sous une épaisse couche de glace et présentent donc un intérêt particulier pour l'exobiologie, notamment Europe pour lequel l'eau liquide serait en contact direct avec la roche. La France est responsable du spectro-imageur Majis et contribue à quatre des dix autres instruments.

4.2. L'univers chaud et énergétique : Athena

La majeure partie de la matière baryonique de l'Univers est extrêmement chaude et ne peut être observée qu'en rayons X. L'étude de ce gaz chaud, de ses propriétés et de son évolution, dans un contexte cosmologique en lien avec la structuration à grande échelle due à la matière noire (qui se traduit par la distribution à grande échelle des galaxies et, à plus petite échelle, par la formation des galaxies et des étoiles) est indispensable pour avoir une vision complète de l'Univers.

Par ailleurs, l'accrétion de matière sur les trous noirs dans les noyaux actifs de galaxies est l'une des sources principales d'énergie dans l'Univers et a une influence majeure, via les processus de rétroaction – injection de matière et d'énergie dans les milieux environnants – sur la formation et l'évolution des galaxies. De plus, seule l'étude de ces objets permet d'accéder à la physique des trous noirs et de tester les théories de la gravitation dans des conditions de champs forts.

L'ESA a sélectionné ce thème fin 2013 pour la seconde mission L, avec un lancement prévu en 2028. Le projet de mission Athena correspond à cette thématique.

4.3. L'univers gravitationnel : eLisa

Les détecteurs de rayonnement gravitationnel ouvriront une nouvelle fenêtre d'observation en astrophysique, avec un potentiel important de découvertes nouvelles. Au sol, les fréquences observables sont de l'ordre de quelques centaines de Hz, tandis que l'espace permet d'accéder à des fréquences du Millihertz. Les détecteurs au sol advLIGO et advVIRGO devraient effectuer les premières détections directes d'ondes gravitationnelles avant la fin de la décennie et permettront de détecter la coalescence de binaires compactes de masses stellaires, tandis que l'observation de la coalescence des trous noirs supermassifs situés au cœur des galaxies nécessite d'aller dans l'espace. Parmi les autres objectifs réalisables depuis l'espace, figurent l'observation des binaires stellaires dont la période est de quelques heures et celle d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles qui pourraient avoir été générées lors d'une transition de phase dans l'Univers primordial. Ces observations permettront en outre de tester la relativité générale en régime de champ fort, de façon plus directe et plus précise que la mission Athena.

L'ESA a sélectionné ce thème fin 2013 pour la troisième mission L, avec un lancement prévu en 2034. Le projet eLisa correspond à cette thématique.

4.4. L'univers à t ~10^{-32} s

L'inflation est la période du Big Bang pendant laquelle la taille de l'Univers aurait crû exponentiellement d'un facteur supérieur à 10^{30}. Ce concept phénoménologique a été introduit pour expliquer l'homogénéité à grande échelle de l'Univers et sa platitude – l'Univers est euclidien. La cause physique est inconnue. Un grand nombre de modèles ont été proposés qui font tous appel à une nouvelle physique. Quel que soit le modèle, l'inflation génère des ondes gravitationnelles qui laissent une signature caractéristique dans la polarisation du rayonnement de fond diffus cosmologique. L'expérience au sol Bicep-2 a annoncé une détection de cette signature sur une toute petite fraction du ciel (5 %) et à une seule fréquence, ce qui rend difficile, voire impossible, la soustraction de l'émission de notre galaxie qui contribue de façon significative au signal total. Planck confirmera peut-être ces résultats mais de façon limitée et la réalisation d'une mission spatiale dédiée qui, seule, pourra mesurer l'énergie à laquelle la phase d'inflation a eu lieu et définir le cadre théorique plus vaste dans lequel s'inscrit le modèle d'inflation (grande unification ou autre) est donc plus que jamais d'actualité. La France a la légitimité nécessaire, en raison de ses responsabilités dans la mission Planck et des développements R&T menés depuis de nombreuses années pour porter cette mission.

4.5. Exoplanètes : du recensement à l'étude détaillée

Comment se sont formées ces planètes ? Quelle est leur structure, leur composition ? Ont-elles une atmosphère et quelle est sa composition ? Sont-elles habitables ? Telles sont quelques-unes des questions posées. Plato, qui vient d'être sélectionnée pour être la troisième mission moyenne (M3) du programme Cosmic Vision de l'ESA, permettra de détecter des exoplanètes telluriques dans la zone habitable d'étoiles de type solaire et de donner leur caractéristiques principales (masse, rayon, densité) ainsi que d'étudier la structure interne des étoiles par sismologie – et il importe que la France soit bien présente sur ces deux volets. L'étude des atmosphères des exoplanètes est l'étape suivante qui permettra à terme d'aborder les questions d'habitabilité et de recherche de biosignatures. Si les grands télescopes au sol (E-ELT) et dans l'espace (JWST) apporteront une contribution importante, elle sera limitée par l'impossibilité d'observer simultanément un grand domaine spectral allant du visible à l'infrarouge et par une efficacité limitée par les contraintes posées par le caractère généraliste de ces observatoires. Une mission dédiée est indispensable.

La France a la légitimité, en raison notamment de son rôle dans la mission CoRoT et des compétences des équipes françaises dans le développement de spectrographes infrarouges, pour porter ce projet.

4.6. Retour d'échantillons

La recherche de molécules pré-biotiques sur Mars mais aussi l'analyse de la matière primitive de la Lune et des petits corps du Système solaire pour les questions de formation du Système solaire nécessitent désormais le retour d'échantillons sur Terre. Les mesures en laboratoire sur des échantillons dont la provenance et le contexte sont bien connus traitent en effet de nombreuses questions en planétologie bien plus précisément et plus complètement que lors de mesures *in situ*. Il est alors possible de bénéficier des performances analytiques des instruments de laboratoire, d'adapter les protocoles à la nature de l'échantillon et de bénéficier de l'expertise d'une communauté élargie.

Il s'agit d'une priorité tant en Europe qu'aux États-Unis que préparent les missions ExoMars et Mars2020. Un bon positionnement européen nécessite des développements technologiques sur des charges utiles pour la sélection et la caractérisation *in situ* des échantillons et de leur environnement.

5. ÉVOLUTION 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 quatrième mission moyenne, qui devrait avoir lieu en 2014, alors que les thèmes des missions L2 et L3 ont été sélectionnés fin 2013. Les lancements correspondants sont prévus en 2026 pour M4, en 2028 et 2034 pour L2 et L3. Les contributions d'opportunité à des missions d'autres agences, réalisées sur des calendriers plus courts, apporteront un peu de flexibilité et de réactivité à ce programme. Aux États-Unis, les priorités de la communauté ont été affichées lors des trois Decadal Surveys correspondants au périmètre du CERES qui ont eu lieu entre 2010 et 2013.

D'un point de vue institutionnel, 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. La communauté utilisatrice de l'espace s'est élargie, la quasi-totalité des laboratoires d'astronomie – au sens INSU – mène des activités financées par le CNES et on note une implication croissante des laboratoires des sciences de la Terre mais aussi des laboratoires de physique des particules et de physique fondamentale relevant des instituts IN2P3 et INP du CNRS ou du CEA, qui interviennent sur des projets tels que Planck, Fermi, Pharao, Microscope, 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.

6. UN BILAN DEPUIS BIARRITZ

Si on se réfère aux priorités établies lors du séminaire de prospective de Biarritz, le bilan apparaît très positif. À 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). On doit en particulier se féliciter que la forte priorité affichée sur la mission énergie noire se soit concrétisée par un engagement important sur la mission Euclid, à un niveau PI.

La communauté scientifique bénéficie aujourd'hui de nombreuses missions qui l'alimentent en données. Certaines sont en opération depuis longtemps (plus de 15 ans), l'équilibre actuel entre les exploitations, qui assurent le retour scientifique et la préparation des futures missions qui conditionne l'avenir apparaît satisfaisant. Il importe que cela continue à être le cas.
Il faut aussi noter que presque toutes les missions ont subi des retards, indépendamment de leur statut (décidées ou pas) et du contexte de réalisation (missions ESA, NASA, nationales, bilatérales) et que ces retards sont souvent importants (quatre ans et plus). A défaut de pouvoir y remédier, il faut prendre en compte cet état de fait lors du processus de sélection des projets, en particulier en s'assurant de la pérennité du cas scientifique.

7. LES GRANDES LIGNES DE LA PROGRAMMATION

7.1. Stratégie programmatique

Programmes ESA : 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. L'analyse des publications 2012-2013 montre que le retour pour la France du programme obligatoire est à la hauteur de nos ambitions, puisqu'environ 60 % des publications « spatiales » françaises sont issues de missions ESA.

Le soutien à la participation française à l'ensemble des missions du programme scientifique, qu'il s'agisse de l'instrumentation, des segments sol scientifiques ou de l'exploitation des données, est la priorité absolue du CERES.

À côté du programme de l'ESA, il faut maintenir, voire développer, les opportunités stratégiques, un concept apparu depuis le SPS de Biarritz, avec notamment les contributions aux missions de la NASA vers Mars, Curiosity et InSight, qui se sont avérées ou promettent d'être très productives. Il s'agit de contributions importantes à des missions d'autres agences nationales (en particulier NASA), qui se comparent presque à la contribution française aux missions du programme obligatoire. Elles permettent en effet d'atteindre des objectifs prioritaires qui ne sont pas couverts par l'ESA et assurent une certaine réactivité. Elles doivent être ciblées sur de fortes priorités de la communauté, supposent un savoir-faire reconnu des équipes françaises, une visibilité de la contribution française et un risque programmatique limité. Elles s'appuient enfin sur un programme préalable de R&T et la réalisation éventuelle de démonstrateurs afin que les contributions proposées soient au niveau de maturité technologique requis.

Les petites contributions d'opportunité assurent un excellent retour scientifique pour un investissement faible ou très faible (cas des participations de type Co-I science) et doivent être fortement soutenues. Il pourrait être intéressant de tirer davantage parti des possibilités d'emport d'instruments en passager sur des missions relevant d'autres disciplines, comme ce fut le cas pour T2L2 sur Jason, ce qui milite aussi pour le renforcement des liens CERES-TOSCA.

Du côté des missions nationales ou bilatérales, les projets Taranis et Microscope sont en fin de développement et il convient d'en garantir l'exploitation scientifique optimale. La mission sino-française Svom est en cours de redémarrage. Ces missions nationales sont issues assez largement de la filière microsatellites qui devait assurer flexibilité et réactivité au programme scientifique du CNES. Force est de constater que, pour diverses raisons, le programme microsatellites s'est avéré beaucoup moins réactif qu'initialement prévu. La communauté Soleil-Héliosphère-Magnétosphères reste attachée à l'existence de cette filière mais le CERES n'a pas identifié aujourd'hui de nouveau projet prioritaire à engager dans ce domaine.

Le programme ballons 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. Ils doivent donc être mis en compétition avec les autres projets financés par le CNES, d'autant plus que certains des projets ballons se sont avérés très complexes, pouvant largement dépasser le coût d'une mission d'opportunité. Le SPS

n'a pas identifié de projet prioritaire d'un bon rapport science/coût à engager au-delà du programme actuel qui reste soutenu.

Le SPS a identifié plusieurs projets à long terme qui nécessitent dans l'immédiat des phases 0 et des développements de R&T, voire des démonstrateurs. Le socle de R&T, qui joue un rôle stratégique, est essentiel pour préparer les futures missions.

Les nanosatellites sont apparus comme une technologie potentiellement intéressante mais trop récente pour que des projets justifiant l'investissement sur le seul plan scientifique et/ou technologique aient pu être élaborés. Le CNES devrait diffuser largement l'information disponible, en particulier sur les résultats de la phase 0 exploratoire en cours, par l'organisation d'ateliers et organiser le foisonnement de projets qui prennent naissance dans un contexte universitaire. Les nanosatellites sont aujourd'hui réalisés pour l'essentiel dans un contexte étudiant. Sans en changer l'esprit ni les conditions de réalisation, la contribution des laboratoires devrait se traduire par la possibilité d'introduire des objectifs scientifiques ciblés.

Les éventuelles propositions scientifiques impliquant des nanosatellites seront bien évidemment mises en compétition avec les autres projets financés par le CNES. Enfin, une participation ciblée au volet météo de l'espace du programme optionnel SSA (*Space Situational Awareness*) de l'ESA est souhaitable et permettrait aux équipes françaises de s'intégrer aux actions coordonnées européennes sur la météo de l'espace et de valoriser leur expertise dans ce domaine.

7.2. Missions en exploitation ou sélectionnées

Il convient d'assurer, au bon niveau, l'exploitation des missions en cours ou décidées pour garantir le retour scientifique des investissements réalisés dans la construction d'instruments, tout en gardant les ressources nécessaires pour les futures missions et donc préparer l'avenir. Le poids des exploitations rapporté à celui des développements est aujourd'hui satisfaisant. Compte tenu de la programmation actuelle et des engagements, il n'apparaît pas souhaitable que ce poids relatif évolue significativement. Du côté des laboratoires, il est aussi important que les engagements pris sur le support scientifique soient tenus, y compris lorsque les projets subissent des retards.

Par ailleurs, les priorités affichées par la communauté scientifique sur les missions de l'ESA, qui se sont traduites par la sélection de missions, doivent être confirmées. Il faut en particulier :

- approuver formellement la contribution française à la mission Juice, mission L1 de l'ESA,
- valider la participation française à Plato, sélectionné en février 2014 comme mission M3 de l'ESA,
- afficher une participation ambitieuse à l'observatoire en rayons X Athena, correspondant à la thématique sélectionnée début 2014 par l'ESA pour être la deuxième mission L. Le périmètre optimal de la participation française reste à établir, la France étant sollicitée pour prendre la responsabilité d'un des deux instruments de cette mission,
- préparer la participation française (participation instrumentale, analyse des données et observations complémentaires au sol et dans l'espace) à eLisa, mission dédiée à l'observation d'ondes gravitationnelles, cette thématique ayant été sélectionnée pour être la troisième mission L de l'ESA.

Il faut rappeler que, bien que la France ait été à l'origine des missions Juice et Plato, les contributions des équipes françaises à ces deux missions ont été limitées pour des raisons budgétaires.

7.3. Programme exploration

Le calendrier et le financement de la mission ExoMars 2018 de l'ESA ne sont pas aujourd'hui consolidés et le programme ExoMars illustre bien la difficulté de concilier la science et les objectifs d'un programme optionnel. D'un autre côté, la participation au programme Mars 2020 de la NASA est une opportunité scientifique très intéressante. Le CERES souhaite que le programme ExoMars soit mené à bien, tout en offrant aux équipes la possibilité de participer au programme NASA à un niveau significatif mais moindre.

Les enjeux de l'exploration de Mars sont suffisamment importants pour qu'il faille préparer la suite du programme ExoMars dans un contexte européen. Quel que soit le contexte de collaboration internationale du retour d'échantillons martiens, l'ambition de l'Europe ne saurait se limiter à une contribution en passager à une mission d'une autre agence.

7.4. Mission M4 du programme obligatoire de l'ESA

Plusieurs projets correspondant aux priorités de la communauté scientifique française ont d'ores et déjà été identifiés par les groupes thématiques et justifient une participation ambitieuse et un fort soutien du CNES à la préparation des propositions. Le SPS a identifié parmi les thématiques qui devraient être particulièrement soutenues :

- une mission post-Planck pour la caractérisation des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique, qui vise à accéder à la première fraction de seconde du Big Bang et à l'ère inflationnaire,

- une mission de caractérisation spectroscopique des atmosphères des exoplanètes,
- une mission dans l'infrarouge lointain pour étudier la formation des galaxies et des étoiles,
- une mission pour tester le principe d'équivalence sur des objets quantiques. L'aide du CNES à la reconfiguration du consortium de la mission STE-Quest, soumise dans le cadre M3, est indispensable ainsi qu'un soutien à des actions de R&T,
- une mission sur la microphysique des plasmas naturels.

À cette liste pourrait s'ajouter une mission de retour d'échantillons d'un des petits corps du Système solaire, si une cible adéquate compatible avec le calendrier de la mission M4 était identifiée.

Le CERES recommande au CNES d'organiser une évaluation des propositions qui seront soumises en réponse à l'appel d'offres de l'ESA, attendu courant 2014, afin d'assurer le soutien du CNES, soutien qui sera différencié en fonction des besoins et des priorités scientifiques définies lors de ce SPS.

7.5. Opportunités

Les thématiques correspondant aux missions M listées ci-dessus et qui sont des priorités scientifiques fortes (en particulier l'étude des modes B de polarisation du CMB ou la caractérisation spectroscopique des exoplanètes) qui n'auront pas été sélectionnées par l'ESA sont des candidates naturelles à être des opportunités stratégiques. De même, la préparation ou la réalisation de missions de retour d'échantillons (Mars comme première priorité sur le long terme mais aussi la Lune, Phobos ou les astéroïdes) est une priorité qui justifierait une contribution française importante. La participation à la mission NASA Mars2020 qui prépare le retour d'échantillons de Mars peut être, de ce point de vue, considérée comme relevant de ce nouveau cadre d'opportunités stratégiques.

De façon plus prospective, le concept de trappe orbitale de spectromètre de masse à très haute résolution pourrait offrir des possibilités importantes de participation à des missions de planétologie. De même, la possibilité d'emport d'un accéléromètre de type Gap sur une sonde vers les planètes externes du Système solaire pourrait offrir des perspectives intéressantes. Ceci suppose une structuration scientifique du projet et une analyse de la possibilité d'emport en passager de cet instrument exigeant en matière d'environnement.

Les décisions sur les contributions d'opportunité au sens habituel du terme (c'est-à-dire de « petites » contributions, typiquement inférieures à 3 M€) sont à traiter au cas par cas et il n'est pas utile de figer ici une liste de missions prioritaires. La participation éventuelle à la seconde petite mission de l'ESA, ciblée sur une collaboration avec la Chine, est à traiter dans ce cadre.

7.6. Préparation de l'avenir à long terme

Plusieurs études de phases 0 sont recommandées, par ordre chronologique proposé de démarrage :

- eLisa : au-delà de la phase 0 mission déjà réalisée par l'ESA, il faut une étude système de la charge utile en liaison avec la mise en place future de l'intégration. Le lien avec les études ESA devra être précisé en préalable,
- Gap : faisabilité de l'emport en passager d'un accéléromètre sur une sonde vers une planète du Système solaire externe, en imposant le minimum, voire pas de contrainte sur le reste de la charge utile,
- Intérêt scientifique et faisabilité de l'emport d'horloge optique en ballon pour des tests du *redshift* gravitationnel,
- Spectropolarimètre ultraviolet pour comprendre la formation et l'évolution des étoiles,
- Spectro-imageur solaire pour l'étude de la raie Ly α de l'hydrogène (Fasolasi).

La R&T joue un rôle crucial pour la préparation des missions sur le long terme. Pour être efficace, elle requiert la pérennité du savoir-faire acquis, ce qui peut être délicat lorsqu'elle repose sur des personnels précaires (par exemple doctorants). Un assouplissement, nécessairement limité, de la règle interdisant le financement des CDD sur les actions de R&T ne pourrait s'envisager qu'à condition que le maintien du savoir-faire dans le laboratoire ne risque pas d'être remis en cause. Par ailleurs, les directeurs d'unité devraient être davantage associés aux discussions entre le CNES et les proposants sur ces questions de R&T, comme c'est le cas sur les autres projets spatiaux.

Trois axes stratégiques ont été identifiés, qui complètent les actions de R&T de base :

- La conception d'instruments d'analyse *in situ*, en particulier de spectroscopie de masse (trappe orbitale) et de datation,
- Les chaînes de détection et leur cryogénie associée dans les domaines des rayons X et du submillimétrique. Ceci suppose au préalable l'établissement d'une feuille de route établie par l'ensemble des acteurs afin d'assurer la cohérence des développements,
- L'interférométrie atomique pour l'espace et les liens optiques.

Le projet de trappe orbitale nécessitera sans doute le développement d'un démonstrateur pour que cet instrument prometteur puisse être proposé de façon

crédible sur une mission spatiale. Sans anticiper sur une décision à prendre qui devra tenir compte d'un contexte qu'on ne connaît pas aujourd'hui, le CERES soutient le principe d'un tel démonstrateur.

8. QUESTIONS TRANSVERSES

8.1. Messages pour la prospective INSU

Comme on l'a vu plus haut, la stratégie des projets au sol et dans l'espace doit être cohérente, d'autant plus que le suivi au sol fait désormais partie intégrante de nombreux projets spatiaux tels que Gaia, Euclid, Svom et Plato. Les besoins en termes de temps d'observation peuvent être très importants et doivent être anticipés. Il est souhaitable que le CNES encourage l'ESA à se saisir de la question et à mener les actions nécessaires auprès de l'ensemble des organisations qui gèrent des télescopes au sol, au-delà de l'ESO avec laquelle des liens existent déjà. L'INSU est en mesure de faciliter l'établissement de ces liens et devrait jouer un rôle proactif.

En aval, les pôles thématiques et les centres de données jouent un rôle important. Il faut poursuivre le développement de services à valeur ajoutée ainsi que les efforts entrepris de standardisation des données dans le cadre de l'observatoire virtuel (International Virtual Observatory Alliance, IVOA), pour lesquels le rôle structurant de l'Action Spécifique Observatoire Virtuel (ASOV) doit être souligné et encourager les actions plus récentes menées dans le domaine de la planétologie, notamment avec l'International Planetary Data Alliance (IPDA).

En matière de structuration de la communauté, les besoins portent sur les domaines de l'exobiologie et des planètes extrasolaires qui relèvent de plusieurs instituts du CNRS ou du CEA et qui bénéficieraient d'une reprise des activités interdisciplinaires qui avaient été initiées avec la mise en place du programme origine des planètes et de la vie (OPV). On note en particulier le besoin de structuration de la communauté exoplanètes autour des missions décidées, Cheops et Plato bien entendu mais aussi JWST pour le court terme et, à moyen terme, de la caractérisation des atmosphères des exoplanètes par une mission dédiée. En parallèle, une meilleure coordination des groupes thématiques du CNES qui s'intéressent à ce sujet (en particulier Système solaire et astrophysique) apparaît comme une nécessité. Enfin, un renforcement de la coordination entre le CNES et les organismes de recherche (CNRS, CEA, universités, etc.) est souhaitable. Les mécanismes existent, les discussions ont bien lieu sur les projets individuels, même si ici ou là des améliorations sont possibles, ou sur des sujets donnés (par exemple les ressources humaines dans les laboratoires) mais il est dommage que le comité inter organismes (CIO) ne se réunisse pratiquement jamais.

8.2. Optimisation du retour scientifique

Du point de vue du retour scientifique pour la France, les contributions instrumentales ou les contributions au segment sol scientifique sont également importantes et valorisables. Ce qui importe, c'est que les contributions des équipes françaises soient visibles et surtout liées aux quelques éléments clés qui conditionnent les performances des instruments et leur maîtrise. Les détecteurs et l'électronique associée sont souvent un de ces éléments stratégiques. En ce qui concerne les données, il serait souhaitable de mieux tirer parti des développements déjà réalisés sur les missions précédentes par des fédérations au niveau de centres d'expertises et/ou de pôles thématiques du CNES et de l'INSU.

Modes de participation aux projets (PI, Co-I, Co-I science) : les situations doivent s'analyser au cas par cas et des différences existent entre sous-thématiques (de nombreux instruments en planétologie et SHM, des missions de type observatoire en astronomie) mais dans tous les cas, il est important de pouvoir prendre la responsabilité de certains instruments et celle-ci doit être argumentée et justifiée. Cette prise de responsabilité ne peut s'envisager que sur des projets bénéficiant d'une forte priorité scientifique et nécessite une analyse approfondie des bénéfices scientifiques et technologiques attendus face aux coûts humains et financiers, ainsi que des opportunités offertes versus les risques encourus. Dans tous les cas, la légitimité du PI doit être reconnue par sa communauté, son expertise technique doit être incontournable et celui-ci doit alors pouvoir bénéficier en retour d'un soutien fort du CNES. À l'autre extrémité, les Co-I science sont essentiels

en ce qu'ils assurent un retour scientifique significatif pour un coût modeste. Ils ne sauraient cependant tenir lieu de politique exclusive.

8.3. Mode de réalisation des projets

Les laboratoires font aujourd'hui face à de fortes tensions sur les personnels techniques, en raison d'une part du non-renouvellement des départs et d'autre part des exigences croissantes des projets, dont la complexité va également croissant, notamment en matière de management, de qualité et de documentation. On peut et on doit, certes réfléchir à ne pas alourdir inutilement les procédures (par exemple en veillant à ce que les demandes du CNES et de l'ESA soient aussi coordonnées que possible) mais cela sera loin de suffire. Il devient nécessaire de s'interroger sur la répartition des tâches entre le CNES, les laboratoires, l'industrie et l'assistance technique et sur l'impact que cette nouvelle répartition aura sur les coûts des projets. Si la réalisation d'instruments ou de sous-systèmes en partie récurrents, à fort héritage ou peu innovants peut sans doute être confiée à l'industrie, il importe de conserver, dans les laboratoires, les tâches liées à la maîtrise des performances : la conception et la validation, les étalonnages et les tests. Il faut de plus veiller à garder dans les laboratoires la mémoire des développements, dès lors qu'elle a un impact sur l'interprétation future des données. Plus généralement, la croissance du nombre de CDD pose la question du maintien des expertises critiques. Ce point est central dans les discussions qui doivent être menées entre l'ensemble des acteurs (CNES, organismes, universités, établissements, etc.) et des solutions innovantes devront être explorées.

La communauté souhaite dans ces conditions que le CNES puisse prendre un rôle accru en matière de maîtrise d'œuvre sur des projets dont la France assure la responsabilité. Cet engagement du CNES ne peut intervenir qu'après analyse approfondie et évaluation des enjeux scientifiques, des capacités des laboratoires et de la plus-value de la contribution attendue du CNES, des exigences des partenaires et de la complexité et des risques du projet.

9. CONCLUSIONS

Le séminaire de prospective a montré combien les perspectives scientifiques étaient exaltantes dans le domaine des sciences de l'Univers qui se nourrit de missions spatiales. La communauté tient à rappeler qu'elle est très satisfaite des conditions dans lesquelles elle travaille avec le CNES. Elle est mobilisée pour que le prochain séminaire de prospective puisse tirer un bilan tout aussi positif que celui de la période 2009-2013.

Jean-Marie Hameury
Président du CERES

CERES SYNTHESIS REPORT

1. SCIENTIFIC PRIORITIES

Main scientific issues in the field of Universe sciences can be organized around four major themes that are emerging from foresight led in Europe with ESA (Cosmic Vision 2005) and Astronet (Science Vision and its update in 2012) and in the United States with the Decadal Surveys (2010-2013). Even though they have remained identical since the scientific prospective seminar in Biarritz, how to address them has significantly changed.

1.1. Planet formation and emergence of life

For this first theme, major issues concern on the one hand the Solar System origin, especially with the study of primitive matter to understand how planetary systems in general and the Solar System in particular are formed, and on the other hand, habitability of planets and their satellites. The objective is to know whether life could have appeared elsewhere in the Universe and if so, under what conditions.

These issues have significantly changed since the seminar in Biarritz. The discovery twenty years ago of the first exoplanet orbiting a star and the wealth of results that followed has disrupted our understanding of Solar System formation and operation. It was such a big surprise to find a giant planet which was closer to its star than Mercury is to the Sun. Issues have afterwards evolved, from discovery stage to census, then to characterization of atmospheres, one of the long-term objectives being the discovery of biomarkers. It is an interdisciplinary field, also concerning Solar System exploration and the required competences are spread across astronomy for methods (remote observation with big ground telescopes and satellite missions), planetology to combine in situ and remote exploration, Earth observation for atmospheric physics and study of the primitive Earth, chemistry, biology, etc.

One of the most striking results of Curiosity was the past habitability of Mars. There have therefore been at least two habitable planets in the Solar System, meaning that many more could exist around other nearby stars and on which biomarkers could be found.

1.2. Overall functioning of the Solar System

The aim is to understand the diversity of planets in the Solar System, their interactions with the Sun, how they work, how the Sun works, what are the physical processes at work, etc. In this framework, giant planets are receiving particular attention, for the planet-satellite-rings-magnetosphere system can be seen as a scale model of the Solar System. It should also be stressed that our understanding of the Solar System was strongly affected by the discovery of exoplanets and their diversity.

Issues have also changed in the field of solar and plasma physics. Nowadays, most recent missions are American – ESA's missions will be launched by the end of the decade – and they have shown the importance of an overall vision of the Sun, with in particular the possibility to obtain images of the Sun in full with the two STEREO satellites. Besides, the Sun-heliosphere-magnetosphere(s) set is more and more considered as a system. Emphasis is put in particular on Earth-Sun relationships issues, which have important social repercussions, with the development of space meteorology and the study of the impact of solar variability on climate and Earth atmosphere. Progressing in these fields implies a better understanding of microphysics of natural plasma, which requires an exploration of space and time scales that are not accessible with current instruments.

1.3. Physical laws governing the Universe

Thanks to the extreme physical conditions that are prevailing in the very early Universe or nearby black holes, the laws of physics can be tested in conditions that are impossible to create on Earth. Besides, some constraints on Earth, such as gravity, can be overcome in space and conditions of stability can be spread over the long term and large distances, which is impossible to obtain in laboratories on Earth.

Main issues about these themes concern the laws of gravity for the most part: is general relativity really a good description of gravity, even at large distances or with a strong gravitational field? And on a more fundamental level, how can we combine quantum mechanics and general relativity? How can we evidence a new field, which would be added to gravitation in a theory unifying all fundamental interactions? Besides, the nature of dark matter and dark energy, which accounts for 95% of the energy content of the Universe, still remains unknown, despite significant progress made in this field, as described below.

1.4. Origin and evolution of the Universe

How was the Universe formed? How did it structure itself to create the galaxies, stars and planets that we are currently observing? What will become of it? These are questions that astronomy has always been trying to answer and for which major progress has been made these last few years.

Planck measured with unprecedented detail, the geometry and the content of our Universe. As for the latter, dark matter and dark energy are largely prevailing (95%) over baryonic matter, but in proportions that are quite different from what had been estimated before. It has validated the so-called « standard model » and – what is quite new – showed that, in accordance with the generic forecast made by models supporting the inflation theory (fraction of a second during which the size of the Universe grew exponentially by several orders of magnitude), primordial fluctuations were not really scale invariant. In 2020, ESA second medium-sized mission, EUCLID, for which France is responsible for the scientific consortium lead, will study dark energy, which is causing the acceleration of the Universe's size we can observe nowadays, and large-scale dark matter distribution.

Main open questions concern the inflation stage and the end of the dark ages, a period during which the first stars and galaxies were formed.

1.5. Recent evolutions

Among the priority issues mentioned above, two deserve our particular attention due to recent developments showing that important progress is possible on a short-term: the inflation period of the primordial Universe and the characterization of exoplanets' atmospheres.

Other significant developments made since the seminar in Biarritz deserve to be highlighted. In the field of planetology, emphasis is put on the sample return from Mars but also on primitive bodies (Phobos, asteroids, regions of the Moon that were not explored by Apollo), linked with issues about Solar System formation and origins of life. There was also another significant shift: the growing importance given to coupling between various areas of the Solar System.

2. A COMPREHENSIVE STRATEGY IN UNIVERSE SCIENCES

To address these issues, we often need a multifaceted strategy, combining ground and space observation, computer simulations and even experiments in laboratories. A given scientific problem, due to its complexity, cannot indeed be resolved by using one single type of observations. We need to have an access to several wavelengths, monitor all-sky surveys, combine in situ and remote observations, have laboratory measurements, etc. This often requires the use of heterogeneous data from different sources. It is therefore necessary to develop a comprehensive strategy of ground and space means. Due to space costs and constraints, observations and experiments are only made in space if they cannot be achieved on the ground, because of the atmosphere – which can be opaque at certain wavelengths or place of a turbulence whose effects cannot be all corrected, because of a necessary stability or continuity of observations and measurements and, of course, because of the necessity to make in situ observations. A strong combination between ground (especially INSU) and space (CNES) foresights is therefore essential and the closeness of both prospective seminars, particularly in the field of astronomy, was an opportunity which was seized.

3. IMPORTANCE OF THE SPACE FIELD

Publications are a traditional (and traditionally disputed) indicator of scientific research impact. The analysis of French publications (that is to say publications whose first author or corresponding author's affiliation is in France) issued in 2012 and 2013 in journals whose impact factor is higher than 2 and covering CERES research areas, showed that half of them displayed new observation data. Among them, almost two thirds were collected by satellites or space probes. It is thus showing the importance of space studies in the field of Universe sciences and the scientific return is worth the investments made in space studies.

4. THEMES AND PRIORITY MISSIONS

In this context, the prospective seminar has highlighted three long-term and medium-term scientific priorities, corresponding to missions whose programmatic framework has already been defined – ESA three large-sized missions (L) and three other medium-term priorities, which still need to be included in programs.

4.1. Jupiter's satellites as a planetary system model: Juice

Juice is ESA first large-sized mission (L1), selected in 2012 and to be launched in 2022. Juice will explore Jupiter and its environment (atmosphere, magnetosphere and interactions with the four Galilean satellites). Special attention will be given to the exploration of the Icy Moons Europe, Ganymede and Callisto, which shelter liquid-water oceans under a thick layer of ice, thus being of particular interest to exobiology, especially Europe, whose liquid water could be in direct contact with rocks. France is responsible for the development of the imaging spectrometer MAJIS and is contributing to four out of a total of ten instruments.

4.2. The hot and energetic Universe: Athena

Most of the baryonic matter in the Universe is extremely hot and can only be observed with X-rays. The study of this hot gas, its properties and its evolution, in a cosmological context linked with the large-scale structuration caused by dark matter (translating into large-scale distribution of galaxies and, on a smaller scale, galaxy and star formation) is essential to take a comprehensive view of the Universe.

Besides, the accretion of matter onto black holes in galaxies' active cores is one of the main energy sources in the Universe and has a major influence on galaxy formation and evolution, via feedback processes – injection of matter and energy in the surrounding environment. In addition, only the study of these objects can lead us to the physics of black holes and help us test gravitation laws with strong fields.

ESA selected this theme in late 2013 for the second large-sized mission (L2), to be launched in 2028. The mission project ATHENA falls within this theme.

4.3. Gravitational Universe: eLisa

Gravitational-wave detectors will open new windows to observe the Universe in astrophysics, promising new discoveries. On the ground, observable frequencies are in the range of hundreds Hz, whereas waves at millihertz frequency can be observed in space. Ground detectors advLIGO and advVIRGO should for the first time directly detect gravitational waves before the end of this decade and also help us detect the coalescence of stellar compact binaries. However, to observe the coalescence of supermassive black holes at the centers of galaxies, we need to go in space. Among other objectives that are achievable from space, we can mention the observation of stellar binaries whose orbital periods are short (only a few hours) and the observation of the stochastic background of gravitational waves, which could have been generated during a phase transition in the primordial Universe. These observations will help us test general relativity with a strong gravitational field, more directly and precisely than the ATHENA mission.
ESA selected this theme in late 2013 for the third large-sized mission, to be launched in 2034. The eLisa project falls within this theme.

4.4. The Universe at t ~10^{-32} s

The inflationary period correspond to the time during which the size of the Universe grew exponentially with a factor higher than 1030. This phenomenological concept was introduced to explain the large-scale homogeneity and flatness of the Universe – the Universe is Euclidean. Physical cause remains unknown. Many models were considered, all mentioning the possibility of a new physics. Regardless of the model, inflation generates gravitational waves that leave a very specific signature in the polarization of the Cosmic Microwave Background's radiation. The ground experiment BICEP-2 claimed it had detected this signature on a small portion of the sky (5%) and on a single frequency, thus making it difficult, if not impossible, to remove our Galaxy's emission, which significantly contribute to the total signal. Planck may confirm these results but only to a limited extend. It is now more relevant than never to design a dedicated space mission, which would be able to measure the energy generated during the inflationary period and define a wider theoretical framework, in which we could find the inflationary model (grand unification or other). France has the necessary legitimacy in this field, due to its responsibilities for the Planck mission and its R&T developments that have been carried out for many years to support this mission.

4.5. Exoplanets: from census to detailed studies

How were these planets formed? What is their structure, their composition? Do they have an atmosphere and if so what about its composition? Are they habitable? These are a few questions that are asked. Plato, which has just been selected as the third medium-sized mission (M3) of ESA's Cosmic Vision program, will detect telluric exoplanets in the habitable zone of Sun-like stars and provide us with their main characteristics (mass, radius, density), as well as study the internal structure of stars through seismology. It is essential for France to be part of these two objectives. The study of exoplanets' atmospheres is the next step that will eventually address the issues of habitability and biosignature research. Large ground (E-ELT) and space (JWST) telescopes will make a significant contribution, which will however be limited by the impossibility to simultaneously observe a wide spectral range, from visible to infrared, and by a restricted efficiency due to constraints imposed by the non-specialization of these observatories. A dedicated mission is therefore essential.

France has the legitimacy to support this project, due to its role in the COROT mission and the expertise of French teams in the development of infrared spectrographs.

4.6. Sample return

The search for prebiotic molecules on Mars as well as the analysis of primitive matter on the Moon and small bodies of the Solar System to address the issue of the Solar System's formation require now a sample return on Earth. Laboratory measurements made on samples whose origin and background are well known can address planetology issues more precisely than in situ measurements. It is indeed possible to benefit from analytical performance of laboratory instruments, to adapt protocols to the nature of the sample and to benefit from the expertise of a broader community.

Sample return is a priority both in Europe and in the United-States, supported by the ExoMars and Mars2020 missions. Proper European positioning requires technological developments on payloads for in situ selection and characterization of samples and their environment.

5. EVOLUTION OF THE CONTEXT

The scientific prospective seminar in La Rochelle was held in an ESA programmatic context less gloomy than during the last seminar in Biarritz. ESA's next deadline will be the call for missions, for the fourth medium-sized mission (M4), which should occur in 2014, and the themes for L2 and L3 missions have already been selected in late 2013. M4 is to be launched in 2026, L2 in 2028 and L3 in 2034. Contributions to missions of other agencies, on a shorter term, will bring a bit more flexibility and adaptability to this program. In the United-States the priorities of the community have been exposed during the three Decadal Surveys corresponding to ESA's field of competence which took place between 2010 and 2013.

From an institutional point of view, French research landscape was deeply modified by Future Investments (IDEX, LABEX, EQUIPEX), by the reinforcement of the role of universities and by CNRS's structuration in institutes. The space user community has grown and most of the astronomy laboratories – at the large meaning of INSU – are leading activities funded by CNES. Besides, there is an increasing involvement of Earth Sciences laboratories as well as particle and fundamental physics laboratories from the IN2P3 and INP institutes from CNRS and CEA, which are contributing to projects such as Planck, FERMI, Pharao, Microscope, EUCLID, eLISA, etc.

Finally this prospective seminar was held in a difficult budgetary background which caused serious strains on laboratory resources, in particular on human resources and, most recently, on CNES budget, without any forecast of a short-term improvement. It will be more essential than ever to be wary of resources availability while implementing the recommendations formulated during the seminar.

6. RESULTS SINCE THE SEMINAR IN BIARRITZ

Referring to the priorities established during the prospective seminar in Biarritz, results have been positive. With the notable exception of SIMBOL X and, to a lesser extent, SMESE which was classified as a second priority, all priorities have materialized, sometimes in a different form from what had been planned (for instance, a seismometer will eventually be carried to Mars and not to the Moon). We have to particularly welcome the fact that the strong priority of the dark matter mission has materialized into a strong involvement on the EUCLID mission, at a PI level. The scientific community benefits from many missions which are providing it with data. Some of them have been operating for a long time (more than 15 years) and the current balance between exploitation providing scientific feedback and the preparation of future missions that will shape the future of space studies are satisfying. It is important that it keeps being the case.

We also have to mention that almost all missions were delayed, regardless of their status (approved or not) and the context of their implementation (ESA, NASA, national and bilateral missions). Besides, these delays were often significant (four years and more). Even though we cannot address this issue, we need to take it into account while selecting projects, in particular by ensuring the sustainability of the scientific case.

7. OUTLINES OF THE PROGRAMMING

7.1. Program strategy

ESA programs: ESA mandatory scientific program and robotic exploration optional program are the backbone of French space program in Universe sciences. Analysis of the 2012-2013 publications shows that returns for France of the mandatory program match our ambition, since about 60% of French « space » publications come from ESA missions. The support of French contribution to all scientific program missions – instruments, ground segment and data processing – is the absolute priority of CERES.

Besides ESA programs, we need to maintain and even develop strategic opportunities, a concept that has appeared since the seminar in Biarritz, particularly with contributions to NASA missions toward Mars, Curiosity and Insight, which proved or promise to be very productive. Strategic opportunities are significant contributions to missions from other space agencies (particularly NASA), that are fairly equal to the French contribution to mandatory programs. We can therefore reach some priority objectives which are not covered by ESA and foster adaptability. They have to target key priorities of the community, involve a well-known expertise of French teams, visibility of the French contribution and a very limited program risk. They are also based on a prior R&T program and on the realization of demonstrators, so that considered contributions have the required technology readiness level.

Small opportunity contributions provide an excellent scientific return for a low or very low (Co-I science contributions) investment and must be strongly supported. It could be interesting to carry more passenger instruments on missions designed to study a different field, such as T2L2 on Jason, which also advocates for a strengthening of the links between CERES and TOSCA.

As for national and bilateral missions, Microscope and TARANIS missions are in the final stage of the development process and we must ensure optimal scientific exploitation. The SVOM mission, a partnership between China and France, is restarting. These national missions are widely concerning microsatellites, which should ensure the flexibility and adaptability of CNES scientific program. However, for various reasons, the microsatellite program turned out to be much less adaptive than initially expected. Sun – Heliosphere – Magnetospheres community remains attached to this field but CERES has, as of today, not identified any new priority project to be initiated.

The balloons program has a dual objective: on the one hand to prepare future space missions and on the other hand to swiftly obtain results on highly targeted scientific issues. They must be put in competitive situations vis-à-vis other projects funded by CNES, especially as some of the balloons projects have proved to be very complex and can by far exceed the cost of an opportunity mission. The seminar led to no identification of a new priority project with a good science/cost balance to be initiated in addition to the currently supported programs.

During the seminar, several long-term projects were identified, requiring immediate phases 0 and R&T developments, as well as demonstrators. The R&T base is playing a strategic role and is essential to prepare future missions.

Nanosatellites are perceived like a potentially interesting technology but they are too recent and projects justifying investments on a scientific and/or technological level only have not been developed yet. CNES should widely release the available data,

particularly on the results of the ongoing exploratory phase 0, through the organization of workshops and also arrange the variety of projects born in universities. Nanosatellites are nowadays designed for the most part by students. Without changing the spirit or the conditions of implementation, laboratory contribution should allow the introduction of targeted scientific objectives. Potential scientific proposals concerning nanosatellites will naturally be in competition with other projects funded by CNES.

Finally, a targeted contribution to the space weather area in ESA optional program SSA (Space Situation Awareness) is desirable and would allow the integration of French teams to European coordinated actions on space weather. It would also highlight their expertise in this field.

7.2. Operational or selected missions

It is necessary to ensure, at the right level, the exploitation of ongoing or just selected missions, to guarantee a scientific return of investments made during the instruments' development. It is also important to keep resources that are necessary to future missions, thus preparing the future. The weight of exploitations compared to developments is satisfying. Given the current programs and commitments, it is undesirable to see this balance significantly change. As for laboratories, it is important to keep the commitments made on the « scientific support » part of the budget, even when projects are delayed.

Besides, priorities established by the scientific community on ESA missions, which translated into a selection of missions, should be validated. We particularly need to:

- *formally approve the French contribution to the Juice mission, ESA L1 mission,*
- *validate the French contribution to Plato, selected in February 2014 as ESA M3 mission,*
- *display an ambitious contribution to the X-ray observatory ATHENA, corresponding to the theme selected in early 2014 by ESA to be the second large-sized mission. The optimal scope of the French contribution still needs to be defined, with France being requested to be responsible for one of this mission's two instruments,*
- *prepare French contribution (instruments, data analysis and additional space and ground observations) to eLISA, a mission dedicated to the observation of gravitational waves: this theme had been selected as ESA third large-sized mission.*

It should be reminded that, even though France was at the starting point of the missions Juice and Plato, the contributions of French teams to these missions have been restricted for budgetary reasons.

7.3. Exploration program

The schedule and the financing of ESA ExoMars 2018 mission are not consolidated today and the ExoMars program is a good example of the difficulty to combine sciences and the objectives of an optional program. On the other hand, the participation to NASA Mars 2020 program is a very interesting scientific opportunity. CERES wish for the ExoMars program to be successfully completed, while offering the teams the possibility to contribute to NASA program, at a significant albeit lower level.
The stakes of Mars exploration are important enough for us to prepare the continuation of the ExoMars program in a European context. Regardless of the international collaboration context of a sample return from Mars, the ambitions of Europe cannot be limited to passenger contributions on another agency's mission.

7.4. M4 mission of ESA mandatory program

Several projects, corresponding to the priorities of the French scientific community have already been identified by thematic groups and justify an ambitious contribution and a strong support from CNES to the preparation of the proposals. Among the themes that needed to be supported, the seminar led to the identification of:

- *a post-Planck mission to characterize B-mode polarization of the Cosmic Microwave Background, aiming to access the first fraction of a second of the Big Bang and the inflationary period,*
- *a mission for spectroscopic characterization of the atmospheres of exoplanets,*
- *a mission in the far-infrared to study star and galaxy formation,*
- *a mission to test the equivalence principle on quantum objects. It is essential for CNES to help reconfigure the consortium of the STE-QUEST mission, submitted to become ESA M3 mission, as well as support R&T actions,*
- *a mission on natural plasmas microphysics.*

We could also add to this list the sample return from one of the smallest bodies in the Solar System, if an adequate target, compatible with the schedule of the M4 mission, was identified.

CERES recommends CNES to organize an assessment of the proposals which will be submitted to answer ESA's call for proposals in late 2014, to ensure the support of CNES, which will be different according to the needs and scientific priorities determined during this seminar.

7.5. Opportunities

Themes corresponding to the medium-sized missions listed above, which are strong scientific priorities (especially the study of B-mode polarization of the CMB or the spectroscopic characterization of exoplanets) and which will not be selected by ESA, could naturally become strategic opportunities. Besides, the preparation and implementation of sample return missions (Mars is the first priority on the long term, but there is also the Moon, Phobos and asteroids) is a priority which would justify a significant French contribution. The participation to NASA mission, Mars 2020, preparing the sample return from Mars, can also be considered as a strategic opportunity.

As for the foresight, the trapdoor concept, a very high resolution mass spectrometer, could lead us to take part in planetology missions. Besides, the possibility to carry a GAP accelerometer on a probe towards the outer planets of the Solar System could offer interesting perspectives. This requires however a scientific structuring of the project and an analysis of the possibility to carry this instruments – demanding in environmental conditions – as passengers.

Decisions concerning opportunity contributions in the usual sense (i.e. « small » contributions, typically less than €3 million) must be dealt with on a case-by-case basis and it is not necessary to list here priority missions. Potential participation to ESA second small-sized mission, focused on collaboration with China, must be addressed in this framework.

7.6. Preparing the future on the long term

Several studies on phases 0 are recommended, ordered chronologically from their starts:

- *eLISA: besides phase 0 already done by ESA, we need a system study of the payload, linked with the future implementation of the integration. The connection with ESA studies will have to be specified in advance,*
- *GAP: feasibility to carry an accelerometer as a passenger instrument on a probe towards a planet in the Outer Solar System, with minimal or even no constraints for the rest of the payload,*
- *Scientific interest and feasibility of payload lift of an optical clock with a balloon to test the gravitational redshift,*
- *Ultraviolet spectropolarimeter to understand star formation and evolution,*
- *Imaging solar spectrograph to study the Ly-α radiation emitted by hydrogen (Fasolasi).*

R&T is playing an essential role to prepare missions on the long term. To be efficient, it requires the lonGeVity of the acquired expertise, which can be difficult when it is relying on non-permanent staff (PhDs for instance). A necessary restricted relaxing of the rules prohibiting the financing of fixed-term contracts in R&T actions could be considered, provided that the expertise of the laboratories will not be questioned. Besides, the heads of the different units should be more involved in the discussions between CNES and the proposers on R&T issues, as it is the case for other space projects.

Three strategic lines were identified, completing basic R&T actions:

- *Design of in situ analysis instruments, particularly for mass spectroscopy (trapdoor) and dating,*
- *Detection channels and their associated cryogenics in the fields of X-rays and submillimeter. It requires a roadmap established by all actors to ensure the consistency of developments,*
- *Atomic interferometry in space and optical links.*

The trapdoor project will certainly require the development of a demonstrator so that this promising instrument can be a convincing proposal to be carried on a space mission. Without any anticipation on a decision which will be taken later and will have to take into account a background we do not know to date, CNES is supporting such a demonstrator.

8. CROSS-CUTTING ISSUES

8.1. INSU foresight

As seen above, ground and space project strategy must be consistent, especially since ground monitoring is now an integral part of many space projects such as Gaia, EUCLID, SVOM and Plato. Observation needs can be very significant and must be anticipated. It is desirable that CNES could incite ESA to address this issue and to take the necessary actions with the organizations which are managing ground telescopes, in addition to ESO, with which bonds already exist. INSU can facilitate the establishment of such connections and should play a significant role.

Thematic units and data center are also playing an important role. We need to pursue the development of value-added services and our efforts to standardize data with the virtual observatory (International Virtual Observatory, IVOA) – for which the structuring role of ASOV (Action Spécifique Observatoire Virtuel) must be underlined – and to foster more current actions in the field of planetology, especially with the International Planetary Data Alliance (IPDA).

As for the structuring of the community, there are needs in the fields of exobiology and extrasolar planets, concerning various CNRS and CEA institutes. They would benefit from a resumption of interdisciplinary activities which were initiated with the implementation of the planet and life origin program (OPV). We can mention the need in particular to structure the exoplanet community around the validated missions, CHEOPS and Plato of course, but also JWST for the short term and, for the medium term, the characterization of exoplanets' atmospheres with a dedicated mission. It is also necessary to achieve a better coordination of CNES thematic units which are studying these themes (in particular Solar System and Astrophysics units).
Finally, it is desirable to improve coordination between CNES and research institutes (CNRS, CEA, Universities, etc.). Mechanisms do exist and individual projects (even though there is scope for improvement) or particular topics (for instance human resources in laboratories) are discussed. It is however unfortunate that the inter-organizational Committee (CIO) does hardly ever meet.

8.2. Optimizing scientific return

As for scientific return for France, instrument contributions and contributions to the scientific ground segment are also important and valuable. It is necessary that the contributions of French teams remain visible and related to a few key elements affecting the performance and the control of the instruments, such as detectors and their associated electronics. As for data, it would be desirable to take a better advantage of developments already achieved during past missions by federations in centers of expertise and/or thematic units at CNES and INSU.
As for the modalities of participation (PI, Co-I, Co-I science), they must be analyzed on a case-by-case basis and there are differences between sub-theme elements (many instruments in planetology and SHM, observation missions in astronomy). Anyway, it is important to take a duly justified responsibility for certain instruments. This responsibility can only be considered for projects with strong scientific priority and need a thorough analysis of expected scientific and technological benefits in comparison with human and financial costs, as well as opportunities vs. risks. In any case, the PI legitimacy has to be recognized by the community, its technical expertise has to be essential and it has to benefit from a strong support by CNES in return. Besides, Co-I science are fundamental because they allow a significant scientific return at a modest cost. It cannot however be an exclusive policy.

8.3. Projects realization

Laboratories are nowadays facing strong constraints concerning technical staff, due to on the one hand workforce non-renewal and on the other hand increasing requirements of projects, whose complexity is also going up, especially in terms of management, quality and documentation. We can and should try not to complicate procedures (for instance by ensuring that CNES and ESA demands are as coordinated as possible), but it cannot be sufficient. It is necessary to question the division of labor between CNES, laboratories, industries and technical assistance, and the impact of this new division on project costs. The production of partially recurrent instruments and sub-systems, with a strong legacy or which are not very innovative, can be entrusted to industries. It is however important to keep tasks linked with performance control, that is to say design and validation, calibration and tests, inside laboratories. Moreover, we need to keep track of the developments in laboratories, if it has an impact on future data interpretation. Generally, the increase in the number of fixed-term contracts of employment (CDDs) questions the maintaining of critical expertise. This theme is fundamental for the discussions that are to be led with all actors involved (CNES, organizations, universities, establishments, etc.) and innovative solutions must be examined.

The scientific community wishes for the CNES to participate more actively to the management of projects for which France is responsible. This commitment from CNES can only occur after a thorough analysis and an assessment of scientific issues at stake, of laboratory capacities, of added value from the expected CNES contribution, of partners' requirements and of project complexity and risks.

9. CONCLUSIONS

The prospective seminar showed that scientific prospects were thrilling in the field of Universe sciences, which thrive through space missions. The community wishes to point out that it is very satisfied with its working conditions with CNES. It hopes that the next prospective seminar will obtain results that are as positive as those achieved during the 2009-2013 period.

Jean-Marie Hameury
President of CERES

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

1. LES GRANDES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

1.1. Le contexte

La thématique Astronomie et Astrophysique se caractérise par une étonnante diversité dans les méthodes d'observation employées (des ondes radio aux rayons gamma, autant au sol que dans l'espace) et dans les échelles considérées (des étoiles situées à quelques années-lumière du Système solaire jusqu'à l'Univers dans sa globalité).

Les grandes questions scientifiques ont beaucoup évolué au cours des deux dernières décennies, avec notamment la montée en puissance d'une nouvelle thématique : la recherche et la caractérisation des planètes au-delà du Système solaire, et une cosmologie de précision qui a conduit à une révision profonde de notre vision de notre Univers. Les techniques d'observations ont également considérablement changé, avec l'avènement de l'observation multi-longueurs d'ondes et multi-techniques. Désormais, rares sont les découvertes obtenues à partir d'une seule observation issue d'un seul instrument.

1.2. Les enjeux scientifiques pour les prochaines années

1.2.1. Évolution de l'Univers : des premiers instants aux grandes structures

Sous l'influence de la gravitation, l'Univers s'est entièrement structuré en 13,80 milliards d'années, passant d'un milieu quasi-homogène et isotrope, à une toile cosmique formée de structures à toutes les échelles, des étoiles aux galaxies et aux amas de galaxies. Les récentes avancées en cosmologie nous donnent désormais une vue précise du contenu en matière-énergie de l'Univers : ~30 % de matière (dont ~85 % de matière sombre et seulement ~15 % de baryons) et ~70 % d'énergie sombre. 96 % du contenu en matière-énergie de l'Univers échappe encore à notre compréhension alors que la nature et les propriétés de ce contenu sont intimement liées à l'ensemble des structures que nous observons.

Au sein de ce cadre, les processus de formation et d'évolution des structures nous apparaissent toujours comme très complexes, quelle que soit l'échelle considérée (des étoiles aux trous noirs, des galaxies aux amas de galaxies) et quelle que soit l'époque étudiée (de la fin des âges sombres jusqu'à l'Univers proche). Les clés d'une meilleure compréhension résident dans l'étude des échanges de matières sombre et baryonique entre structures.

De grandes questions fondamentales restent donc ouvertes :

- *Comprendre la phase d'inflation de l'Univers primordial :* quelle physique a opéré dans les premiers instants de l'Univers ?
- *Caractériser l'énergie sombre et la matière sombre :* quelle est la nature de l'énergie sombre ? Comment la matière s'assemble-t-elle au sein des grandes structures et quel rôle y joue la matière sombre ?
- *Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets :* comment et quand se sont formés les premiers objets, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies ? Comment et quand la réionisation a-t-elle eu lieu ?
- *Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies :* comment le gaz est-il accrété et transformé à l'échelle des amas de galaxies, des galaxies et de leurs trous noirs centraux ? Comment la formation et l'évolution de ces structures affectent en retour leur réservoir de baryons ?

Fournir des réponses à ces questions éclairera notre compréhension de la formation des galaxies et des grandes structures, du cadre cosmologique dans lequel cette formation opère et des processus physiques qui y prennent part.

1.2.2. Formation et évolution des étoiles et des planètes

La formation et l'évolution des étoiles et des planètes sont des questions fondamentales qui influencent de nombreux autres domaines de l'astrophysique. En particulier, le milieu interstellaire est intimement lié aux étoiles et aux planètes. Elles s'y forment et y meurent, les enrichissant au passage de nouveaux éléments lourds et y injectant de l'énergie. Pendant toute la vie des étoiles, plusieurs processus physiques influencent leur dynamique et impactent donc leur évolution. En particulier, la rotation, le champ magnétique, les pulsations et la perte de masse (vent, éjections), ainsi que les interactions avec un compagnon stellaire ou planétaire sont des facteurs-clés. Enfin, l'étude des exoplanètes est un domaine qui a très fortement évolué durant la dernière décennie et de nouvelles questions plus précises ont émergé.

De grandes questions fondamentales restent donc ouvertes :

- *Comprendre la formation des étoiles et des planètes :* comment évoluent la composition chimique et le moment cinétique du milieu interstellaire et des étoiles ainsi que les propriétés de la poussière interstellaire ? Quel est le rôle des différents processus pendant la formation stellaire et planétaire ? Comment se forment les étoiles massives ? D'où vient le champ magnétique fossile et comment peut-il survivre dans les étoiles ?
- *Comprendre l'évolution des étoiles et des planètes :* comment fonctionnent et interagissent les processus physiques à l'intérieur des étoiles ? Comment les étoiles et les planètes interagissent-elles entre elles et avec leur environnement proche ? Que se passe-t-il dans les dernières phases de la vie des étoiles ?
- *Caractériser les exoplanètes et chercher les bio-signatures :* quelle est l'architecture des systèmes planétaires ? Quelles sont les structures internes des différents types de planètes ? Quelles sont les conditions physiques qui règnent à la surface des petites planètes et à l'intérieur des planètes gazeuses et sont-elles favorables à l'apparition de la vie ?

1.2.3. Étudier l'Univers énergétique

Les phénomènes les plus énergétiques dans l'Univers se rencontrent à l'échelle microscopique (énergie atteinte par les particules et leur rayonnement), à l'échelle stellaire (énergie libérée dans les explosions, énergie mécanique des effondrements, éjections ou chocs de matière, etc.), jusqu'aux échelles galactiques et intergalactiques (accrétion par les trous noirs super-massifs, jets galactiques). Ils sont souvent associés à des conditions physiques extrêmes (champs gravitationnels ou magnétiques intenses, hautes densités de matière, mouvements relativistes, etc.). Leur étude fait appel à l'astrophysique des hautes énergies et présente des interfaces étroites avec la cosmologie, la physique subatomique et la physique fondamentale. Ce champ de recherche s'est beaucoup développé ces dix dernières années avec l'avènement d'observatoires à haute performance en rayons X et gamma, au sol et dans l'espace, et d'importantes synergies existent avec l'ensemble des autres domaines de longueur d'onde. Dans un avenir proche, des avancées sont attendues des détecteurs de messagers non-photoniques (ondes gravitationnelles, neutrinos de haute énergie, rayons cosmiques d'ultra-haute énergie).

Les grandes questions associées peuvent se décliner comme suit :

- *Comprendre les explosions stellaires et la naissance des objets compacts :* comment explosent les supernovæ et quelles étoiles en sont les progéniteurs ? Quels objets compacts sont formés par les explosions stellaires ? Quel est l'effet de ces explosions sur le milieu interstellaire et la Galaxie ?
- *Comprendre l'environnement des objets compacts :* comment se font l'accrétion et l'éjection de matière ? Quels sont les mécanismes non thermiques autour des objets compacts ?
- *Identifier l'origine des rayons cosmiques : quelles sont les sources du rayonnement cosmique galactique ?* Quelles sont les sources et la composition aux ultra-hautes énergies ?
- *Utiliser l'Univers comme laboratoire de physique fondamentale :* est-ce que les lois de la physique fondamentale établies sur Terre sont valables dans des conditions extrêmes ?

2. BILAN DEPUIS LE DERNIER COLLOQUE

2.1. Bilan programmatique

La période couvrant le dernier exercice de prospective a tout d'abord été marquée par la mise en service en 2009, puis l'exploitation scientifique, de deux très importantes missions de l'ESA : la mission Planck dédiée à l'observation du fond diffus cosmologique, et la mission Herschel consacrée aux observations astronomiques dans les domaines de l'infrarouge lointain et du submillimétrique. Elle s'est poursuivie par le succès du lancement, en décembre 2013, de la mission européenne Gaia consacrée à l'étude de la structure, de la formation et de l'évolution de la Galaxie.

L'exploitation scientifique de nombreuses missions s'est également poursuivie. La mission CoRoT, première mission spatiale française d'astrophysique depuis plus de 30 ans, a continué ses observations dans le domaine de la détection des exoplanètes et de la micro-variabilité stellaire. Toutefois, suite à une panne, l'arrêt officiel de la mission a été décidé en juin 2013, après 6 ans d'opérations. Les missions européennes XMM et Integral, et la mission américaine Fermi fonctionnent toujours nominalement et continuent de fournir des données de qualité dans le domaine des hautes énergies.

Cette période se caractérise aussi par la mise en place effective du programme Cosmic Vision de l'ESA qui prend la suite des programmes Horizon 2000 et Horizon 2000 Plus. Plusieurs missions d'astronomie et d'astrophysique ont ainsi été sélectionnées dans ce cadre :

- Les thèmes scientifiques pour les deux futures missions de type *Large* (L2/L3), respectivement *The Hot and Energetic Universe* (2028) et *The Gravitational Universe* (2034), sont désormais choisis et directement liés à l'astrophysique. Même si la définition des missions associées à ces objectifs scientifiques va suivre un long processus qui prendra plusieurs années, cette sélection aura un impact très important sur la communauté française en raison de l'importance de ces missions.
- La seconde mission de type *Medium* sélectionnée par l'ESA (M2, 2020), Euclid, est consacrée à la compréhension de l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers et à la nature de l'énergie sombre. Cette mission, dont le *Principal Investigator* est français, mobilise déjà un très grand nombre d'astronomes français et représente un enjeu très important pour la France.
- La troisième mission de type *Medium* sélectionnée par l'ESA (M3, 2024), Plato, est consacrée à la recherche et à l'étude des systèmes planétaires extrasolaires, en particulier les planètes de type terrestre dans la zone habitable autour d'étoiles comme le Soleil, et à la caractérisation précise des étoiles hôtes par sismologie.
- La première mission de type *Small* de l'ESA (S1, 2017), Cheops, est quant à elle dédiée à la recherche de transits d'exoplanètes devant des étoiles brillantes (V < 9) déjà connues pour posséder des planètes.

Plusieurs projets sous ballon stratosphérique ont également été décidés lors de cette période : Euso-ballon (premier vol en 2014), projet devant démontrer le concept de détection des rayons cosmiques de très haute énergie depuis l'espace, et Fireball 2 (premier vol en 2015 ou 2016), projet consacré à l'étude de l'émission UV du milieu intergalactique dans lequel on pourrait trouver une grande fraction des baryons manquants dans l'Univers local.

2.2. Quelques résultats scientifiques saillants

Nous ne présentons ici que quelques résultats saillants obtenus au cours de ces dernières années. Le choix est avant tout illustratif et n'est donc pas un jugement de valeur.

2.2.1. Herschel

Lancé en 2009, conjointement avec le satellite Planck, le satellite européen Herschel a été éteint en juin 2013 avec la fin de la réserve d'hélium liquide indispensable au fonctionnement de tous les instruments à bord. Il a offert une vue nouvelle sur l'Univers froid.

Les scientifiques français ont été particulièrement actifs lors de l'exploitation de la mission. On notera par exemple la première étude détaillée de la structure du milieu interstellaire dense où se forment les étoiles. Pour la première fois, il a été possible de mettre en évidence des striations dans le milieu interstellaire (Fig. 1) correspondant à des écoulements de matière vers les filaments. Ces mouvements turbulents qui ont lieu à des vitesses supersoniques feraient suite aux explosions d'étoiles massives.

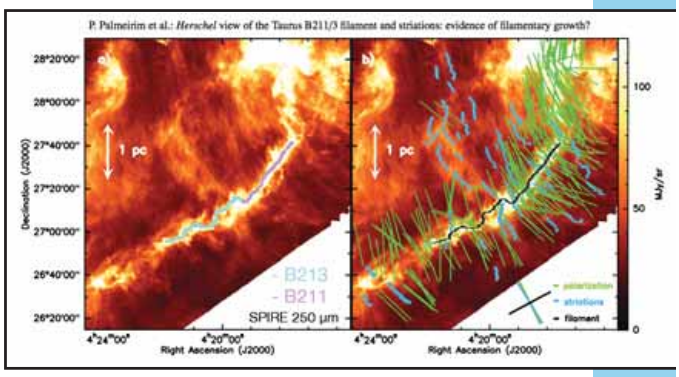


Fig. 1 : Ecoulements de matière vers les filaments observés par Herschel.

Plusieurs molécules (H_2O^+, H_2Cl^+, HCl^+, etc.) ont également été découvertes par Herschel. Celui-ci a notamment permis l'étude de la molécule H_2O, quasiment inobservable depuis le sol, et qui a été découverte dans l'astéroïde Cérès, autour de toutes les protoétoiles et même dans les disques protoplanétaires ou dans les cœurs pré-stellaires gelés. Le domaine extragalactique n'est pas en reste avec par exemple la découverte de l'évacuation de 10^8 $M_\odot$ à la vitesse de 1 000 km/s dans Arp220, ou l'étude du fond cosmologique infrarouge qui a révélé des galaxies en pleine activité dans des halos de matière sombre.

2.2.2. Planck

Également lancé en 2009 avec le satellite Herschel, le satellite européen Planck a été désorbité en octobre 2013 après avoir livré les premières cartes complètes du ciel dans le continuum millimétrique et submillimétrique. La carte des anisotropies de température du fond de rayonnement cosmologique à 3 K, ou *Cosmic Microwave Background* (CMB), obtenue par Planck est la plus précise à ce jour (Fig. 2) et demeurera probablement une référence pendant de très nombreuses années.

L'analyse statistique de cette carte est en remarquable accord avec les prédictions d'un modèle d'Univers fondé sur le *Big Bang* inflationnaire. L'Univers, après la mission Planck, est ainsi très bien décrit par moins de dix paramètres : une normalisation des fluctuations, les densités réduites de matière sombre (0,26) et de matière ordinaire (0,05), une constante cosmologique non nulle (0,69) équivalente à l'énergie sombre (le total des densités est égal à l'unité donc la courbure est nulle à mieux que un pour mille près), l'indice de la loi de puissance des fluctuations initiales de densité d'énergie qui vaut 0,96 (significativement différent de 1 en accord avec le paradigme inflationnaire), une réionisation de l'Univers vers un *redshift* de 11 et enfin la constante de Hubble de 67,8±0,8 km/s/Mpc (légèrement inférieure à la valeur donnée par d'autres observations). L'Univers a dorénavant un âge précisément connu de 13,80 milliards d'années à 40 millions d'années près.

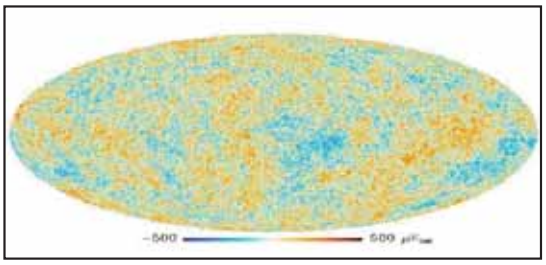


Fig. 2 : Carte du ciel complet en projection Mollweide du CMB en coordonnées galactiques (centre galactique au centre, plan galactique sur une ligne horizontale centrale). Les anisotropies témoignent des fluctuations de densité de la matière, 380 000 ans après le Big Bang, qui ont conduit à la formation des grandes structures et des galaxies.

2.2.3. CoRoT

Lancé en décembre 2006, CoRoT était la première mission spatiale française d'astrophysique depuis plus de 30 ans. Cette mission a abouti à de très nombreuses découvertes en exo-planétologie, comme en physique stellaire. Ainsi CoRoT a découvert 34 nouvelles exoplanètes qui illustrent bien la grande diversité des exoplanètes par rapport aux planètes de notre Système solaire. Leurs périodes orbitales s'échelonnent d'une vingtaine d'heures pour CoRoT-7b, à 95 jours pour CoRoT-9b qui reste l'une des très rares exoplanètes « tièdes » au rayon mesuré. La densité de ces planètes couvre une gamme étonnamment large : CoRoT-20b, près de deux fois plus dense que la Terre, révèle un intérieur très enrichi en éléments lourds dont l'origine est difficile à expliquer par les modèles actuels de formation planétaire ; CoRoT-26b, moins dense que Saturne, a une taille anormalement grande, toute aussi difficile à expliquer. CoRoT a aussi découvert et mesuré les rayons des deux premières naines brunes à courte période orbitale, CoRoT-3b et 15b.

La caractérisation précise des oscillations de type solaire a pu être possible pour la toute première fois. Les modes d'oscillation ont été mesurés jusqu'au niveau d'une partie-par-million pour des étoiles de masse intermédiaire (~2 $M_\odot$) à très massives (~45 $M_\odot$), révélant des phénomènes jusqu'alors impossibles à atteindre. Par exemple, CoRoT a permis la découverte d'oscillations excitées stochastiquement dans les étoiles massives, ce qui explique l'éjection de matière de certaines étoiles massives vers le disque circumstellaire (appelé phénomène Be). La sismologie des étoiles massives a aussi permis de mesurer la taille de leur cœur. Par ailleurs, la sismologie des géantes rouges a véritablement débuté avec CoRoT et est maintenant l'un des domaines les plus prometteurs et actifs en sismologie avec des applications à l'évolution galactique. Hormis les oscillations, les données de CoRoT ont aussi révélé la signature de divers phénomènes qui sont à présent étudiés activement : la granulation, l'activité stellaire, la cartographie des hétérogénéités de surface, etc.

3. PROPOSITIONS DU GROUPE ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

Les propositions du groupe sont basées sur les critères suivants :

- les grandes questions scientifiques à aborder lors des prochaines années, questions mises à jour en fonction des dernières avancées ;
- le contexte programmatique national et international, en particulier les conséquences de la sélection des missions *Cosmic Vision* de l'ESA ;
- la maturité des propositions de la communauté française soumises via l'appel à idées du CNES ;
- l'historique de la communauté française (implication sur des missions passées, les développements en R&T, etc.).

3.1. Les futures missions européennes

Le thème scientifique pour la deuxième mission de type Large (L2) de l'ESA, « The Hot and Energetic Universe », est désormais officiellement choisi et le processus de

définition de la mission associée a démarré. Le groupe réitère son soutien à la mission Athena associée à ce thème scientifique qui a toujours été identifié comme prioritaire dans les différents exercices de prospective. Il invite la communauté à se mobiliser pour préparer cette ambitieuse mission et permettre à la France de jouer un rôle important dans sa réalisation, tout en assurant un retour scientifique au moins proportionnel à son implication.

Le thème pour la troisième mission de type *Large* (L3), « The Gravitational Universe », est également officiellement choisi, mais la définition de la mission va suivre un plus long processus. Là aussi, la communauté est invitée à se mobiliser, en particulier via l'organisation du suivi, pour cette mission qui ouvrira une nouvelle fenêtre sur notre Univers.

3.2. Propositions pour des futures missions européennes ou missions d'opportunité

Le groupe a identifié le thème scientifique suivant comme prioritaire (P0) :

- ***« Comprendre la phase d'inflation de l'Univers primordial »*** via la recherche et l'étude des modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique. La France possède déjà une expérience reconnue dans ce domaine, notamment grâce aux développements menés sur la mission Planck. Le groupe propose donc de soutenir prioritairement une participation à une future mission européenne de type M4 (type CoRE). En cas de non sélection, une participation à une mission d'opportunité avec la NASA (type Pixie) ou la JAXA (type LiteBird) doit être soutenue si une telle éventualité se présente.

Ensuite, le groupe a identifié les thèmes suivants, sans interclassement (P1) :

- ***« Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies »*** de l'Univers proche ($z < 2$) à l'Univers lointain (jusqu'à $z = 10$). Quelle que soit la méthode, l'intérêt est d'obtenir des informations sur le processus de mise en place des galaxies et des grandes structures. Les grands *redshifts* permettent en effet d'observer les galaxies dans leurs stades initiaux, via essentiellement des observations dans l'infrarouge, et de comprendre l'histoire de leur évolution postérieure. A l'inverse, observer à un *redshift* modéré ($z < 2$) permet d'accéder aux détails des échanges en cours entre galaxies et gaz diffus, par exemple en observant dans l'ultraviolet l'émission du proche environnement des galaxies, ou bien de remonter aux processus dynamiques qui ont opéré durant la vie d'une galaxie, c'est-à-dire à son histoire d'assemblage. Le groupe propose donc de soutenir une participation à une future mission européenne de type M (type Spica, tel que défini au début 2013) ou une participation à une mission d'opportunité (type Migal avec la NASA).
- ***« Caractériser les exoplanètes et chercher les bio-signatures : quelles sont les conditions physiques qui règnent à la surface des petites planètes et à l'intérieur des planètes gazeuses, et sont-elles favorables à l'apparition de la vie ? »*** via l'étude des atmosphères des exoplanètes. La prochaine grande étape de cette thématique est l'étude de l'atmosphère et des propriétés d'un grand nombre de planètes de tous types, la quête ultime étant naturellement la recherche de traces de bio-signatures.

Le groupe propose de soutenir, en fonction des opportunités programmatiques, une participation à une future mission européenne de type M ou à une mission d'opportunité.

Le groupe propose ensuite les thèmes scientifiques suivants, sans interclassement (P2) :

- ***« Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets »*** via l'observation de l'Univers lointain dans l'infrarouge. La détection, puis l'étude, des premiers objets formés dans l'Univers permettra une meilleure compréhension de la fin des âges sombres. Le groupe propose de soutenir une participation à une petite mission d'opportunité.
- ***« Comprendre les explosions stellaires (et la nucléosynthèse associée), la physique des objets compacts » et « comprendre l'origine des rayons cosmiques galactiques »*** en observant l'Univers dans le domaine du MeV. La mission devra couvrir tout le ciel, tout en opérant sur une large bande spectrale autour du MeV, avec une très bonne sensibilité, ainsi que des résolutions angulaire et en énergie suffisantes pour étudier toutes les composantes du ciel. Ultimement, l'identification des sources contribuant au fond diffus gamma cosmique devra être obtenue.
- ***« Comprendre la formation et l'évolution des étoiles et des planètes »*** en observant les étoiles dans l'ultraviolet et le visible. Cette mission permettra l'étude de l'évolution et de l'environnement des étoiles de tous types en mesurant leurs vents et leurs magnétosphères, grâce à un spectropolarimètre opérant dans l'ultraviolet et le visible.

Remarques importantes :

- ***Le groupe Astronomie et Astrophysique tient à souligner l'importance de préserver dans le programme du CNES la possibilité de participation à de futures missions d'opportunité.***
- ***Toutefois, le groupe rappelle qu'une éventuelle participation à une mission d'opportunité ne doit pas se faire au détriment d'une mission déjà décidée de type M ou L de l'ESA qui doit demeurer absolument prioritaire. Une telle participation doit donc se faire en regard du contexte programmatique.***

Enfin le groupe a identifié deux thèmes scientifiques potentiellement prometteurs, mais dont la maturité nécessite une réflexion plus profonde de la communauté scientifique :

- Un observatoire opérant dans le domaine submillimétrique, aux performances bien supérieures à celles de la mission européenne Herschel et de l'éventuelle mission Spica[1], permettrait d'aborder de très nombreuses questions, comme par exemple : « comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets », *« comprendre la formation et l'évolution des étoiles et des planètes »*, etc. Compte-tenu de l'ampleur d'une telle mission (probablement de type *Large* de l'ESA), le groupe souhaite que les programmes nationaux commencent par proposer conjointement une feuille de route identifiant les grandes questions scientifiques devant être abordées par cette future mission ainsi que les performances nécessaires pour y parvenir.
- Un observatoire capable d'observer des objets à très faible brillance de surface dans le visible et l'ultraviolet permettrait d'étudier en détail l'assemblage des galaxies et de répondre à la question *« comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies »*. Le groupe a conscience de l'intérêt de cette thématique scientifique mais invite la communauté à se structurer afin de mieux définir sa stratégie et ses besoins.

3.3. Propositions pour les missions nationales et multilatérales

Une seule mission multilatérale est toujours soutenue par le groupe, la mission sino-française Svom, consacrée à la découverte et à l'étude des sursauts gamma. Cette mission est décidée depuis 2005, mais est toujours en attente du démarrage de sa phase de développement. Compte-tenu du retard, l'intérêt scientifique de la mission a de nouveau été évalué par le groupe qui a confirmé que Svom a toujours une réelle valeur scientifique. Ceci tient pour beaucoup à l'existence de moyens complémentaires d'observation au sol et dans l'espace, qui seront disponibles au moment du lancement (2020).

En dehors de ce projet, le groupe ne recommande pas de nouvelle mission nationale ou multilatérale.

3.4. Propositions pour les missions ballons

Plusieurs projets embarqués sous un ballon stratosphérique sont déjà décidés et devraient voler dans les années à venir : Euso-ballon (premier vol en 2014), Pilot (premier vol en 2015) et Fireball 2 (premier vol en 2015 ou 2016).

En dehors de ces projets, le groupe ne recommande pas de nouvelle mission ballon.

3.5. Les développements techniques R&T

Le groupe soutient les développements liés aux futures missions associées aux grandes questions scientifiques décrites dans les sections précédentes, en suivant les priorités pour les futures missions européennes et missions d'opportunité :

- *Observer l'Univers dans le domaine des rayons X* : chaînes de détection et cryogénie associée.
- *Étude des modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique* : chaînes de détection et cryogénie associée.

[1] Le projet **Spica** est en cours de redéfinition suite à la demande de la JAXA d'augmenter significativement la contribution européenne. Le groupe suit très attentivement l'évolution du projet et se réserve le droit de mettre à jour son message en fonction des conclusions de ce processus.

Puis :

- *Observer l'Univers dans le domaine du MeV* : chaînes de détection.
- *Observer les étoiles dans l'ultraviolet* : spectropolarimètre embarqué.

En ce qui concerne les thèmes consacrés à la polarisation du fond diffus cosmologique et à l'observation de l'Univers au MeV, le groupe demande que ces développements s'inscrivent systématiquement dans le cadre d'une feuille de route établie par les différents partenaires (tutelles, LABEX, laboratoires, etc.). Le CNES doit prendre l'initiative de la définition de cette feuille de route.

3.6. Proposition de phase 0

Afin de préparer une future mission de type M, le groupe souhaiterait qu'une étude de phase 0 soit menée sur une mission observant les étoiles dans l'ultraviolet et le visible consacrée au thème scientifique : *« comprendre la formation et l'évolution des étoiles et des planètes »*. Cette mission devra permettre l'étude de l'évolution et de l'environnement des étoiles de tout type en mesurant leurs vents et leurs magnétosphères, grâce à un spectropolarimètre.

3.7. Les nano-satellites

L'essor des nano-satellites a été initialement porté par des intérêts pédagogiques évidents, permettant aux étudiants de développer leurs compétences dans le cadre de projets originaux. Mais les nano-satellites permettent également un accès à l'espace à des coûts potentiellement réduits par rapport à des projets plus volumineux. Toutefois l'astronomie n'est pas forcément le thème le plus porteur pour ces plateformes, la dimension réduite de la charge utile permettant difficilement de rivaliser avec des projets plus classiques, au sol ou dans l'espace. **Les projets pour l'astronomie doivent donc être étudiés au cas par cas, le rapport coût sur retour scientifique devant être évalué en détails.**

4. L'IMPORTANCE DE LA COMPLÉMENTARITÉ SOL-ESPACE

Les techniques d'observation en astronomie ont considérablement évolué au cours des dernières années avec l'avènement de l'observation multi-longueurs d'onde et multi-techniques. Les communautés scientifiques se définissent désormais moins par leur domaine de longueur d'ondes, que par leur thématique scientifique.

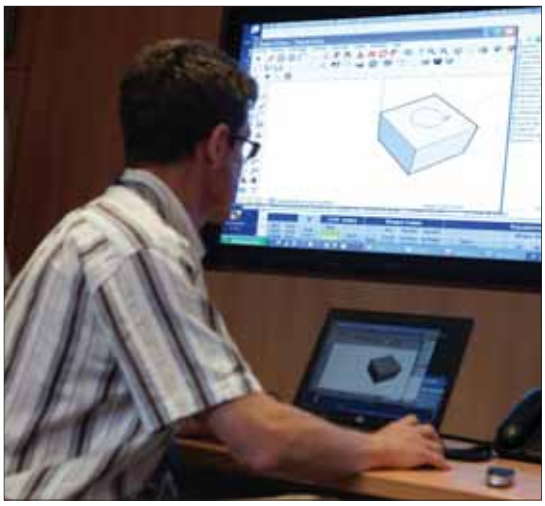
La conséquence la plus notable est que le suivi au sol a désormais un rôle très important dans le retour scientifique des missions spatiales. Ce besoin peut aller de la demande de temps importante sur un télescope, jusqu'à la mise à niveau d'instruments existants ou le développement de nouveaux moyens (ce qui soulève naturellement la question du financement de tels instruments).

L'exemple le plus emblématique est celui de la mission Euclid qui représente un enjeu très important pour la France. Ce projet intègre en effet des données sol et espace, toutes deux indispensables. La partie sol consiste à couvrir 15 000 degrés du ciel avec des télescopes au sol, en 4 bandes visibles et à la profondeur des galaxies les plus lointaines (faibles) de l'échantillon *weak lensing* d'Euclid. C'est ce double relevé sol-espace qui constitue la mission Euclid, et cette synergie est explicite depuis la phase de définition et de sélection. Dans un projet comme Euclid, l'obtention de données photométriques est une condition indispensable à sa réussite. A ce jour l'hémisphère sud est couvert grâce aux relevés photométriques DES et KIDS, mais l'hémisphère nord ne l'est pas encore, le suivi demandé au CFHT, qui est la seule option possible à ce jour, étant visiblement très compliqué à obtenir.

Compte-tenu de l'importance du suivi photométrique depuis le sol pour l'exploitation scientifique de la mission Euclid, le groupe demande que les principaux partenaires, CNES, CNRS et CEA, parviennent à une solution garantissant le suivi sol de la mission, solution qui puisse s'appliquer aux futures missions Svom et Plato également très demandeuses.

Pour qu'une véritable synergie entre le sol et l'espace puisse se mettre en place, les agences spatiales pourraient par exemple considérer la possibilité d'acheter du temps sur les télescopes au sol (en comptabilisant dès lors ce montant dans la contribution à la mission), et de participer aux comités d'allocation de temps de ces télescopes, ainsi qu'aux conseils d'administration en charge de ces moyens.

Une attitude symétrique de la part des organisations gérant les moyens spatiaux aiderait naturellement à instaurer un dialogue permanent. Cela permettrait ainsi une meilleure coordination, harmonisation et planification des moyens en préservant une vue globale des projets scientifiques qui intègre et garantisse les ressources spatiales et au sol.



3.8. Synthèse des recommandations

Méthode d'observation	Cadre de réalisation	Priorité	R&T associée	Thème scientifique
Observer l'Univers dans le domaine des rayons X	L2 (ESA)	P0	Chaîne de détection et cryogénie	*- Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets* *- Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies*
Observer les modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique	M (ESA) ou Opportunité (NASA/JAXA)	P0	Chaîne de détection et cryogénie	*- La quête de l'inflation et de l'Univers primordial : quelle physique a opéré dans les premiers instants de l'Univers?*
Observer l'Univers lointain dans l'infrarouge ou l'Univers proche dans l'ultraviolet	M (ESA) ou Opportunité (NASA)	P1		*- Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies*
Observer par spectrophotométrie les atmosphères des exoplanètes	M (ESA) ou Opportunité	P1		*- Caractériser les exoplanètes et chercher les bio-signatures*
Observer l'Univers dans le domaine du MeV	M (ESA) ou Opportunité	P2	Chaîne de détection	*- Comprendre les explosions stellaires, la physique des objets compacts.* *- Comprendre l'origine des rayons cosmiques galactiques.*
Observer les étoiles dans l'ultraviolet	M (ESA) ou Opportunité	P2	Spectropolarimètre	*- Comprendre la formation et l'évolution des étoiles et des planètes.*
Observer l'Univers lointain dans l'infrarouge	Opportunité	P2		*- Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets*

Rappel : les priorités sont notamment basées sur les grandes questions scientifiques à aborder lors des prochaines années, le contexte programmatique national et international, la maturité des propositions de la communauté française et l'historique de la communauté.

GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE SYSTEME SOLAIRE

1. CONTEXTE

1.1. Grandes questions

Pour cette synthèse des grandes questions en planétologie, nous partons des visions de la NASA (*Decadal Survey*, mars 2011), de l'ESA (*Cosmic Vision*, 2005) et dans une moindre mesure de l'Union Européenne (*Astronet*, 2007, révision février 2013). L'étude du Système solaire s'organise autour de trois grandes thématiques :

1.1.1. Origine du Système solaire & Matière Primitive

C'est la « dimension astrophysique » qu'on explore ici, celle de la formation des objets du Système solaire, il y a 4,56 milliards d'années à partir d'une nébuleuse gazeuse contenant des restes d'étoiles des générations précédentes :

- Quels étaient les premières étapes, les conditions et les processus à l'œuvre lors de la formation du Système solaire et quelle était la nature de la matière interstellaire incorporée (Q1.1) ?
- De ce nuage de matière interstellaire, naissent deux types de planètes de part et d'autre de la « ligne des glaces ». À l'intérieur, les planètes telluriques : quels sont les mécanismes qui ont joué dans les processus d'accrétion, les processus chimiques et la différenciation des planètes internes et l'évolution de leur atmosphère (Q1.2) ?
- À l'extérieur de la ligne des glaces, les planètes géantes et glacées : comment se sont-elles agrégées, et surtout, comment leurs satellites se sont-ils formés (Q1.3) ?
- Les modèles dynamiques les plus récents (modèle de Nice, Grand Tack scenario) et les observations d'exoplanètes de type Jupiter-chaud aussi près de leur étoile que Mercure du Soleil montrent que les géantes peuvent migrer : a-t-on des preuves que les planètes géantes de notre Système solaire aient modifié leur position orbitale (Q1.4) ?
- Le bombardement tardif (Late Heavy Bombardment – LHB) il y a 3,9 milliards d'années, s'il a bien existé, est-il une des conséquences de ces mouvements migratoires ? Pour toutes ces planètes, et plus particulièrement la Terre, nous devons nous poser la question de l'origine de l'eau : résulte-t-elle du dégazage primordial de la planète ou fut-elle apportée ultérieurement par impacts successifs (Q1.5) ?

La thématique des origines a extraordinairement évolué ces dernières années, grâce à l'observation d'exoplanètes à différents stades de leur évolution, grâce à de nouvelles données des missions autour de petits corps, au renouveau de l'exploration de la Lune, à la simulation numérique et toujours grâce à l'amélioration des performances de l'analyse en laboratoire d'échantillons extraterrestres (retour d'échantillons, météorites).

1.1.2. Propriétés et évolution des planètes

Il s'agit ici de comprendre l'évolution du Système solaire après sa formation :

- Comment la multitude des processus chimiques et physiques ont-ils opéré, interagi et évolué dans le temps (Q2.1) ?
- Les processus physico-chimiques à l'œuvre se doivent d'être étudiés dans leur globalité. Nous avons ici coutume de parler de « planétologie comparée », la référence à la Terre étant explicite et au cœur de la thématique. L'étude des planètes géantes dans leur ensemble et leurs interactions (planètes – satellites – anneaux – magnétosphères) est particulièrement instructive : peut-elle servir de laboratoire pour comprendre les processus à l'œuvre dans le Système solaire et dans les systèmes planétaires lointains (Q2.2) ?
- La comparaison s'étend aux climats planétaires : la physico-chimie et la dynamique à l'œuvre dans les atmosphères planétaires, ainsi que les interactions surface-atmosphère, peuvent-elles permettre une meilleure compréhension de l'évolution du climat de la Terre (Q2.3) ?

La vision globale du système de Saturne, les études très détaillées de Vénus, Mercure et surtout Mars ont énormément fait progresser cette thématique. Surfaces et atmosphères sont très bien caractérisées ; néanmoins les structures internes sont encore difficiles d'accès.
De plus en plus de spécialistes des géosciences font de la planétologie et apportent leur savoir-faire. En retour, l'étude des planètes fait progresser la compréhension de l'origine et de l'évolution de la Terre.

1.1.3. Habitabilité des planètes

L'étude de « la vie et de ses origines » est désormais une thématique à part entière de la planétologie. Dans un premier temps on s'intéresse, très légitimement, à la chimie organique qui est à la base de tous les êtres vivants sur Terre :

- Quelles sont les premières sources de matière organique ? Où se perpétue aujourd'hui la synthèse organique (Q3.1) ?
- Quant aux conditions favorables à l'apparition de la vie, on parle d'habitabilité, la question est plutôt au passé pour les voisines de la Terre : les planètes Mars et Vénus ont elles connu autrefois des environnements propices à la vie ? Existe-t-il des preuves que la vie soit apparue sur ces planètes (Q3.2) ?
- Mais on ne néglige pas pour autant la recherche d'une vie extraterrestre aujourd'hui : existe-t-il actuellement des habitats dans le Système solaire qui réunissent les conditions nécessaires - matière organique, eau, énergie, substance nutritive - pour que la vie apparaisse et se maintienne ? Existe-t-il actuellement des organismes vivants dans certaines niches écologiques sur Mars, Europe ou Encelade (Q3.3) ?

Cette thématique est clairement partagée avec le groupe de travail Exobiologie du CNES. En l'absence de preuves de vie extraterrestre, les deux groupes travaillent indépendamment l'un de l'autre : le groupe Système solaire s'occupe de la caractérisation physico-chimique des milieux, tandis que le groupe Exobiologie conduit des études chimiques et biologiques autour de l'origine de la vie et de son développement. Plusieurs missions (Mars, satellites des planètes géantes) sont suivies par les deux groupes.

Les trois thématiques ont été remarquablement couvertes par les missions en cours depuis Biarritz. Les questions afférentes ont évolué pour prendre en compte ces derniers résultats. Les thèmes « origines » et « habitabilité » demandent à être approfondis. Le thème « planétologie comparée » produit des informations de base pour toute la physique du Système solaire.

1.2. Contexte national et international

En planétologie, le contexte scientifique et programmatique est exclusivement international, dominé par les programmes spatiaux de l'ESA et de la NASA. Au début des années 2000, de nouveaux partenaires ont émergé (Japon, Inde, Chine) et ils sont maintenant en mesure de proposer à la communauté internationale de réelles opportunités de vol, alors que la Russie tente de construire un programme d'exploration ambitieux.

Le *Decadal Survey* de la NASA (mars 2011) structure la programmatique américaine de l'exploration du Système solaire, autour de trois programmes et leurs priorités :

- les missions lourdes, dites « *Flagship* » avec comme priorité :
  1. La préparation du retour d'échantillons martiens,
  2. Jupiter-Europe,
  3. Orbiteur et sonde vers Uranus,
- les missions moyennes dites « *New Frontiers* » dont les priorités sont :
  1. Retour d'échantillons cométaires,
  2. Retour d'échantillons du bassin Aitken de la Lune,
  3. Sonde dans Saturne,
  4. Astéroïdes troyens,
  5. Exploration *in situ* de Vénus ;
- les petites missions du programme *Discovery* (pas de priorités).

Notons qu'il n'y a plus à proprement parler de programme dédié à l'exploration de Mars, même si cette planète conserve un attrait spécifique aux États-Unis.

Depuis 2005, l'ESA structure sa programmatique autour du programme scientifique obligatoire *Cosmic Vision* (période de lancement 2015-2025). Il prend la suite des programmes *Horizon 2000* (1995-2005) et *Horizon 2000 Plus* (2005-2015). Les premières missions du programme *Cosmic Vision* ont été décidées : L1, M1, M2, M3. Les opportunités L2/L3 sont d'ores et déjà préemptées (Univers chaud, Univers gravitationnel). L'opportunité M4 est encore ouverte, ainsi que le créneau L4. Ce programme est la colonne vertébrale du programme d'exploration du Système solaire en Europe. Il existe depuis 2012 dans ce programme, un volet de petites missions (*S-class*). La mission S1 (CHEOPS, transit exoplanètes, lancement 2017) est engagée sous responsabilité de la Suisse.

Le second pilier de la programmatique ESA est le programme optionnel d'exploration robotique qui vise à la réalisation, à moyen ou long terme, d'une mission de retour d'échantillons de Mars (*Mars Sample Return* ou MSR). La première mission de ce programme est ExoMars (lancements 2016 et 2018). Par la suite, plusieurs participations à des missions seront proposées pour valider les technologies nécessaires à l'objectif principal ; il s'agit de contribuer aux missions russes Luna Resurs *orbiter et lander* (2018 & 2019) et Lunar Polar Sample Return (2021), mais aussi à l'étude de missions telles que Phootprint (*Phobos sample return*), MPL/SFR (*Mars Precision Lander / Sample Fetch Rover*) et Inspire (réseau martien) avant la mission MSR autour de 2030.

Note : La Commission Européenne s'inscrit maintenant comme un partenaire durable de la recherche spatiale. Dans le programme FP7, le CNRS a été PI de l'infrastructure de recherche Europlanet qui a permis d'intégrer à l'échelle européenne la communauté des sciences planétaires et est un membre, avec l'Observatoire de Paris, du consortium NEOShield qui a pour but d'augmenter nos connaissances des astéroïdes géocroiseurs et d'étudier différentes concepts de missions spatiales pour les dévier. Dans le cadre de Horizon 2020, la communauté souhaite continuer la structuration des sciences planétaires avec un nouveau projet Europlanet et une suite au programme NEOshield. En concertation avec l'ESA, la commission européenne a également lancé des appels d'offres ciblés sur l'exploitation scientifique de la mission Rosetta, la préparation de l'exploration martienne et lunaire, et le financement d'une curation facility. Ces programmes participent activement à la structuration de la communauté, mais ne sont en aucun cas proposants de nouvelles opportunités spatiales.

Fig. 1 : État de la programmatique en février 2014 (missions décidées).

1.3. État de la programmatique en planétologie

La figure 1 fait état de la programmatique décidée aujourd'hui en planétologie. Les missions en cours décidées par les agences spatiales (ESA, NASA, JAXA, Roscosmos) couvrent les trois thématiques scientifiques définies en 1.1.

2. BILAN DEPUIS BIARRITZ

2.1. Résultats scientifiques

La période 2009 – 2013 a été extraordinairement féconde pour la planétologie française. Le site des missions scientifiques du CNES, http://smsc.cnes.fr, reprend certains des résultats obtenus. Nous décrivons les progrès depuis Biarritz par objet, et donnons des éléments de perspective déjà engagés à court et moyen terme.

Petits corps. Les comètes et les astéroïdes ont conservé la mémoire de la composition initiale de notre Système solaire et de l'environnement dans lequel nos planètes se sont formées. C'est pourquoi les missions spatiales et les observations depuis la Terre se concentrent sur l'analyse de leur composition et de leur structure. Ces observations ont mis en évidence la grande variété de leurs propriétés physiques et de leur composition. Les images à très haute résolution ont aussi permis de comprendre qu'un régolithe couvre souvent leur surface, ce qui complique l'analyse de leur composition globale. Plusieurs missions ont permis de caractériser récemment certains objets de près (Fig. 2a) : Dawn autour de Vesta en 2011 (Cérès en 2015), Rosetta survolant Lutetia en 2010.

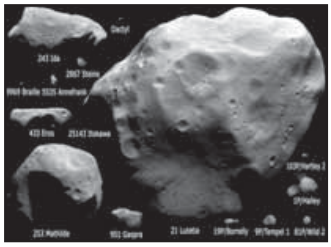


Fig. 2a : Quelques petits corps visités ou survolés, montrant une grande variété de morphologies, tailles et structures. Le plus gros sur cette figure, Lutetia (survol Rosetta en 2010), a un diamètre de ~100 km.

L'actualité fut aussi marquée par le retour d'un millier de micrograins (< 10 microns) de l'astéroïde Itokawa en 2010 par la mission Hayabusa. Cet objectif de retour d'échantillons primordiaux à fins d'analyses poussées dans les laboratoires motive clairement les missions à venir, Hayabusa-2/JAXA et Osiris-Rex/NASA. A très court terme, la communauté scientifique attend la mise en orbite de Rosetta autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko en août 2014 et l'atterrissage du lander Philae en novembre.

La Lune. La Lune nécessite une attention particulière dans le cadre de la prospective. Il faut rappeler que la science de la Lune n'était pas apparue comme une priorité à Biarritz, exception faite de l'étude de sa structure interne par sismologie. Pourtant, les missions spatiales se sont succédées depuis lors : suite à Lunar Prospector en 1998, puis aux missions de 2007-2008 (Selene, Chang'e-1, Chandrayaan-1), la Lune a été explorée presque chaque année par une nouvelle mission (Lunar Reconnaissance Orbiter et LCROSS en 2009 ; Chang'e-2 en 2010 ; Grail, en 2011 ; puis Ladee en 2013). Au cours de ces missions, la Lune a finalement été cartographiée quasi-totalement à très haute résolution (Fig. 2b), son atmosphère analysée en détail, les volatils des régions polaires identifiés et les caractéristiques de son champ gravitationnel explorées, avec un focus particulier sur les fortes anomalies associées aux grands cratères d'impact. Les questions associées à l'origine et à l'évolution du satellite, tout particulièrement sa structure interne, au couplage Terre-Lune, à l'amplitude du flux météoritique et aux interactions avec le vent solaire, bénéficieraient de nouvelles données lunaires.

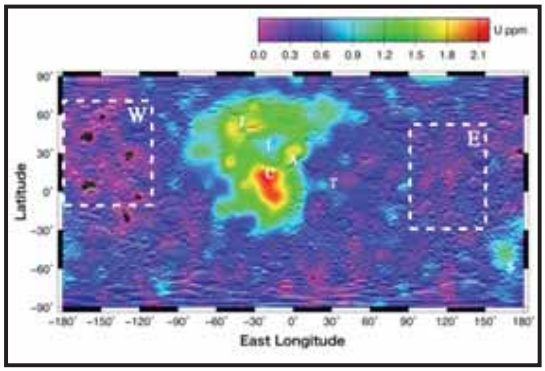


Fig. 2b : Abondance d'uranium lunaire mesurée par le spectromètre gamma de Kaguya, comme traceur de la formation de la croûte. Les continents les plus anciens ne sont pas aussi uniformes en composition qu'on a pu le croire (zones W et E).

Mercure. Mercure se caractérise par une surface très vieille, une atmosphère extrêmement ténue formée de particules issues du vent solaire ou éjectées de la surface, et un champ magnétique intrinsèque trop faible pour la protéger du vent solaire en permanence. Depuis sa mise en orbite en 2011, la mission Messenger a changé notre connaissance de cette planète grâce à une exploration détaillée focalisée sur quatre objectifs majeurs : histoire géologique (via une couverture complète de la surface du visible à l'infrarouge à moyenne et haute résolution ; étude de la dynamo interne (via une caractérisation du champ magnétique intrinsèque) ; caractérisation du noyau et identification de la zone fondue (via l'étude des champs gravitationnels) ; composition des régions polaires protégées du Soleil (dont la confirmation de glaces d'eau par spectroscopie neutron).

En parallèle, un programme d'observations télescopiques se poursuit (Fig. 2c). L'exploration de Mercure n'en est qu'à ses débuts et va se poursuivre avec les deux sondes de la mission BepiColombo MPO et MMO (décollage 2016 / arrivée 2024). Celles-ci fourniront un vaste ensemble d'observations de la planète et de son environnement qui est attendu autant par les géologues et géophysiciens que par la communauté des plasmas.

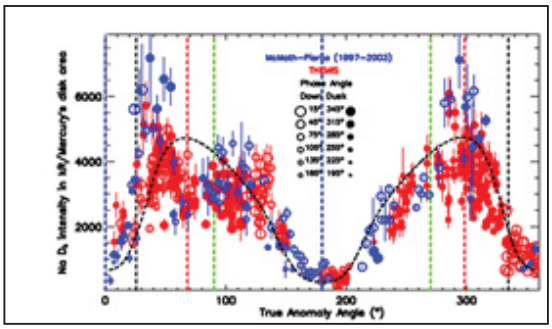


Fig. 2c : Sept années d'observations de Mercure avec le télescope THEMIS. Variation de l'émission intégrée du sodium exosphérique en fonction de la position de Mercure sur son orbite. Soleil.

Mars. Mars demeure l'objet planétaire sur lequel se concentrent le plus d'efforts en termes d'exploration, suivant divers objectifs scientifiques (géophysique, géologie, climatologie et exobiologie). Depuis 2000, quatre orbiteurs ont fonctionné avec succès, ainsi que 3 rovers et 1 atterrisseur. Les faits les plus marquants et les plus récents concernent les résultats du rover Curiosity. On savait depuis longtemps que de l'eau liquide a circulé en surface (traces d'activité fluviatile, localement lacustre, présence de minéraux d'altération comme les argiles découvertes par Mars Express). Curiosity apporte de nouvelles contraintes sur l'habitabilité passée de Mars par la découverte et la caractérisation de sédiments fluviaux et lacustres : présence conjointe de phyllosilicates, de magnétite et de sulfates dans des sédiments très fins déposés dans l'eau (Fig. 2d).

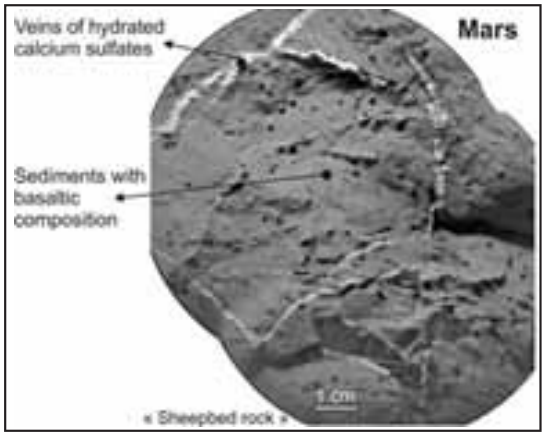


Fig. 2d : Veines de sulfate de calcium identifiées et analysées par le laser de ChemCam à bord de Curiosity, dans le cratère Gale.

Les analyses ont aussi révélé une grande diversité chimique du sol martien, et surtout le fait que le sol le plus fin contient beaucoup d'hydrogène, dû à l'eau à la fois adsorbée et constitution de minéraux du sol, ce qui pourrait constituer une partie importante du réservoir d'eau présent à la surface de Mars. L'origine de ce réservoir et son évaluation quantitative est l'une des clés de la compréhension de l'évolution du climat martien récent. Curiosity a aussi permis les mesures les plus précises jamais faites de la composition atmosphérique (incluant l'absence de méthane) et plus spécifiquement des isotopes de l'argon, de l'hydrogène et du carbone dans l'atmosphère martienne. Celles-ci apportent de très fortes contraintes sur les modalités de la perte de l'atmosphère de la planète. Dans le cadre des précédentes prospectives, il était clairement envisagé une mission de retour d'échantillons à l'horizon 2020. Ce calendrier n'est plus d'actualité, mais l'objectif demeure : Mars2020 (NASA) prévoit une collecte d'échantillons pour un retour ultérieur sur Terre ; la mission ExoMars est en cours de développement. Notons aussi deux missions plus focalisées, sur l'échappement atmosphérique de Mars (Maven, 2013) et la structure interne (InSight, 2016).

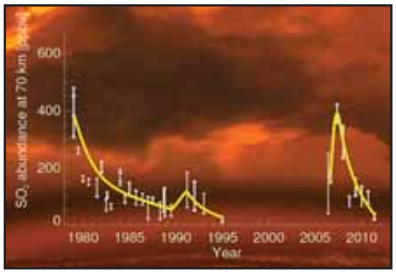


Fig. 2e : Compilation de mesures du SO_2 vénusien au-dessus de la couche de nuages. Les mesures récentes (Spicav sur Venus Express > 2005) confirment la variabilité pluri-annuelle encore inexpliquée de ce composé.

Vénus. De par ses similarités comme ses disparités avec la Terre, l'exploration de Vénus est un axe fort de la planétologie moderne. L'un des enjeux les plus importants de son étude est de retracer son histoire climatique, couplée à celle de son intérieur. Venus Express est l'unique mission à apporter de nouvelles données sur cette planète depuis 2006 (arrêt prévu fin 2014). Venus Express a apporté une connaissance détaillée de la haute atmosphère et de la composition de l'atmosphère sous les nuages. Parmi les faits marquants, il convient de noter la mise en évidence de la forte variabilité du dioxyde de soufre au sommet des nuages qui pourrait suggérer que certains volcans de Vénus sont encore actifs (Fig. 2e), la mise en évidence de la très forte accélération des vents sur six ans qui reste à ce jour inexpliquée, ainsi qu'un possible ralentissement de la rotation de la planète sur elle-même. De nombreux projets ont été soumis à l'ESA et à la NASA pour définir les missions futures. Aucune n'a encore été sélectionnée à ce jour.

Les satellites des planètes géantes. Les satellites majeurs des planètes géantes possèdent très probablement des réservoirs liquides sous une couche de glace, exception faite d'Io. Pour Europa et Encelade, il est admis qu'ils constituent des environnements habitables car l'eau peut être en contact direct avec les roches sous-jacentes. Pour Ganymède, Callisto et Titan, les réservoirs liquides sont piégés entre deux couches de glace ce qui empêche peut-être les échanges chimiques et énergétiques entre les silicates et l'océan, échanges jugés nécessaires à l'habitabilité de ces environnements. Mentionnons aussi le caractère unique de Ganymède qui est le seul corps du Système solaire où interagissent trois champs magnétiques (champ jovien, champ intrinsèque et champ induit par l'océan profond), l'extraordinaire activité au niveau des pôles d'Encelade et d'Europe et l'extrême complexité de la géologie des petites lunes qui nous aide à mieux comprendre les processus de formation des systèmes planétaires, ou encore la forte activité de Io à l'origine du magnétodisque jovien.

Les nombreuses découvertes de ces dernières années, en particulier sur Titan (100e survol en 2014 - variations saisonnières de la dynamique atmosphérique (Fig. 2f) et du niveau des lacs, contraintes sur la structure interne, découvertes de nouveaux composés complexes comme le propylène...) et Encelade (19e survol en 2012 - caractérisation des volatils dans les geysers, analyse de la structure 3D et de la variabilité des plumes) laissent présager d'une activité toujours intense sur les 4 années à venir (arrêt programmé de Cassini en 2017).

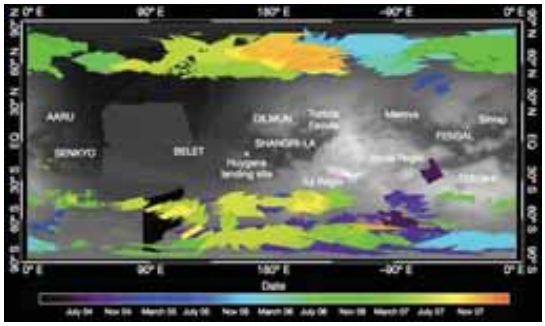


Fig. 2f : Carte des nuages de Titan. De 2004 à 2007, plus de deux cent nuages ont été observés par Cassini-Huygens.

Il faudra ensuite attendre 2030 avec l'arrivée de Juice dans le système de Jupiter pour obtenir de nouvelles données, sauf si la NASA engage finalement Europa Clipper, une mission dédiée à l'étude de la lune Europe. À noter que Juno ne fera pas de mesures concernant les satellites.

Les planètes géantes. Saturne est la seule planète pour laquelle des informations de premier ordre ont été obtenues récemment. L'observation multi-instruments régulière à haute résolution par Cassini sur bientôt dix ans a mis en évidence de nombreux phénomènes météorologiques inattendus qui sont autant d'indications de la complexité de la dynamique interne et des couplages existant entre les différentes couches de l'atmosphère : ouragan du pôle Nord (Fig. 2h), observation d'une tempête globale en 2011, absence d'évolution saisonnière des courants-jets sauf à l'équateur, etc. Il faut y ajouter l'étude très détaillée des anneaux et celle de la structure et de la dynamique de la magnétosphère.

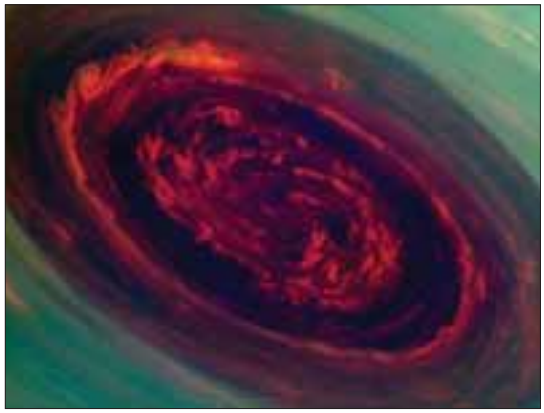


Fig. 2h : Vortex permanent au pôle nord de Saturne : diamètre 2 000 km, vents 150 m/sec. Images Cassini-Huygens 2012 en fausses couleurs : 728 nm (vert) et 752 nm (rouge).

Pour Jupiter, la sonde américaine Juno (arrivée prévue en 2016) devrait apporter des informations sur sa structure interne, son champ magnétique et la dynamique atmosphérique dans les régions polaires. Il faudra aussi compter sur la mission Juice (Cosmic vision L1, 2023-2030) qui fera un suivi temporel sur presque 3 ans de la haute atmosphère jusqu'à la troposphère (5 bars). En parallèle, la découverte indépendante d'oscillations propres de Jupiter (observations sol) et de Saturne (Cassini) permet d'envisager une nouvelle méthode pour étudier l'intérieur de ces planètes qui doit être prise en compte dans le cadre de missions futures. Enfin, notre connaissance des planètes géantes glacées Uranus et Neptune reste très parcellaire, même si des observations de télescopes sol et espace ont permis de mettre en lumière des changements survenus dans leur atmosphère cette dernière décennie et si de nouvelles équations d'état de la matière à très hautes pressions ont conduit à de nouveaux modèles de leur intérieur.

La connaissance de ces objets est aussi enrichie par :

1. des observations télescopiques (ex. la découverte d'émission de vapeur d'eau autour de Cérès par Herschel) ;
2. l'étude des météorites et autres échantillons extra-terrestres (ex. les échantillons de Stardust ont été analysés en France grâce aux instruments les plus performants du moment) ;
3. la caractérisation physico-chimique et spectrale de matériaux planétaires comme des glaces, des solutions aqueuses ou des hydrocarbures ;
4. des modélisations de circulation générale et de couplage photochimie-aérosols applicables en priorité à Mars, Titan et Vénus ;
5. des expériences de laboratoires (ex. détermination des propriétés d'absorption de composés gazeux, synthèse de matière organique).

2.2. Comparaison entre les recommandations de Biarritz et l'évolution programmatique

Recommandation Biarritz (2009)		Situation en 2014
Missions décidées	• BepiColombo • ExoMars	- BepiColombo est en développement. Quelques retards mais lancement 2016. - ExoMars-2018 est en difficulté technique et financière. Le programme continue.
Missions présélectionnées Cosmic Vision (ESA)	• Mission M / MarcoPolo-R • Mission L / EJSM • Mission Vénus (Eve)	- MarcoPolo-R et Eve non sélectionnées. - EJSM devient Juice, sélectionnée en L1.
Sismologie martienne et lunaire	• VBB pour post-ExoMars • ILN • Selene-2	- Le VBB est sélectionné sur la mission InSight du programme *Discovery* de la NASA. - ILN est abandonné. - Selene-2 est toujours en cours de définition.
Programme d'exploration (ESA)	• MSR avec/sans américains • Long terme : déploiement d'un réseau géophysique et climatique martien	- Le programme d'exploration de l'ESA est bloqué sur sa première mission, ExoMars. - La NASA s'engage sur le retour d'échantillons avec Mars2020 (*caching*).
Actions de R&T	• Datation • Analyse *in situ* et miniaturisation	- Plusieurs actions R&T, dont la faisabilité de la datation *in situ*.
Actions de R&T	• Insuffisance	- Des progrès

À l'exception des missions lunaires, les recommandations de Biarritz ont été suivies dans leur ensemble : Cosmic Vision est le socle de la programmation ; les missions en cours de développement progressent malgré certaines difficultés (BepiColombo, ExoMars) ; la sismologie martienne se prépare, mais dans un contexte différent de ce que qui avait été anticipé à Biarritz.

2.3. Bilan programmatique depuis Biarritz

Durant la période 2009-2013, la communauté française s'est impliquée dans de nombreux projets spatiaux, sur des objectifs très variés (planètes géantes, Mars, Lune, petits corps, Mercure), dans le cadre du programme Cosmic Vision et de très nombreuses opportunités.

Nouvelles missions	Juice, InSight, Hayabusa-2_Mascot
Poursuite des Opérations	Cassini, Mars Express, Venus Express, Mars Odyssey, Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Exploration Rovers
Lancements	Lunar Reconnaissance Orbiter (2009), Juno (2011), Mars Science Laboratory (2011), Grail (2011), Maven (2013)
Nouveaux retours scientifiques (= nouvelles missions)	2010 : Rosetta survole Lutetia 2011 : Messenger étudie Mercure 2011-2012 : Dawn en orbite autour de Vesta 2012 : Grail mesure précise du champ de gravité lunaire 2012+ : Curiosity en opérations : important retour scientifique
Reports	BepiColombo + 2 ans ExoMars + 2 ans pour Pasteur Selene-2 + 5 ans minimum
Echecs / Annulations	Echec Phobos-Grunt Echec de la coopération ESA-NASA sur ExoMars ILN annulé

3. PERSPECTIVES 2014+

3.1. Feuille de route

Plusieurs ateliers de travail ont conduit à préparer cette prospective. Sur la base des questions explicitées en 1.1, ils ont identifié des profils de missions qui répondent aux attentes scientifiques à moyen et long terme. Cette liste est ambitieuse (Fig. 3).

Elle reflète la richesse des approches possibles et l'apport des différents objets à chaque question scientifique. Pour chacune des entrées, nous avons cherché si des opportunités programmatiques étaient identifiées à l'ESA, à la NASA ou chez d'autres partenaires, sans être complètement exhaustifs. Sans surprise, dans la plupart des cas, il existe de telles missions pour les priorités scientifiques que nous nous donnons. Dans la majorité des cas, il serait prématuré, voire dangereux de mettre en avant telle ou telle mission pour répondre à une question ou un corpus de questions, dans un contexte programmatique que nous ne contrôlons pas.

Indépendamment de la programmatique, nous faisons toutefois émerger une priorité aux retours d'échantillons, dans la lignée de ce qui a été proposé à Biarritz, mais en étendant le champ de l'origine de ces échantillons. Par expérience, les mesures de laboratoire sur des échantillons dont la provenance et le contexte sont bien connus permettent de traiter de nombreuses questions en planétologie, bien plus précisément et plus largement que lors de mesures *in situ*.

Recommandation : priorité à une mission de préparation ou de réalisation d'un retour d'échantillons (1- Mars, 2- Lune ou Petit corps).

On constate à la lecture de la feuille de route que la référence aux exoplanètes est transverse aux trois thématiques de la planétologie (voir 1.1), ce qui n'était pas le cas il y a une décennie. La découverte des exoplanètes a changé notre vision de l'origine et de l'évolution du Système solaire. Plus la caractérisation des exoplanètes, et notamment leur atmosphère progressera, plus les planétologues s'impliqueront.

Recommandation : une mission pluridisciplinaire de caractérisation des atmosphères des exoplanètes.

Thèmes prioritaires			Type de mission pour réaliser les objectifs	Opportunités connues				
Objet	Objectifs scientifiques	Questions		NASA**	ESA CV	ESA Explo	Autres	
Petits Corps	Géocroiseur primitif Objet transition comète-astéroïde	Q1.1 Q1.2 Q1.5	Analyse in situ & retour d'échantillons		MarcoPolo-R (M4?)			(1)
	Troyens / Ceinture principale / NEO	Q1.1 Q1.2	Survol in situ (surface+)	NF (Troyens)				(2)
	Comète / Centaurs / TNO Composition, structure	Q1.1 Q1.2 Q1.5 Q3.1	Analyse in situ & retour d'échantillons	NF				(3)
Lune	Contraindre histoire impactisme Bombardement tardif (LHB) Évolution thermique	Q1.1 Q1.2 Q1.4 Q2.1	Retour d'échantillons	NF (South Pole Aitken)			Chine Change 5/6 (face visible)	
	Composition et structure interne (noyau, manteau, croûte)	Q1.1 Q1.2 Q2.1	Réseau sismique		Farside (M4)		Japon Selene-2	
	Polar régions Volatils	Q1.4 Q1.5	Analyse in situ et/ou Retour		LPSR, Lunar Resours (russes)	Géocroiseur primitif Objet transi		
	Étude de la face cachée Terrains anciens, Bassins d'impact	Q1.4 Q2.1 Astro	Landers		Géocroiseur primitif Objet transi			
Mercure	Structure interne	Q1.2 Q2.1	Landers					(4)
Mars	Habitabilité de Mars Traces de vie	Q1.2 Q3.1 Q3.2 Q3.3	Analyse in situ Préparation retour	MARS 2020 (Flagship-1)		Exomars		(5)
	Histoire climatique Caractérisation atmosphère	Q2.3 Q3.2	Orbiteur Station sol ?					(6)
	Composition et structure interne (noyau, manteau, croûte)	Q1.2 Q2.1	Réseau sismique			INSPIRE		(7)
Vénus	Sondage atmosphérique profond Évolution climatique Dynamique atmosphérique	Q2.3	Orbiteur & Ballon, sonde		EVE (M4)			(8)
	Évolution surface Couplage avec atmosphère	Q2.3 Q3.2	Radar orbital ou Lander	NF	EnVision (M4)			
Satellites	EUROPE / ENCELADE Structure interne Habitabilité aujourd'hui	Q1.3 Q3.1 Q3.3	Orbiteur	Europa Clipper (Flagship-2)				(9)
	TITAN Cycle atmosphérique, aérosols Couplage avec surface	Q1.3 Q2.3 Q3.1 Q3.3	Ballon (Lander)		Titan Aerial Explorer (M4)			
	PHOBOS Exploration surface intérieur	Q1.1 Q1.4 Q3.2	Analyse in situ Retour d'échantillons			PHOOTPRINT		(10)
Planètes Géantes & Glacées	SATURNE Composition atmosphérique Origine des géantes	Q1.3 Q2.2	Orbiteur Sonde	NF	Saturn probe (M4)			(11)
	Systèmes de URANUS / NEPTUNE Atmosphère, B, anneaux, satellites	Q1.3 Q2.2	Orbiteur Sonde	(Flagship-3)	Uranus Expl. (M4?, L4)			
Exo-planètes	Caractérisation des atmosphères Formation planétaire	Q1.2 Q1.3 Q1.4 Q2.2 Q3.3	Téléscope		EChO (M4?)			

Fig. 3 : Axes scientifiques prioritaires de l'exploration planétaire

3.2. Filières instrumentales

Depuis ~25 ans, plusieurs familles instrumentales ont vu le jour en France. C'est sur la base de ces savoir-faire que nos partenaires nous abordent pour des missions d'opportunité. Il est donc important d'en faire une liste :

Spectro-imagerie : ISM (Phobos88), Omega (Mars96 et Mars Express), Vims (Cassini), DISR (Huygens), Virtis (Venus Express et Rosetta). *FUTUR* : Symbio-Sys (BepiColombo), Majis (Juice)

Composition atmosphérique IR-UV : Auguste (Phobos-88), Spicam (Mars96, MEX), Spicav-Soir (Venus Express). *FUTUR* : Phebus (BepiColombo)

Analyse élémentaire, minéralogie, imagerie au sol : Civa (Rosetta-Philae), MicrOmega (Phobos Grunt), ChemCam (MSL). *FUTUR* : MicrOmega (Hayabusa-2-Mascot, ExoMars Pasteur), Raman (ExoMars Pasteur).

Chimie *in situ* : Malachite (Venera), ACP-GCMS (ACP & GC sur Huygens), Cosac (Philae), Gap (GC & TDLAS sur Phobos Grunt), Sam (GC sur MSL). *FUTUR* : Trappe orbitale (R&T)

** A l'exception des missions Discovery
(1) Hayabusa-2 et Osiris-Rex sont des retours d'échantillons de Neo en cours de réalisation.
(2) Le CNES a engagé une Phase-0 sur la mission Apophis (2029) qui offre une opportunité de science des Neo.
(3) Rosetta en en cours.
(4) Messenger en cours. BepiColombo en préparation.
(5) ExoMars-18 en définition. Curiosity en cours.
(6) Maven en cours. Mars Express en cours.
(7) InSight en cours.
(8) Venus Express en cours.
(9) Juice sélectionné en L1.
(10) Phobos-Grunt échec.
(11) Juno en route vers Jupiter. Cassini en cours.

Sismomètres : Optimism (Mars96), VBB (Netlander, ExoMars Humboldt). *FUTUR* : VBB (InSight)

Radars : Prism (Ballon martien, Mars-98), Consert (Rosetta). *FUTUR* : Wisdom (ExoMars Pasteur)

Cette liste ne résume pas l'ensemble des instruments auxquels ont contribué les planétologues français, mais se focalise sur les contributions françaises, qui mettent en évidence les savoir-faire dans les laboratoires sur la durée. Il est intéressant de constater que les instruments d'une même famille s'appliquent éventuellement à différents objets et que ces familles couvrent dans l'ensemble toutes les thématiques de la section 1.1. Chaque famille a des perspectives de développement engagées pour les années à venir. **Nous souhaitons, dans le cas d'opportunités de contributions instrumentales, que la priorité soit donnée à des instruments issus de ces différentes familles ou des concepts issus des programmes de R&T.**

3.3. Priorités programmatiques

Nous passons en revue les différents programmes possibles pour la planétologie française. En préambule **nous rappelons que les exploitations en cours (Cassini, Mars Express, Curiosity, Rosetta) doivent continuer.** C'est aujourd'hui que l'investissement sur les instruments se valorise.

Cosmic Vision. Grande priorité des SPS précédents, le programme scientifique obligatoire de l'ESA a été, depuis sa mise en place, le moteur du développement de la planétologie en France. Rappelons le retour scientifique remarquable des missions Cassini-Huygens (Saturne-Titan), Mars Express (Orbiteur de Mars), Venus Express (orbiteur de Vénus), qui sont encore en activité. Nous attendons beaucoup des missions en opération et en cours de réalisation : Rosetta (noyau cométaire, arrivée août 2014, atterrissage en novembre) et BepiColombo (Mercure, lancement juillet 2016, arrivée 2024). La dynamique se poursuivra dans la décennie à venir : Juice (L1/ Jupiter, lunes glacées, lancement juin 2022, arrivée à Jupiter 2030), Plato (M3, lancement début 2024). La continuation du programme Cosmic Vision doit rester la priorité de la communauté.

Le groupe prend connaissance d'excellentes propositions pour M4 qui couvrent l'ensemble des champs thématiques de la discipline. Il ne connaît pas tous les projets et, en conséquence, n'est pas en mesure de donner de priorité. Une mission de retour d'échantillons d'un petit corps primitif, de type Marco Polo-R, sous réserve de la découverte d'une cible accessible remplissant les critères scientifiques, correspond à l'ambition de notre thématique pour une mission M4. Les systèmes de Neptune et Uranus sont encore méconnus. Au-delà de l'intérêt intrinsèque de ces systèmes planétaires pour la compréhension de notre Système solaire, leur exploration apporterait un éclairage sur une famille importante d'exoplanètes. Un tel projet correspond à la taille d'une mission L (projet placé par le SPC de l'ESA comme priorité suite aux missions L2 et L3).

Recommandation : priorité à la continuité du programme *Cosmic Vision*
- Sécurisation de BepiColombo et Juice
- Engagement ambitieux sur M4
- Une exploration des géantes glacées correspond à l'ambition d'une L4

Programme d'exploration. Ce programme à visée technologique de l'ESA, offrant a priori de remarquables opportunités scientifiques, est extraordinairement ambitieux, centré sur Mars et la Lune, avec dans les deux cas, un retour d'échantillons comme objectif à terme. Les russes sont les partenaires privilégiés de ce programme. Sa réalisation dans la décennie à venir requiert au minimum le doublement de son budget annuel (~120 M€ en 2013), ce qui n'est pas dans les perspectives budgétaires du CNES. ExoMars est la première mission de ce programme. La mission de 2016 est en voie d'achèvement. Le groupe regrette le choix d'une charge utile plus politique que scientifique pour l'orbiteur TGO. Le rover *Pasteur* est en cours de développement : sa réalisation pour un lancement en 2018 paraît techniquement risquée alors même que l'ESA n'a pas la totalité du budget nécessaire.

Quoique scientifiquement intéressant, le programme d'exploration de l'ESA ne nous paraît pas crédible en l'état de par l'évolution d'ExoMars et de certains choix technologiques. Nous rappelons toutefois notre attachement à la mission ExoMars et notre volonté de voir le sort de cette mission résolu de façon satisfaisante.

Missions nationales. Depuis les tentatives Mars Premier et NetLander, il n'y a plus de programme national en planétologie. Plusieurs consultations de la communauté ont montré que les plateformes nationales micro/mini-satellites ne conviennent pas à nos besoins.

Les spécificités, les coûts et la complexité des missions planétaires ne permettent pas d'envisager une mission nationale en planétologie.

Ballons. La communauté française souhaite contribuer à deux projets d'exploration de Vénus et Titan, qui requièrent des études (phase 0/A) de la division ballons du CNES. Ces missions n'ont pas de contexte programmatique bien défini : M4 à l'ESA, *New Frontiers*

ou *Discovery* à la NASA, projets russes. Le CST a fait savoir qu'un seul de ces projets de ballons planétaires – au maximum – pourrait être étudié. Rappelons que seuls la NASA et le CNES ont une expertise dans le domaine des ballons planétaires, à l'inverse de l'ESA. Par ailleurs, les ballons dans l'atmosphère terrestre offrent d'intéressantes opportunités de vol pour la planétologie, particulièrement pour des validations technologiques (ex. trappe orbitale) afin d'augmenter leur niveau de TRL.

Si la communauté internationale fait émerger des missions d'exploration de Titan ou Vénus utilisant un ballon, nous souhaitons que le CNES y participe.

Missions d'opportunité. Les opportunités de faire voler des instruments, souvent adaptables à l'étude de différents objets du Système solaire, sont nombreuses en planétologie. Parce que la planétologie française est performante et que le CNES, comme agence de moyens, est reconnu comme fiable, la communauté française se voit proposer de multiples opportunités de collaborations. Il convient de distinguer plusieurs classes de missions d'opportunité :

- *Les petites expériences scientifiques*, ou collaborations scientifiques sans fourniture instrumentale (financement COSI), permettent de maintenir des activités scientifiques et des collaborations internationales de haut niveau ; elles sont toujours d'un excellent rapport qualité/prix. Citons dans les dernières années, voire en cours de réalisation : Genesis (Soleil), Stardust, Dawn, Osiris-Rex (petits corps), Juno, New Horizons (Jupiter, Pluton), Lunar Prospector, Grail, Selene, Chandrayaan (Lune), Messenger (Mercure), Odyssey, Mers, MRO (Mars), en partenariat avec la NASA, l'ISRO et la JAXA. Ces missions ont permis d'alimenter notre communauté en données originales et de grande qualité, parfois également des échantillons auxquels nos laboratoires ont eu accès (Genesis, Stardust). Notre participation aux programmes NASA/*Discovery & New Frontiers*, aux programmes indiens et japonais, chinois et russes dans une moindre mesure, permettent à très faible coût des collaborations scientifiques remarquables.

Nous recommandons vivement ces collaborations, sans donner de priorité, vue la diversité des projets possibles et les très faibles coûts engagés.

- *Les petites contributions instrumentales* sont typiquement de 3-5 M€, à l'exemple de fournitures sur Phobos-Grunt (3 M€, Mars, Russie – échec), Maven (1,5 M€, Mars, NASA) et Hayabusa-2/Mascot (4,5 M€ y compris la part CNES/CST, petit corps, JAXA). Pour ces réalisations, les calendriers sont parfois tendus, ce qui n'est pas toujours compatible avec des développements technologiques impliquant une prise de risques importante.

Les petites contributions instrumentales permettent un excellent retour scientifique, sur la base du savoir-faire des laboratoires (spatiaux).

Pour un coût modéré, des contributions instrumentales modestes sur les programmes NASA/*Discovery & New Frontiers*, les programmes indiens et japonais, permettent un grand retour scientifique et la pérennisation des compétences dans les laboratoires.

- *Les grosses opportunités instrumentales* représentent une situation assez nouvelle, à l'exemple des contributions françaises sur MSL (instruments ChemCam et Sam, en opération depuis août 2012) et de la fourniture du sismomètre pour la mission InSight (lancement 2016), toutes deux pour l'exploration de Mars en partenariat avec la NASA. De tels engagements (10-20 M€) requièrent une totale confiance dans le partenaire et le management de son projet. Ils n'ont de sens que s'ils correspondent à une priorité forte de la thématique qui profitera à une communauté étendue de chercheurs et que si une telle fourniture est un élément central de la mission, offrant à la communauté un retour scientifique prometteur et une exceptionnelle visibilité du CNES et ses partenaires. Ils permettent également d'envisager une implication en France (CNES et laboratoires) dans les opérations, comme c'est le cas pour Curiosity et Rosetta.

Des engagements exceptionnels sur des missions d'opportunité avec des partenaires fiables doivent être maintenus au-delà du socle des missions de l'ESA, sur des programmes NASA/*Discovery, New Frontiers & Flagship*, des programmes japonais voire indiens (à évaluer pour d'autres partenaires). Ils doivent répondre à plusieurs critères : priorité forte de la planétologie française, excellent retour scientifique, bonne visibilité pour le CNES et les laboratoires. Ils doivent aussi être restreints à des savoir-faire bien maîtrisés en France.

Recommandation : les missions d'opportunité
Le contexte programmatique nous incite à accorder une très grande priorité aux opportunités, qui reposent de fait sur les filières instrumentales de la communauté.

Nos priorités thématiques pour ces opportunités sont :

* **Sondage *in situ* des atmosphères planétaires**
* **Structure interne (mesures sismiques ou sondages sous-surfaces selon l'échelle désirée)**
* **Composition des surfaces**

Les opportunités de mission sont fréquentes en planétologie. Elles ont toutes en commun un démarrage rapide et difficilement prévisible. Elles répondent toujours à une demande de la part de nos partenaires. Ces nombreuses demandes témoignent de l'excellence de notre thématique.

Dans la mesure où les missions d'opportunité se décident en peu de temps, le groupe recommande que le PMT du CNES prévoie chaque année une ligne budgétaire « ouverture de programme » d'un niveau important (~2 M€) pour les opportunités en planétologie.

3.4. Programme de R&T

La R&T est indispensable au développement de la planétologie. Deux exemples illustrent le rôle amont de la R&T dans les succès de la thématique aujourd'hui :

- *Lasers* : Entre 2001 et 2003, le CNES et l'IRAP conduisent une R&T sur la spatialisation d'un laser industriel pour l'analyse géochimique *in situ*. Suffisamment mature au moment de la réponse à appel d'offres, l'instrument ChemCam est sélectionné sur MSL en 2004.

  Entre 2006 et 2012, plusieurs R&T sont conduites pour améliorer la puissance de ce laser, ce qui permet de répondre à l'AO *New Frontiers* (mission SAGE, sans suite), puis pour modifier la cadence du laser : réponses à l'AO Mars2020 (en attente) pour un successeur de ChemCam et un instrument lidar original.

- *Sismomètres* : depuis la fin des années 90, plusieurs R&T ont contribué au développement d'un sismomètre planétaire. En 2007, une action « Sismomètre pour une mission lunaire » est initiée par le CNES et l'IPGP. Il s'agissait d'adapter les développements passés du sismomètre VBB martien pour une utilisation sur la Lune : amélioration des performances des capteurs de déplacement, tenue au froid, simplification de l'électronique. Ces développements consolident les performances et la tenue aux environnements. Ils participent au succès de la proposition d'un VBB français sur l'atterrisseur InSight (lancement prévu en 2016).

Au séminaire de Biarritz, les axes prioritaires étaient : la miniaturisation des instruments et la conception d'instruments d'analyse *in situ*. Le volet miniaturisation se doit d'être transversal à toutes les actions de R&T de la discipline. L'analyse *in situ* a démontré son utilité ces dernières années et se doit de continuer.

Recommandation : la R&T doit privilégier la conception d'instruments d'analyse *in situ*.
A Biarritz, il avait été proposé de développer un système de datation. Porté par l'IDES à Orsay, le projet de datation *in situ* sur Mars est très intéressant scientifiquement mais complexe à mettre en œuvre. Il repose sur la mesure du chronomètre $^{40}K/^{40}Ar$. La concentration en potassium est obtenue en Libs (mesure analytique type ChemCam) et les isotopes de l'argon sont obtenus par spectrométrie de masse des espèces désorbées par le laser. Ce projet a été soutenu à travers plusieurs actions de R&T, ainsi qu'une thèse financée par le CNES qui a permis de mettre en place un banc expérimental au laboratoire, puis son

exploitation et son optimisation. Les premiers résultats sont encourageants mais ne permettent pas encore d'envisager la réalisation d'une expérience spatiale. Nous réitérons l'intérêt de la communauté pour une expérience de datation. Les premières années de R&T n'ont pas confirmé la possibilité de la réalisation d'un démonstrateur et le travail de R&T doit donc se poursuivre.

Sur la période 2009 – 2013, plusieurs actions de R&T ont été engagées sur le développement d'un spectromètre de masse à haute résolution ($m/\Delta m$ > 10 000, trappe orbitale). Ce développement est fortement soutenu par la communauté scientifique. Le projet est porté par C. Briois du LPC2E et R. Thissen de l'IPAG. Plusieurs actions de R&T sont conduites pour élever le TRL de l'instrument. Il s'agit en particulier de travailler sur l'alimentation HT qui nécessite d'être ultra-stable. Plusieurs expériences et missions sont intéressées par ce spectromètre : analyse de la composition des espèces volatiles des petits corps (astéroïdes, comètes) et du sol de Mars, des poussières interplanétaires, cométaires et stratosphériques, des atmosphères planétaires (Mars…), des aérosols et de la composante liquide de Titan. Toutefois, les performances prometteuses de la trappe orbitale ne sont pas établies tant qu'un instrument complet (= démonstrateur) n'est pas construit et testé. Si la communauté atmosphérique souhaite utiliser la trappe orbitale lors d'un vol stratosphérique, nous souhaitons nous associer à cet effort pour mieux connaître l'instrument en conditions de mesures *in situ*.

Recommandation : la trappe orbitale est une priorité de la thématique. Il devient urgent d'en construire un démonstrateur de laboratoire qui devra confirmer les performances attendues.

À l'exemple de la trappe orbitale, il nous paraît nécessaire que le CNES mette en œuvre un processus sélectif pour la réalisation de démonstrateurs instrumentaux fonctionnels et performants afin de combler l'espace entre une R&T de sous-systèmes et un objectif de TRL-5 au niveau instrument.

Les besoins en R&T sont grands dans les laboratoires, et dans le même temps, les propositions au CNES sont peu nombreuses. Les ingénieurs n'ont pas le temps de se consacrer à 100 % sur la R&T, mais ils peuvent tout à fait piloter à raison de quelques heures par semaine seulement un ingénieur ou un technicien qui fera le travail. Nous pensons que la R&T dans les laboratoires peut être faite en partie par un soutien ponctuel sous forme de CDD, sous la responsabilité des ingénieurs confirmés qui préservent le savoir-faire acquis.

Nous recommandons que la R&T puisse financer des CDDs dans les laboratoires.

3.5. Résumé des recommandations du GTSS

Plusieurs recommandations ont été mises en avant. Nous les rappelons ici PAR ORDRE DE PRIORITE (décroissante) pour les programmes scientifiques :

Recom-1 : Priorité à la continuité du programme CV
- Sécurisation de BepiColombo et Juice
- Engagement ambitieux sur M4
- Une exploration des géantes glacées correspond à l'ambition d'une L4

Recom-2 : Retour d'échantillons
Priorité à une mission de préparation ou de réalisation d'un retour d'échantillons (1- Mars, 2- Lune ou Petit corps).

Recom-3 : Les missions d'opportunité
Le contexte programmatique nous incite à accorder une très grande priorité aux opportunités, qui reposent de fait sur les filières instrumentales de la communauté. Nos priorités thématiques pour ces opportunités sont (sans ordre de priorité) :
- Sondage *in situ* des atmosphères planétaires
- Structure interne (mesures sismiques ou sondages sous-surfaces selon l'échelle désirée)
- Composition des surfaces

Recom-4 : Exoplanètes
Recommandation à moyen terme d'une mission pluridisciplinaire de caractérisation des atmosphères des exoplanètes.

Pour la R&T, l'effort doit se porter sur les instruments *in situ*. Nous proposons une recommandation spéciale pour la trappe orbitale.

Recom-1 : Analyse *in situ*
La R&T doit privilégier la conception d'instruments d'analyse *in situ*.

Recom-2 : Trappe orbitale

La trappe orbitale est une priorité de la thématique. Il devient urgent d'en construire un démonstrateur de laboratoire qui devra confirmer les performances attendues.

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE SOLEIL, HELIOSPHERE, MAGNETOSPHERES

1. BILAN SCIENTIFIQUE DEPUIS 2009

Le bilan scientifique de ces dernières années est particulièrement fécond, avec un nombre inégalé d'instruments en exploitation sur des missions dont plusieurs connaissent une longévité exceptionnelle: Cluster, Cassini, et Soho, mais aussi Demeter et Stereo. Chacune a continué à apporter une riche moisson de résultats, avec une tendance générale à l'approfondissement et à la maturation des connaissances. L'avenir se dessine avec plusieurs missions désormais engagées, comme Taranis, BepiColombo, Solar Orbiter et Juice, dans lesquelles la communauté s'est fortement investie. L'exercice de prospective s'annonce très différent des précédents, avec une proportion plus importante de missions d'opportunité et, en arrière-plan, la gestation de plusieurs projets ambitieux pour le long terme.

1.1. Physique du Soleil et de l'Héliosphère

L'actualité scientifique dans cet axe thématique est dominée par deux missions qui sont en exploitation depuis plusieurs années : Soho (1995-) et Stereo (2006-). Soho présente une longévité exceptionnelle et continue à fournir des données uniques, même si certains de ses instruments sont aujourd'hui supplantés par ceux de la mission NASA SDO (2010-). En particulier, les images de la couronne solaire prises par Soho sont essentielles pour détecter et comprendre le décollage de perturbations interplanétaires géo-effectives. Grâce à sa longévité, Soho permet aujourd'hui de mener des études statistiques sur l'évolution du Soleil à un moment unique où celui-ci semble être entré dans un régime de moindre activité. Pendant ce temps, la paire de satellites Stereo a poursuivi le contournement du Soleil, offrant des vues saisissantes de la propagation de perturbations interplanétaires en direction de la Terre. Stereo a révolutionné l'imagerie solaire et héliosphérique par sa capacité à fournir une vision tridimensionnelle du Soleil et de l'héliosphère interne.

La mission Rhessi (2002-) de la NASA poursuit avec succès l'étude des processus éruptifs solaires par spectro-imagerie gamma à haute résolution spatiale. Ulysse (1990-2009) a achevé sa mission consistant à sonder l'héliosphère hors du plan de l'écliptique. Signalons aussi des vols de fusée-sonde, comme l'instrument Hecor (Herschel EUV CORonograph) qui a volé avec succès en septembre 2009 à bord d'une fusée de la NASA. Hecor aura permis de mieux comprendre la distribution mal connue de l'Hélium dans la couronne solaire.

Un autre événement majeur du bilan est la sélection en octobre 2011 par l'ESA de la mission Solar Orbiter (2017-). Cette mission de classe M fédère une grande partie de la communauté SHM autour de l'étude de l'origine et des caractéristiques du vent solaire, du champ magnétique héliosphérique, et des particules solaires de haute énergie. Solar Orbiter sortira du plan de l'écliptique et s'approchera jusqu'à 62 rayons solaires du Soleil. Elle sera complétée par la mission Solar Probe Plus (2018-) de la NASA qui ira sonder la couronne solaire jusqu'à 9,8 rayons solaires afin d'étudier *in situ* les mécanismes d'accélération et de chauffage du vent solaire. Solar Probe Plus sera ainsi la première mission à réellement pénétrer dans une atmosphère stellaire, avec tous les défis technologiques que cela entraîne. Elle est l'héritière d'une longue lignée de projets, auxquels la France avait fortement contribué : la sonde solaire, Phoibos, etc.

En février 2011, Stereo a pour la première fois fourni une vision intégrale du Soleil: l'utilisation simultanée d'images recueillies par Stereo et par Soho a en effet permis de visualiser le Soleil dans son intégralité et de suivre ainsi sans interruption l'évolution de son activité.

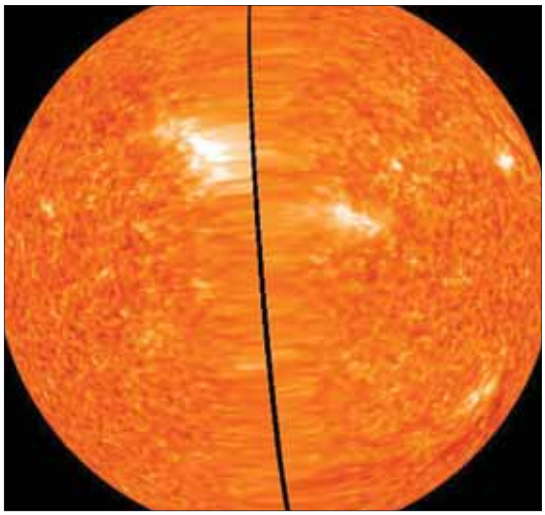


Image complète du Soleil (6 février 2011), prise dans l'UV extrême, et montrant ici la face cachée du Soleil [NASA/GSFC].

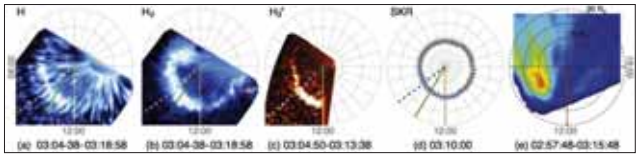
1.2. Magnétosphères terrestre et planétaires

L'actualité scientifique est ici fortement dominée par la mission à quatre satellites Cluster (2000-) dont la plupart des instruments sont encore pleinement fonctionnels. Cluster avait pour objectif principal l'étude de la dynamique spatio-temporelle de la magnétosphère terrestre sous l'influence du vent solaire. Cette mission a révolutionné notre compréhension de la microphysique des plasmas grâce à sa capacité à lever l'ambiguïté entre variations spatiales et temporelles. Cluster a aussi contribué à révéler les nombreux parallèles entre la magnétosphère terrestre, en tant qu'objet à étudier, et les systèmes astrophysiques dans lesquels un corps magnétique interagit avec un plasma faiblement collisionnel. L'énorme succès de ce concept innovant de vol en formation a conduit la NASA à engager deux autres missions multi-satellites auxquelles participe la communauté française : Themis (2007-) et MMS (2014-).

La configuration variable de Cluster permet d'étudier des phénomènes physiques agissant à l'échelle d'interaction des ions, jusqu'aux plus petites échelles, dites électroniques. L'impossibilité de sonder ces différentes échelles simultanément avec quatre satellites a donné naissance au concept plus ambitieux de Cross-Scale, constitué d'un essaim de dix satellites. Cross-Scale n'a pas été sélectionné en 2010 par l'ESA, mais le concept d'essaim de satellites reste incontestablement une priorité de la communauté et du programme Cosmic Vision.

Parallèlement à cela, on assiste à un intérêt croissant pour l'étude de l'environnement ionisé des autres corps de notre Système solaire, avec plusieurs axes : l'étude comparative des magnétosphères, l'étude des planètes géantes et de leur interaction avec leurs satellites naturels, mais aussi des thèmes plus spécifiques comme l'érosion atmosphérique et ce qu'elle nous apprend sur l'historique de notre environnement terrestre. La voie avait déjà été ouverte par la mission Cassini-Huygens (1997-), dont l'exploration de l'environnement kronien continue à apporter une moisson de résultats nouveaux. Les missions Mars Express (2003-), Vénus Express (2005-) et Maven (2013-) poursuivent cette voie.

Dans le voisinage de Saturne, la structure fine et complexe des aurores kroniennes a pu être mise en évidence grâce à l'étude simultanée des émissions UV, infrarouge et radio mesurées par les instruments de la sonde Cassini. L'identification de trois régions émettrices d'ondes radio a ainsi apporté des contraintes nouvelles sur le rôle des courants alignés avec les lignes de champ magnétique.



Projection polaire d'une aurore observée simultanément dans plusieurs bandes du spectre : l'UV (a et b), l'infra-rouge (c), avec l'emplacement simulé des sources radio (d), et l'intensité des émissions d'ions H+ énergétiques [Lamy et al., JGR 118 (2013)].

La sélection en 2012 par l'ESA de la mission de classe L Juice (Jupiter Icy Moon Explorer, anciennement Laplace et EJSM) constitue une autre avancée majeure pour la communauté et confirme cette réorientation thématique vers les autres corps du Système solaire. En attendant le lancement de Juice vers 2022, l'actualité de ces prochaines années sera dominée par deux autres missions majeures du programme obligatoire de l'ESA : BepiColombo (2017-) vers Mercure et Rosetta (2004-), dont la rencontre en août 2014 avec la comète Churyumov-Gerasimenko est attendue avec impatience.

1.3. Couplages Magnétosphères-Ionosphères-Atmosphères

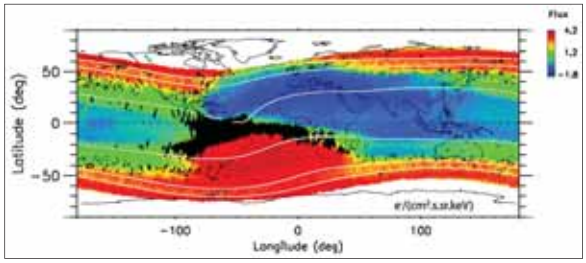
L'intérêt croissant pour les couplages entre régions est une tendance forte qui est commune aux différentes composantes de la communauté SHM. Cet intérêt se justifie par le rôle-clé des interfaces dans notre compréhension de la dynamique des milieux. Ceci est particulièrement vrai pour le système magnétosphère-ionosphère-atmosphère, dont les échanges continus de matière et d'énergie requièrent une approche globale. Notre connaissance de ces milieux est parvenue à un stade de maturité relativement élevé et les projets nouveaux ont donc davantage tendance à se focaliser sur des problématiques spécifiques, mais non moins importantes.

Demeter (2004-2010) aura été le premier microsatellite de la filière Myriade. Son objectif scientifique était l'étude des perturbations ionosphériques liées à l'activité séismique. Demeter a effectivement mis en évidence une modification statistique de la propagation des ondes dans le guide Terre-ionosphère au-dessus des épicentres, quelques heures avant un séisme. Toutefois, cette mission se sera surtout distinguée par ses nombreuses avancées scientifiques sur la physique ionosphérique, avec par exemple l'impact des émetteurs radio terrestres sur la population de particules énergétiques dans les ceintures de radiation.

Un autre fait marquant est le passage très attendu du projet de microsatellite Taranis en phase C en 2012. La mission est maintenant en bonne voie pour être lancée en 2016. Son objectif est l'étude des phénomènes lumineux transitoires (TLE) et plus généralement les transferts impulsifs d'énergie de la basse atmosphère jusque dans l'ionosphère. Taranis illustre ainsi 'intérêt des microsatellites pour réaliser une mission ciblée sur une problématique nouvelle, avec un fort potentiel scientifique. Cette mission bénéficiera de plusieurs activités d'accompagnement au sol (ballons, réseaux de détecteurs lumineux) et sur la Station Spatiale Internationale.

L'étude de l'ionosphère aurorale et son couplage avec la magnétosphère constitue un axe thématique historique important pour la communauté, avec une participation active à de petites missions d'opportunité de la NASA comme Fast et Polar ou l'utilisation de données de missions dédiées à l'environnement terrestre comme Champ et Swarm. Plusieurs projets sont en préparation dans le sillage de ces missions.

Les observations de Demeter ont mis en évidence une accélération rapide et cohérente des particules situées dans les ceintures de radiation lors d'orages magnétiques. Ces résultats ont été rendus possibles grâce à la haute résolution en énergie des détecteurs de particules, qui ont ainsi révélé le rôle prépondérant des ondes de très basse fréquence dans l'accélération des particules.



Distribution géographique des flux des électrons de 200 keV à 650 km d'altitude. Les régions (en noir) situées de part et d'autre de l'anomalie de l'Atlantique Sud présentent les bandes en énergie caractéristiques de l'accélération résonante des particules avec des ondes de très basse fréquence [Sauvaud et al., JGR 118 (2013)].

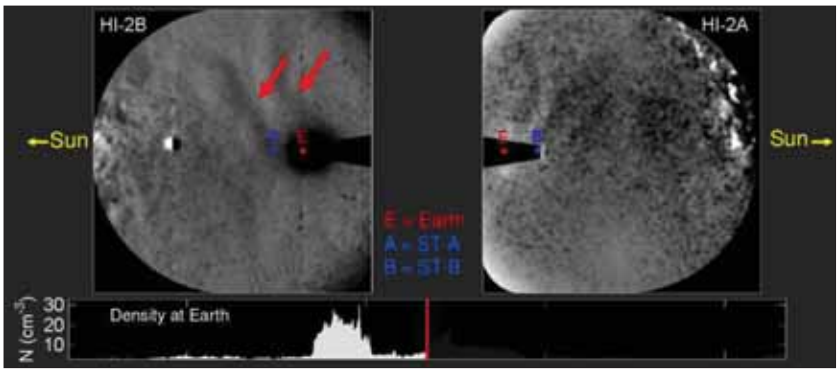
1.4. Relations Soleil-Terre pour la météorologie de l'espace

Cet axe plus récent se distingue des précédents par une vision plus systémique de notre héliosphère, et par son positionnement à l'interface entre la recherche fondamentale, les applications et les besoins sociétaux. Cet axe répond au double besoin de mieux comprendre les couplages des régions allant du Soleil à la Terre, et de surveiller l'impact de l'activité solaire. Il est résolument multidisciplinaire et ses études s'appuient généralement sur une variété de missions et d'instruments au sol.

L'ESA a lancé en 2008 un programme préparatoire de Space Situational Awareness (SSA), comprenant un volet dédié à la météorologie de l'espace (SWE). Lors de la conférence ministérielle de novembre 2012, la France a décidé de se retirer de la seconde phase de ce programme. Cette décision montre que la thématique peine à émerger en France, en dépit de fortes compétences, notamment avec les pôles thématiques CDPP et MEDOC. Il y a donc un urgent besoin de coordination au niveau national et d'interlocuteurs scientifiques pour assurer le lien avec les utilisateurs.

Un autre sujet d'actualité est le lien entre variabilité solaire et changement climatique. Le microsatellite Picard (2010-2013) avait justement vocation à aborder cette question multidisciplinaire sous l'angle de la variation présumée du diamètre solaire. La plupart des instruments de Picard ont fourni des données de haute qualité et notamment des mesures d'irradiance totale avec un niveau d'étalonnage inégalé. En revanche, une anomalie optique du télescope Sodism a hélas empêché le suivi des variations du diamètre solaire avec le niveau de précision souhaité pour tirer des conclusions définitives.

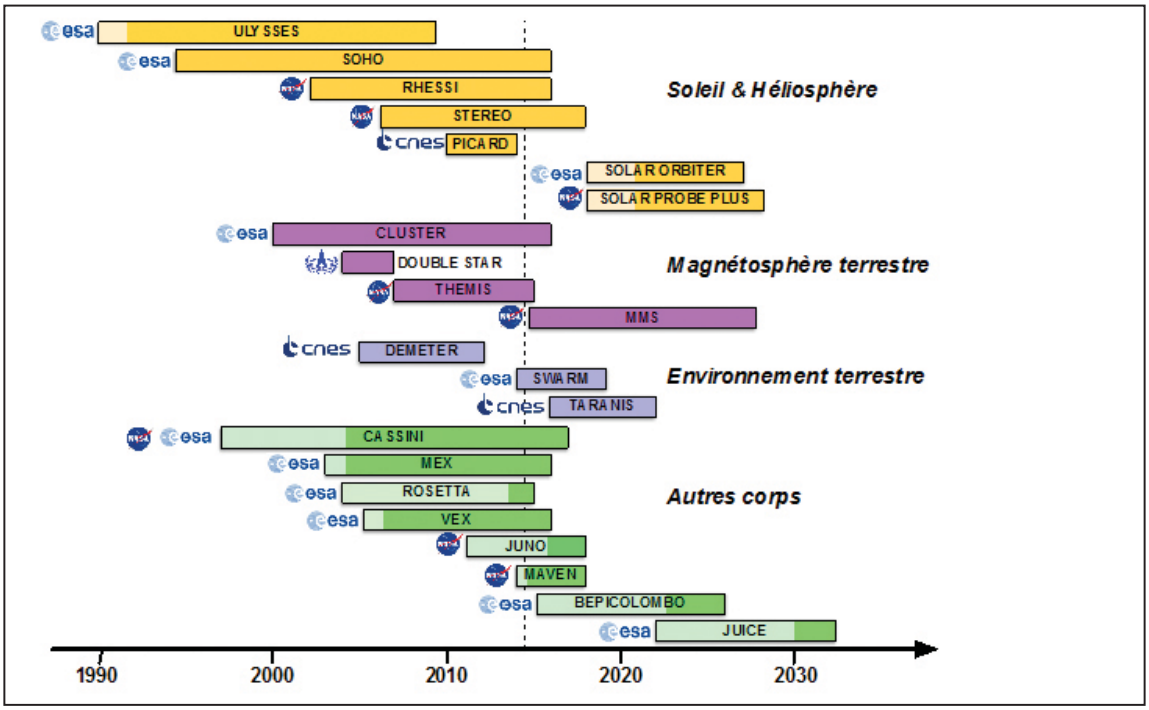
Les études en relations Soleil-Terre s'appuient fortement sur l'analyse de jeux de données multi-instruments. Ces études bénéficient aujourd'hui considérablement des outils modernes développés par les pôles thématiques (CDPP, MEDOC) qui font désormais partie intégrante de l'exploitation des missions. Ceci est tout particulièrement le cas pour des missions complexes comme Solar Orbiter, qui combinent des mesures in situ et de l'imagerie. L'exemple ci-dessous illustre l'observation d'une onde de densité, dont le suivi continu du Soleil jusqu'à la Terre a pu se faire grâce à la combinaison de plusieurs instruments.



Propagation d'une éjection de masse coronale par les imageurs héliosphériques de la paire de satellites Stereo. L'onde de densité est observée dans les images retouchées (flèches) et mesurée *in situ* par le satellite ACE. La Terre est située en E. [Rouillard et al., ApJ 719 (2010)].

Bilan programmatique

Le bilan programmatique est résumé par la figure ci-dessous qui reprend les missions avec une forte participation (généralement instrumentale) de la communauté SHM. La phase de croisière des missions, lorsqu'il y en a une, apparaît en clair.



2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE SHM

Les recommandations du groupe SHM sont l'aboutissement des discussions menées au sein de notre groupe depuis une année, avec une consultation plus large de la communauté PNST (Programme National Soleil-Terre) lors de son colloque de prospective qui a eu lieu en février 2014. Ces recommandations se placent dans la continuité d'une réflexion déjà engagée lors du précédent exercice de prospective de 2009. Notre avenir programmatique diffère fortement de celui qui prévalait en 2009 : plusieurs missions importantes du programme obligatoire de l'ESA sont désormais engagées et le paysage actuel comprend une riche palette de missions d'opportunité. En arrière-plan, plusieurs concepts ambitieux sont en train d'émerger pour préparer l'avenir au-delà de 2030.

2.1. Priorités scientifiques

Le bilan qui précède montre que la plupart des disciplines du groupe SHM ont atteint un degré de maturité élevé, s'appuyant sur un long héritage de missions solaires et magnétosphériques qui mettent en œuvre des filières d'instruments de TRL élevé. Les équipes de la communauté SHM sont fréquemment sollicitées pour ce savoir-faire qui fait leur réputation sur la scène internationale. Les avancées scientifiques de la prochaine décennie sont attendues sur plusieurs fronts. L'évaluation des réponses à l'appel à propositions ainsi que le bilan de ces dernières années nous permettent de définir trois axes scientifiques prioritaires :

2.1.1. Explorer des régions nouvelles offrant un fort potentiel de retour scientifique :

Il s'agit notamment de la sortie du plan de l'écliptique pour l'étude du Soleil et du vent solaire à haute latitude, de l'exploration *in situ* de l'environnement ionisé d'autres corps du Système solaire (Jupiter, Uranus, la Lune, etc.) ainsi que de l'étude *in situ* des sources du vent solaire. Pour ce dernier il faudra pénétrer au plus profond d'un des environnements les plus extrêmes de notre héliosphère, qu'est la couronne solaire.

2.1.2. Explorer des régimes nouveaux, avec de la haute résolution spatiale et temporelle pour mieux comprendre la microphysique des processus fondamentaux.

Il s'agit là d'un des enjeux majeurs pour les plasmas spatiaux. La haute résolution permet notamment de contraindre les processus d'accélération et de la dissipation de l'énergie. Les sondes spatiales apportent ici une vision *in situ* de ces processus fondamentaux qui vient compléter celle des observations dans les plasmas de laboratoire et à distance dans les plasmas astrophysiques. L'étape suivante consiste à explorer simultanément plusieurs échelles spatiales grâce à des constellations de satellites. Les quatre satellites de Cluster ont ouvert la voie aux observations multi-points des plasmas spatiaux qui figurent parmi les priorités du programme Cosmic Vision.

2.1.3. Obtenir une vision plus systémique du système Soleil-Terre

Il s'agit d'observer la chaîne complète des interactions depuis le Soleil jusqu'à la Terre (y compris son atmosphère neutre) avec un accent particulier sur l'étude des couplages entre milieux. La météorologie de l'espace ainsi que l'étude du lien Soleil-climat entrent dans ce cadre.

2.2. Priorités programmatiques

Le paysage programmatique dans le domaine SHM diffère nettement de celui qui prévalait lors des séminaires de prospective de 2004 et de 2009. Nous sommes en phase de transition : les missions de grande longévité telles que Cluster, Cassini et Soho, qui ont fortement fédéré la communauté, vont bientôt arriver à leur terme. La relève est en partie assurée par plusieurs projets d'envergure tels que BepiColombo, Taranis, Solar Orbiter et Juice, dont l'engagement a considérablement éclairci le paysage actuel. Ces futures missions assureront un fort retour scientifique jusque vers 2030. Toutefois, elles ne couvrent qu'une partie des trois axes prioritaires, et la communauté reste donc fortement investie dans la préparation de nouvelles propositions. Les opportunités en missions ESA de classe L2 et L3 sont déjà préemptées mais il reste les missions M4 et S2, ainsi que les missions d'opportunité. La phase actuelle se prête donc mal à un interclassement de projets.

Le programme obligatoire de l'ESA a toujours joué un rôle majeur dans la thématique SHM et continue d'être un facteur de stabilité programmatique. Le groupe SHM réaffirme donc son soutien au programme obligatoire de l'ESA, avec l'engagement en faveur de la mission Juice. Cependant, les nombreux appels d'offres qui se sont récemment succédé ont fortement sollicité les laboratoires, réduisant leur capacité à mener des actions de R&T. Le prochain appel d'offres concerne une mission de classe M4, ainsi qu'une mission de classe S2 en partenariat avec la Chine. Le groupe SHM a identifié, pour chacun, des projets qui sont particulièrement en phase avec ses priorités scientifiques. Certains de ces concepts devraient émerger dans le cadre de missions d'opportunité, et il est dès lors possible d'envisager plusieurs scénarios pour couvrir un même thème scientifique avec des missions différentes.

Les missions d'opportunité ont de tout temps constitué une base importante pour la communauté SHM. Les laboratoires sont généralement sollicités en raison de leur savoir faire, grâce à des instruments de TRL élevé. Dans la décennie à venir, ces missions d'opportunité vont très probablement jouer un rôle accru dans notre paysage programmatique.

En raison de ce contexte unique, la stratégie programmatique du groupe SHM consistera à identifier les meilleurs candidats actuels pour les trois axes scientifiques prioritaires définis plus haut. Un interclassement rigide a peu de sens, car trop tributaire des appels d'offres à venir. Nos deux principaux critères de sélection sont la capacité à offrir de fortes avancées scientifiques sur ces axes et un excellent rapport qualité/investissement. Deux autres critères sont l'adéquation avec les compétences techniques des laboratoires (afin de valoriser les compétences uniques ou menacées) et la synergie avec d'autres projets, lorsque c'est le cas.

Avec ces critères, les meilleurs candidats, classés par axe scientifique prioritaire, sont:

2.2.1. Explorer des régions nouvelles

Le groupe SHM soutient particulièrement une participation française à la mission bi-satellite russe Interhelioprobe (lancement prévu vers 2021), qui ira explorer l'héliosphère interne hors du plan de l'écliptique. L'intérêt majeur de cette mission, qui bénéficie d'un fort soutien du programme International Living With a Star, réside dans sa forte synergie avec Solar Orbiter et Solar Probe Plus. L'ensemble des quatre satellites permettra, à l'image de Cluster, de faire des études multi-points de l'héliosphère interne. Ainsi, pour la première fois nous pourrons étudier la structure tri-dimensionnelle des perturbations interplanétaires.

Sport est aussi une mission hors écliptique, mais de taille plus modeste, et portée par la Chine. Le lancement n'est pas prévu avant 2020. Son intérêt réside dans son orbite polaire autour du Soleil qui lui permettra de faire de l'imagerie des perturbations interplanétaires.

Sur le long terme, une mission pour explorer Uranus et son environnement figure parmi les fortes priorités en Europe, ainsi que du Decadal Survey américain. Phoibos et Solaris sont eux aussi deux concepts ambitieux : Phoibos se basera sur les acquis de Solar Probe Plus pour aller explorer la couronne solaire jusqu'à 4 rayons solaires, alors que Solaris sera un observatoire solaire hors écliptique, probablement mu par une voile solaire. Phoibos possède déjà un long historique de soutien de la part de la communauté. Les deux missions seront exigeantes en termes d'orbite et il est donc important de maintenir une veille sur ces aspects pour assurer leur préparation.

2.2.2. Explorer des régimes nouveaux.

Le groupe SHM soutient ici un fort engagement sur la prochaine mission M4 avec deux candidats ex æquo qui abordent la microphysique sous des angles différents et sont donc complémentaires. Alfven est une mission bi-satellite qui étudiera les processus d'accélération dans les régions aurorales. Cette mission se situe dans la lignée directe du projet Imedia qui avait déjà bénéficié d'un fort soutien du groupe SHM en 2004 et en 2009. Twins étudiera quant à lui la turbulence du vent solaire jusqu'aux plus petites échelles spatiales et temporelles. Il s'agit d'une version bi-satellite du projet Tor déjà soumis comme mission S1. Comme pour Imedia, ses deux satellites sonderont à la fois la structure spatiale et la variation temporelle des milieux traversés.

Ces deux projets de classe M4 réapparaîtront sous des formes voisines mais dans le cadre d'autres appels d'offres. Le concept d'Alfven sera repris par Ohmic (Explorer NASA) et pourrait donc émerger comme mission d'opportunité. De la même façon, le concept de Twins sera en partie repris par les projets plus modestes Tor (S2 ESA-Chine) et Eddie (Smex NASA) en version mono-satellite, donc sans le volet consacré à la résolution spatiale.

À plus long terme, la communauté profitera des acquis des missions multi-satellite Themis et MMS pour proposer à nouveau un projet ambitieux de vol en formation pour l'étude multi-échelles des plasmas, dans la lignée du projet Cross-Scale (soumis comme M ESA). Un tel projet reste incontestablement un objectif prioritaire pour la communauté.

2.2.3. Étude systémique des relations Soleil-Terre et des couplages

Le groupe SHM soutient particulièrement une participation française au projet Instant (S2 ESA-Chine), qui fera de l'imagerie solaire depuis le point de Lagrange L5 tout en faisant office d'observatoire permanent des perturbations solaires géoeffectives. Instant tire profit des acquis de Stereo pour s'écarter de l'axe Soleil-Terre. Il remplit des objectifs à la fois en physique solaire et héliosphérique, et en météorologie de l'espace.

Le concept d'Instant sera repris dans le projet Easco (Explorer NASA), qui pourrait émerger comme mission d'opportunité, mais avec une instrumentation plus fournie. Dans la catégorie des microsatellites, SWUSV (S2 ESA-Chine) et Nitro (Smex NASA) sont dédiés respectivement à la surveillance du Soleil dans l'UV et à l'étude de l'échappement des ions dans la haute atmosphère.

A plus long terme, Oisva est un concept de microsatellite pour un sujet interdisciplinaire en plein essor, à savoir l'étude de l'impact de l'activité solaire sur la haute et moyenne atmosphère. Ce point sera repris dans la section sur l'interdisciplinarité.

2.3. Résumé des priorités

Après évaluation des projets, le groupe SHM a identifié une mission prioritaire pour chacun des trois axes scientifiques :

P0 Soutien au programme obligatoire de l'ESA Cosmic Vision et engagement sur Juice

P0 Participation à la mission M4 de l'ESA avec deux projets ex aequo sur la microphysique : Alfven et Twins (axe thématique 2 « régimes nouveaux »)

P1 Participation à la mission d'opportunité russe Interhelioprobe (axe thématique 1 « régions nouvelles »)

P1 Participation à mission S2 Instant (axe thématique 3 « relations Soleil-Terre »)

Cependant, pour chaque question physique il existe d'autres projets qui se déclinent sous diverses formes. Ces autres projets pourraient donc devenir à leur tour une priorité du groupe, en fonction du résultat des sélections, et après évaluation. Ceux connus à ce jour, et qui ont un intérêt particulier, sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

axe scientifique prioritaire	P0 Une mission M4 ESA	P1 Une mission S2 ESA-Chine	P1 Missions d'opportunité	à long terme
1. régions nouvelles		Sport	**Interhelioprobe**	Phoibos, Solaris, Uranus
2. régimes nouveaux	**Alfven et Twins**	Tor	Ohmic, Eddie	vol en formation
3. relations Soleil-Terre		**Instant**, SWUSV	Easco, Nitro	Oisva

Répartition thématique des projets à court et moyen terme. Les projets prioritaires figurent en gras. Dans certains cas, le même concept peut porter des noms différents.

2.4. Microsatellites CNES

Plusieurs projets soumis à l'appel à idées CNES font appel à des microsatellites (Oisva, Tor, Instant, Nitro, SWUSV...), ce qui souligne l'intérêt pour ce type de mission. La thématique SHM avait jusqu'ici largement bénéficié du programme de microsatellites du CNES, avec Demeter, Picard et Taranis. Ceux-ci offrent en effet une complémentarité intéressante avec le programme obligatoire de l'ESA. En outre, ils constituent une des rares opportunités en Europe pour avoir de petites missions de type Smex. La flexibilité des microsatellites les prédispose à une science de type test d'hypothèses, portant sur des sujets qui correspondent à des évolutions thématiques récentes, comme par exemple l'étude de la turbulence aux petites échelles.

En l'absence de perspectives claires pour poursuivre la filière microsatellite par le CNES, **le groupe SHM réaffirme l'importance d'une filière microsatellites pour mener des projets ciblés qui jouissent d'une forte visibilité internationale.** Les microsatellites permettent de jouer un rôle moteur au sein de la communauté internationale et offrent un accès facilité à des instruments innovants.

L'emport de petites charges instrumentales passagères pourrait aussi être envisagé à bord de microsatellites français qui sont portés par d'autres communautés, comme par exemple l'observation de la Terre. Cette question du partage de plateformes, voire de projets entre les groupes du TOSCA et du CERES sera reprise plus bas.

2.5. Météorologie de l'espace

Cette thématique récente concerne l'impact sociétal des conditions du milieu spatial. Elle émane notamment des besoins de certains utilisateurs pour surveiller et prédire ces conditions. Ces besoins soulèvent plusieurs questions nouvelles. L'une concerne la nécessité d'avoir des observations continues, alors que dans la thématique SHM, les études sont habituellement de type événementiel. Une autre question porte sur le degré d'implication dans le développement de produits ou de services aux utilisateurs. Même s'il n'est pas du ressort de la communauté scientifique de développer de tels produits opérationnels, des relais forts avec les utilisateurs sont nécessaires. Le groupe SHM recommande donc une meilleure structuration des activités nationales en météorologie de l'espace et l'identification de quelques interlocuteurs pour interagir plus efficacement avec les partenaires privés ou institutionnels.

Lors des deux précédents séminaires de prospective, le groupe SHM avait déjà demandé une meilleure structuration, réaffirmée en 2009 par une recommandation en vue d'une participation au volet SWE (météorologie de l'espace) du futur programme Space Situational Awareness (SSA) de l'ESA. Ce programme est maintenant entré dans sa seconde période, à laquelle la France ne participe qu'en observateur, au titre de sa participation à la période 1. Le groupe SHM recommande fortement de réintégrer le volet SWE du programme SSA, et d'étudier dès à présent avec l'ESA les possibles contributions françaises. Cette participation est importante pour aider la communauté à s'insérer dans une dynamique internationale et pour faire valoir ses forts atouts reconnus mondialement.

2.6. Applications scientifiques de nano-satellites

En quelques années, les nanosatellites sont passés du statut d'outil pédagogique pour étudiants à de véritables micro-plateformes pour tester de nouvelles technologies ou pour remplir des objectifs scientifiques précis. Toutes les disciplines sont concernées mais l'environnement terrestre proche (et par conséquent la thématique SHM) est plus directement concerné par des petites plateformes avec des charges utiles allant de 1 kg à quelques dizaines de kg.

La tenue d'un atelier sur ce sujet a révélé le riche potentiel du format nano-satellite, et l'enthousiasme que suscitent de tels projets. Le CubeSat est particulièrement recommandé en raison de son format standardisé. Aujourd'hui, plusieurs universités françaises se sont engagées dans la réalisation de CubeSats. Certains projets sont à vocation éducative alors que d'autres sont purement scientifiques ou technologiques. Dans plusieurs pays, ces nanosatellites sont devenus un élément intégral du programme spatial.

Compte tenu de la forte demande de la communauté française pour mieux comprendre les atouts et les contraintes des CubeSats et ne pas rester à la traîne d'un phénomène, qui n'est plus un simple effet de mode, le groupe SHM recommande au CNES de prendre en compte cet intérêt pour les CubeSats. Une première étape serait de mieux identifier les niches pour lesquelles les CubeSats apportent une réelle plus-value scientifique ou technologique.

L'arrivée récente des CubeSats dans le paysage universitaire français va de pair avec une montée en puissance des campus spatiaux et un accès facilité à l'espace. Même si on peut se réjouir d'une telle évolution et de l'effervescence qui l'accompagne, nous notons aussi que le manque actuel de coordination favorise la dispersion des efforts et un gaspillage des ressources. Le groupe SHM recommande aussi au CNES de contribuer à une meilleure coordination nationale des projets.

2.7. Les interfaces avec les autres disciplines

Les couplages entre haute et moyenne atmosphère, la météorologie de l'espace ou encore la radioastronomie depuis la face cachée de la Lune (avec ses débouchés en cosmologie), sont autant d'exemples qui soulignent l'importance de l'interdisciplinarité dans nos thématiques. Ces interfaces entre disciplines sont à l'origine de nombreuses avancées scientifiques. L'intérêt pour de tels sujets ira incontestablement en augmentant.

Des projets comme Oisva (un microsatellite pour observer les couplages entre moyenne et haute atmosphère) répondent précisément à cet intérêt pour l'interdisciplinarité. Oisva, en particulier, établira un lien entre le milieu spatial ionisé et l'atmosphère neutre. De telles missions se heurtent toutefois à des modes de montage et d'exploitation de projet différents selon les communautés concernées. Ces divisions sont à l'image des modes de fonctionnement différents du TOSCA et du CERES. Le groupe SHM recommande donc le renforcement des interactions entre le TOSCA et le CERES d'une part, mais aussi entre groupes thématiques du CERES afin de favoriser l'émergence de projets interdisciplinaires.

2.8. La R&T

La plupart des propositions du groupe SHM mettent en œuvre des filières d'instruments de TRL élevé mais l'avenir des instruments reste cependant assuré par une variété d'activités de R&T. Ces activités avaient quelque peu fléchi avec l'intense activité de préparation de missions et de réponses à des appels d'offres de l'ESA mais ont repris depuis. Elles portent sur les trois principaux types d'instruments pour lesquels la communauté SHM possède de fortes compétences : les détecteurs de particules, les capteurs d'ondes électromagnétiques (du continu aux ondes radio) et les spectromètres ou imageurs dans l'UV.

Le groupe SHM a identifié trois axes, qu'il soutient tout particulièrement dans le but d'anticiper les futures missions ou encore pour augmenter le retour scientifique par des chaînes de détection plus performantes.

2.8.1. La miniaturisation accrue des instruments et sous-systèmes

Elle est motivée par les contraintes de masse et de taille des satellites d'une part mais aussi par les impératifs de tenue aux radiations. Cette dernière est essentielle pour faire évoluer des missions comme Juice dans l'environnement hostile de planètes géantes.

La miniaturisation permet aussi de favoriser l'emport de l'instrument comme charge passagère à bord de missions qui ne remplissent pas le même objectif. Cela concerne notamment la météorologie de l'espace avec l'embarquement de détecteurs de particules à bord de satellites commerciaux pour en surveiller l'environnement radiatif.

La proposition qui entre dans cette catégorie est Ambre NG, qui est un concept de détecteur miniaturisé de particules de basse énergie. Cependant, d'autres actions de R&T en cours ou attendues, visent la miniaturisation. Cela concerne par exemple la miniaturisation de l'électronique dans les analyseurs spectraux pour les ondes radio.

2.8.2. La haute résolution temporelle

La haute résolution temporelle est indispensable à l'observation des variations rapides du milieu, par exemple avec les missions Twins et Alfven. Les détecteurs de particules sont ici plus directement concernés car leur cadence est conditionnée par le rapport signal/bruit lié au comptage des particules. Les actions de R&T concernent la modification de la géométrie des capteurs, afin d'offrir un balayage plus rapide, voire instantané, en énergie et en angle solide.

La proposition qui entre dans cette catégorie est Plasma Tracker qui est un détecteur de particules de basse énergie.

2.8.3. L'évolution vers la haute résolution spectrale et temporelle dans l'imagerie UV et les mesures polarimétriques

La spectro-imagerie rapide, dans laquelle sont combinées la haute résolution spatiale, spectrale et temporelle, est un objectif aussi ambitieux que prometteur pour diagnostiquer les sources d'émission UV dans l'Univers, et en particulier l'atmosphère solaire. Plusieurs efforts de R&T sur ce sujet sont menés dans le monde. La France possède un savoir-faire unique, qu'il convient de maintenir. Pour cela le groupe SHM recommande le passage en phase 0 de l'instrument Fasolasi qui est un spectro-imageur pour l'étude de la raie Lyman-alpha de l'hydrogène.

Lyot+ est une suite constituée d'un coronographe visible et Lyman-alpha et d'un imageur EUV. Cette suite avait déjà été soutenue par le groupe SHM dans le cadre de la proposition de mission Smese (abandonnée en 2009) et est depuis en attente d'opportunité de vol. En raison de son grand intérêt pour la physique solaire, le groupe SHM encourage le maintien d'une veille technologique, en attendant une opportunité pour la partie coronographique, voire aussi pour l'imageur. Une première opportunité de vol se présentera avec le projet Instant (S2 ESA-Chine).

Plus généralement, les mesures dans l'UV sont une spécialité de la communauté que nous souhaitons maintenir et développer avec des objectifs de R&T à plus long terme. Cela concerne notamment la proposition Musici (concept instrumental pour la reconstruction du spectre UV solaire à partir de mesures radiométriques) et les mesures polarimétriques qui sont intéressantes pour lever des ambiguïtés sur l'étude de l'hydrogène interplanétaire et interstellaire.

Notons enfin que les projets à long terme pour la sortie du plan de l'écliptique (Phoibos, Solaris) ou l'exploration de planètes externes du Système solaire (Uranus) bénéficieront sans doute de modes de propulsion alternatifs tels que la voile solaire et la voile électrique, pour lesquels une veille technologique est recommandée.

3. RÉPONSES AUX QUESTIONS TRANSVERSES

Le texte ci-dessous comprend la réponse du groupe SHM à certaines des questions transverses reprises lors des ateliers du séminaire de prospective de la Rochelle (17-20 mars 2014).

3.1. Pour la thématique, quel est le bon équilibre/quelles sont les priorités entre les différentes parties du programme pour les projets en développement : Cosmic Vision/programme d'exploration de l'ESA/missions nationales/missions d'opportunité/ballons

L'équilibre entre les trois types de mission (ESA obligatoire/microsatellites CNES/missions d'opportunité) a jusqu'ici permis d'assurer une bonne flexibilité programmatique :

- Le **programme obligatoire** de l'ESA est facteur de stabilité et permet d'engager des actions de R&T pour de nouveaux instruments, avec une prise de risque accrue. Toutefois, les derniers appels sont devenus particulièrement contraignants en termes de flexibilité sur la charge utile et d'exigence sur le niveau de TRL, rendant ainsi le développement instrumental moins intéressant. En ce sens, les missions du programme obligatoire ESA commencent à s'apparenter à des missions d'opportunité.

- Les **missions d'opportunité** permettent de valoriser l'investissement en R&T en favorisant l'emport d'instruments mûrs ou « sur étagère ». Elles sont nombreuses dans la thématique SHM en raison du degré de maturité généralement élevé des instruments.

- Les **microsatellites** CNES offraient jusqu'ici l'intérêt de combiner une charge utile flexible avec des projets ciblés, tout en assurant à la France un rôle moteur sur le plan international, avec une forte visibilité. Les réponses à l'appel à idée du CNES montrent qu'il existe pour cette filière une forte potentialité de proposition et d'initiative dans la communauté SHM. La prospective CNES s'est ainsi révélée un exercice motivant pour la communauté scientifique et aurait pu être une véritable opportunité pour redynamiser la recherche spatiale française. Or le retrait implicite de cette filière, avec un redéploiement sur les missions d'opportunité et le programme obligatoire de l'ESA, est une source très sérieuse d'inquiétude et d'incompréhension. Faut-il donc d'emblée s'autocensurer et abandonner toute initiative ambitieuse faute de crédibilité et de soutien ? Ceci serait en totale contradiction avec le texte de l'appel à idées. Par ailleurs, il serait intéressant d'étudier la possibilité d'avoir des microsatellites inter-programmes, avec par exemple l'emport de quelques instruments plasma sur un projet dédié à l'observation de la Terre.

- Le concept de **nanosatellite** est le dernier arrivé dans ce paysage. Il offre des perspectives intéressantes mais ciblées pour faire des démonstrateurs (en particulier ceux avec une rupture technologique) ou pour remplir des niches scientifiques, par exemple avec des essaims permettant une couverture globale de l'environnement terrestre. Le nanosatellite ne doit pas être vu comme la miniaturisation d'un microsatellite mais demande véritablement à repenser la science et la technologie pour de petites plateformes.

Le groupe SHM note pour l'instant l'absence d'intérêt pour des ballons. En revanche, les fusées-sonde offrent une opportunité intéressante pour spatialiser des instruments nouveaux tout en assurant des objectifs scientifiques ciblés. Des programmes américains et norvégiens assurent des lancements réguliers de fusées, emportant souvent des instruments français à leur bord.

3.2. L'organisation actuelle de l'exploitation des données est-elle adaptée aux besoins à venir ? Quid des pôles thématiques ? Faut-il un segment sol dédié à chaque mission ?

Ces dernières années, les pôles thématiques (CDPP, MEDOC) ont joué un rôle majeur dans le retour scientifique des missions en cours d'exploitation par la mise à disposition des données mais aussi par le développement d'outils innovants offrant une plus-value aux données. Plus largement, les initiatives liées aux Observatoires Virtuels touchent tous les domaines des groupes SHM et Système Solaire et sont fortement liées aux développements portés par les projets européens (EUROPLANET-RI, HELIO, IMPEx, CASSIS).

Les partenaires français (BASS-2000, MEDOC, CDPP, VOParis / Planéto + Héliophysique, OV GSO / STORMS) ont été très actifs dans ces différents projets, et les instituts concernés, qui ont, pour certains, pris un leadership dans leur domaine, ont la charge de pérenniser les développements. Il est donc nécessaire de soutenir leurs actions quelle que soit leur implication dans les programmes en cours (Horizon 2020 ou SSA). Le rôle capital de l'Action Spécifique Observatoire Virtuel (ASOV, soutenu par le CNES) dans la coordination de ces centres (ateliers techniques, soutien...) doit être souligné.

Les aspects technologiques associés aux Observatoires Virtuels, s'ils peuvent paraître très techniques et chronophages de prime abord, n'en sont pas moins nécessaires. Ils requièrent en effet de mettre en conformité des systèmes, souvent historiques et de nature très hétérogènes. Ces aspects ne sont pourtant pas une fin en eux-mêmes et on assiste, aujourd'hui, à une maturité qui permet de les rendre invisibles aux utilisateurs. Le but final de l'OV est en effet que seule l'information utile scientifiquement soit communiquée à l'utilisateur. Citons ici quelques exemples de réalisations concrètes : client EPN-TAP, outils du CDPP (AMDA, 3DView, etc.). Ces développements d'outils viennent notamment en support à l'exploitation des missions actives (Rosetta, Cassini, Cluster, etc.) et à la préparation des missions futures (Solar Orbiter, Juice et autres).

En résumé, les développements OV peuvent être considérés comme un ensemble de bonnes pratiques (standardisation des formats et protocoles de communication). Ces dernières ont tout avantage à être soutenues et popularisés par le CNES, que ce soit dans ses réalisations internes ou bien dans sa communication vers l'extérieur. Ceci peut être réalisé à travers de structures formelles (similaires à celle de l'International Planetary Data Alliance dont le CNES fait partie), ou bien par une implication dans des groupes de réflexion comme ceux de l'International Virtual Observatory Alliance (IVOA) ou de SPASE. Au niveau national, un soutien du CNES aux initiatives « Observatoire Virtuel » devrait ainsi passer par un support accru à l'ASOV afin qu'elle étende son domaine d'activités.

3.2.1. Mode de réalisation des projets : quels principes pourraient guider la répartition des rôles du CNES et des laboratoires ? Taille du consortium, complexité de l'instrument? Dans quel cas le CNES doit-il être maître d'œuvre ? Être en support ? Quels métiers faut-il absolument conserver dans les laboratoires?

On constate depuis plusieurs années une volonté claire du CNES de privilégier l'externalisation des développements instrumentaux dans nos domaines de recherche. Cette approche est déjà courante dans les sciences de la Terre. Elle apporte certainement des avantages, notamment par la mutualisation des compétences, dans un contexte d'effondrement des moyens dans nos laboratoires. Mais cette politique est aussi devenue une véritable menace pour l'avenir de la recherche scientifique spatiale en France.

En effet, l'objectif naturel de toute équipe spatiale est légitimement de pérenniser le savoir-faire sur ses instruments et de faire fructifier cet acquis. Cet objectif devrait être partagé par toute institution qui a financé d'une manière ou d'une autre ce développement instrumental, et par ce biais aussi la formation de l'équipe projet. Cette pérennisation à l'intérieur de nos laboratoires passe avant tout par le maintien de spécialités-clés qui n'existent pas dans l'industrie. Dans ce contexte particulier, les notions d'héritage technologique et de transfert de compétences prennent une grande importance. La sous-traitance de telles spécialités est non seulement difficile mais engendre aussi des coûts souvent prohibitifs.

Un autre aspect de ce problème est la pérennisation des acquis qui n'est que rarement assurée. La plupart des instruments sont en effet uniques car faits sur mesure pour les besoins spécifiques de la mission. Il arrive fréquemment que des pièces ne puissent pas être sous-traitées correctement, soit en raison de leur haut niveau de technicité soit parce que le maintien des compétences (et donc la stabilité des caractéristiques de l'instrument) ne sont pas garantis par le sous-traitant. Enfin, l'optimisation d'une exploitation scientifique d'un instrument implique la plupart du temps un retour immédiat et une excellente connaissance de cet instrument. Le retour d'expérience montre que ceci est difficile dans le cas de contrats industriels. Il existe évidemment des exemples réussis de sous-traitance

mais ceux-ci restent marginaux dans la thématique SHM.

Notre souhait est de permettre aux équipes de laboratoire de maintenir leur avancée technologique à travers le suivi de projets de R&T, de pouvoir accéder à des projets spatiaux (quel que soit le niveau de responsabilité du laboratoire), d'être soutenues par une agence spatiale capable d'initiatives nationales ou internationales et surtout d'éviter dans la mesure du possible que ces personnels soient divertis vers d'autres tâches pour lesquelles ils sont moins compétents.

Or, la politique actuelle des projets (notamment avec la limitation du nombre de CDD ainsi que la diminution du personnel technique) vient ajouter aux tâches habituelles une importante charge de gestion de projet. Les nouvelles règles de suivi qualité n'ont fait qu'amplifier cette charge et le volume de la documentation à produire a atteint des niveaux sans précédent – sans forcément résoudre les problèmes auxquels la documentation est sensée pallier. Ces règles ont paradoxalement mis en danger plusieurs projets instrumentaux (démotivation, surcharge de travail avec retard dans le développement, départs, etc.). Il est donc urgent de mener dès le séminaire de prospective une réflexion profonde afin d'enrayer cette dérive progressive. Nous voulons en particulier déterminer comment préserver dans nos laboratoires les compétences en instrumentation, en les préservant des tâches qui mettent en péril leur savoir-faire.

3.2.2. Les Régions et Universités, mais aussi les LABEX/IDEX récemment créés interviennent dans le financement d'équipements mi-lourds, de la R&D, des nanosatellites, etc. Comment assurer la coordination nationale (voire la cohérence) d'un dispositif qui se décentralise et voit se multiplier le nombre d'acteurs ?

La mise en place récente des nouvelles structures de recherche (LABEX/IDEX/Campus Spatiaux) a conduit à l'émergence de nombreuses filières liées au spatial en parallèle de celle du CNES. Ce regain d'intérêt pour le spatial est évidemment intéressant mais n'est pas sans susciter des inquiétudes. Ces filières sont en effet accompagnées de ressources financières que les équipes ne peuvent ignorer après la chute drastique des moyens récurrents alloués aux laboratoires. Cependant, les appels d'offres locaux sont axés sur des actions à court terme et sont attribués uniquement sur projet. Ils n'ont donc pas de cohérence nationale et ne favorisent pas les collaborations en dehors du cadre imposé par la structure ou les tutelles (LABEX, etc.). Cette évolution récente pousse donc à la concurrence plutôt qu'à la collaboration. Ceci est particulièrement frappant en région parisienne où quatre grandes communautés d'universités et d'établissements ont vu le jour cette année. Or chacune a des ambitions spatiales et cherche à se doter de moyens (salles blanches, etc.). La mise en place de ces nouvelles structures ne favorise donc guère les collaborations constructives au-delà des frontières de ces structures.

Notre principale inquiétude concerne ici la fragmentation qui risque de fragiliser davantage la recherche spatiale. Les laboratoires spatiaux sont aujourd'hui en difficulté, du fait de la surcharge de travail des équipes techniques et de la réduction des effectifs qui inhibent leur capacité à mener les actions de R&T nécessaires pour assurer leur avenir. Face à cela, de nouvelles équipes (pas forcément intégrées dans les laboratoires spatiaux) s'engagent aujourd'hui dans des projets spatiaux de courte durée, financés par les structures de type LABEX, sans nécessairement disposer des moyens pour les poursuivre sur le long terme.

Or les projets spatiaux se construisent en général sur de longues durées, sans compter la phase d'exploitation. Cette émergence toute récente de deux filières de développement, une rapide et une lente, peut redynamiser la recherche spatiale, à condition de maintenir une forte synergie entre les deux filières. Or le mode de fonctionnement actuel des structures de recherche ne favorise pas cette coordination, ce qui fait craindre une dispersion accrue des moyens et la fragilisation des laboratoires spatiaux, sans renforcer par ailleurs la communauté.

L'élément le plus emblématique de cette évolution est le nano-satellite : une meilleure coordination nationale permettrait de tirer un bien meilleur profit de l'effervescence actuelle, tout en évitant l'émergence de multiples projets sans réelle plus-value, si ce n'est la formation des étudiants. Les CubeSats permettent en effet d'associer des objectifs pédagogiques avec la réalisation de véritables démonstrateurs technologiques et une science ciblée. Ces points sont repris dans le document de prospective du groupe SHM.

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE PHYSIQUE FONDAMENTALE

1. GRANDES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

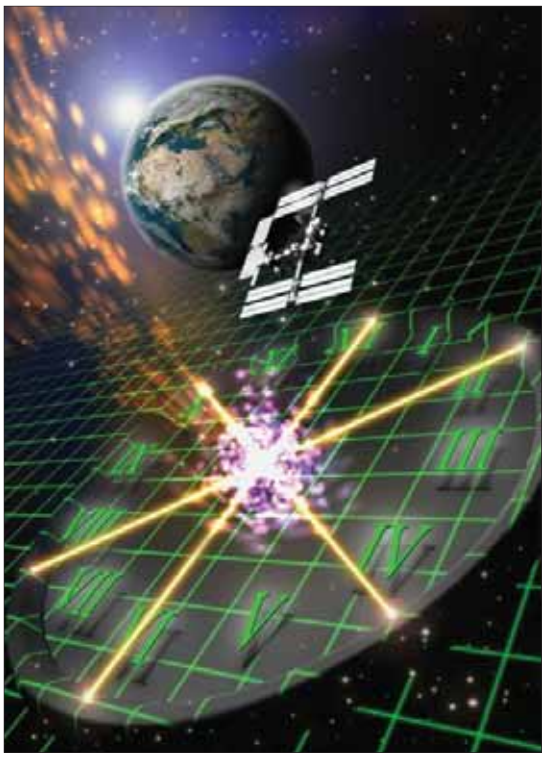
Les motivations et les grandes questions dans le domaine de la physique fondamentale dans l'espace ont été définies lors des séminaires de prospective précédents. Il s'agit de rechercher de nouveaux moyens d'accès à une physique nouvelle qui interviendrait :

- à la frontière entre la mécanique quantique et la relativité générale, résultant d'une unification non comprise actuellement entre la gravitation et les autres interactions fondamentales qui sont décrites par la théorie quantique des champs ;

- et/ou dans la description des constituants fondamentaux de l'Univers à grande échelle (énergie noire et matière noire), mesurés par les succès du modèle cosmologique Λ-CDM, mais dont la nature est jusqu'à présent inconnue.

Ces questions sont au centre des préoccupations de la communauté de physique fondamentale, et elles sont étroitement imbriquées aux grandes questions que se posent les communautés voisines qui interviennent dans les sciences de l'Univers, avec notamment le satellite Planck pour la mesure des anisotropies du fond cosmologique de rayonnement diffus, le satellite Euclid pour la caractérisation de l'énergie noire et de la distribution de la matière noire, le satellite astrométrique Gaia qui permettra (entre autres objectifs) de déterminer la distribution de matière noire dans notre Galaxie et de tester des modèles de gravité modifiée, et l'observatoire d'ondes gravitationnelles eLisa ainsi que l'observatoire Athena en X pour la physique des trous noirs et des corps compacts.

Il y a aussi un lien important avec la communauté de physique des particules car les résultats récents du LHC confirment le modèle standard de la physique des particules, tout en affinant les contraintes sur les profondes remises en cause auxquelles conduiraient la physique « au-delà du modèle standard ». Or le modèle standard de la physique des particules reste incomplet au vu des observations en cosmologie dont le scénario Λ-CDM rend très bien compte, mais en introduisant la matière noire non baryonique qui sort du cadre du



modèle standard, et l'énergie noire qui, interprétée de façon naturelle en terme de densité d'énergie de fluctuations du vide, est prédite par ce modèle à une valeur incompatible avec les observations. De plus le modèle standard de la physique des particules a ses propres déficiences : un groupe de jauge non simple U(1) x SU(2) x SU(3), un grand nombre de paramètres libres, le problème de la non-violation de CP par les interactions fortes qui pourrait conduire à une particule candidate pour la matière noire, et le problème de la hiérarchie des échelles d'énergies entre l'unification électro-faible à 250 GeV et la grande unification à 10^{15} GeV, dont une solution connue est la super-symétrie qui donne aussi lieu à des candidats pour la matière noire.

La gravitation devrait s'unifier aux autres interactions fondamentales à l'énergie de Planck 10^{19} GeV, mais la relativité générale souffre d'un grave problème dû à la dimensionalité de sa constante de couplage (la constante de Newton G), qui fait qu'elle ne peut pas être quantifiée perturbativement et décrite par une théorie des champs renormalisable. Cependant toutes les tentatives d'unification (super-cordes, etc.) de la relativité générale avec les autres interactions décrites par des théories quantiques renormalisables ont conduit à des champs nouveaux se superposant au champ de spin 2 de la relativité générale, avec comme conséquences observables une violation du principe d'équivalence d'Einstein, et éventuellement une modification des paramètres post-newtoniens en champ faible à l'échelle du Système solaire.

Dans ce contexte, l'apport du spatial à la physique fondamentale consiste à tester la relativité générale (qui est la théorie qui joue un rôle essentiel à l'échelle de l'orbite terrestre et du Système solaire) et ses fondements avec la plus grande précision possible. Les progrès dans les techniques spatiales permettent aujourd'hui d'aller au-delà d'un simple rôle d'observateur : l'espace est un nouveau laboratoire, libéré des contraintes liées à l'environnement terrestre. Ce laboratoire, avec les technologies associées, ouvre la voie à de nouvelles découvertes, grâce à des expérimentations et des mesures directes, des précisions améliorées et/ou l'exploration de nouveaux territoires.

2. BILAN DEPUIS LE DERNIER SÉMINAIRE

Ces points sont clairement illustrés par les deux missions spatiales « phare » du CNES en physique fondamentale, Microscope et Pharao/Aces, qui ont été initiées par des équipes françaises et sont soutenues depuis des années dans le cadre de collaborations européennes. Ils sont également valables pour des participations aux projets européens eLisa et LisaPathfinder (LisaPF), et pour des instruments spécifiques volant aujourd'hui, comme T2L2, ou en phase de recherche et développement pour les missions futures (Ice, Gap, etc.).

Les deux projets Microscope et Pharao/Aces ont connu une maturation spectaculaire depuis le dernier séminaire de prospective et seront lancés avant fin 2016.

Le projet Microscope (MICRO Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) utilisera des accéléromètres ultrasensibles dans l'espace pour gagner un facteur 200 sur la précision du principe d'équivalence faible (ou universalité de la chute libre des corps) par rapport aux meilleurs tests au sol. A ce niveau extrême de sensibilité, de l'ordre de 10^{-15}, pourraient apparaître des violations du principe d'équivalence dues à l'existence d'un champ scalaire dilatonique prévu par certains modèles d'unification comme la théorie des super-cordes.

Le projet Aces (Atomic Clock Ensemble in Space) emportera dans l'espace l'horloge à atomes froids Pharao, ce qui ouvrira la voie grâce à l'environnement de microgravité à des performances nettement améliorées pour des applications en métrologie, et conduira à une mesure du décalage gravitationnel des fréquences (effet Einstein, qui est un aspect du principe d'équivalence d'Einstein) dans le champ de la Terre avec une précision inégalée de 10^{-6}.

Il est clair que la disponibilité de très bonnes horloges dans l'espace comme Pharao dessine une perspective à long terme où l'échelle de temps atomique international (TAI) sera construite dans l'espace et disséminée de manière précise et rapide à la surface de la Terre. Ceci permettra de dépasser les limites liées à l'environnement terrestre, déjà perceptibles aujourd'hui, et d'améliorer la résolution des systèmes GNSS, qui constituent déjà des exemples éclatants d'application inattendue des ressources de la physique spatiale, de la physique quantique et de la relativité. Le projet Ustar, pour la comparaison d'horloges à distance dans la suite de Aces et T2L2, qui avait été retenu pour une phase 0 au CNES lors du précédent séminaire de prospective, n'a pas pu aboutir dans le contexte des programmes européens actuels, mais il reste lui aussi intéressant.

Le projet STE-Quest de mesure du principe d'équivalence par interférométrie atomique ainsi que du redshift gravitationnel, dans un satellite sur une orbite dédiée, se place au cœur des motivations scientifiques de physique fondamentale, à la frontière entre gravitation et mécanique quantique. STE-Quest a connu un développement majeur depuis le dernier séminaire de prospective (incluant une meilleure compréhension de ses objectifs scientifiques), et a fait partie de la phase finale de la sélection M3. Cependant, pour des raisons budgétaires et afin de tenir dans l'enveloppe des missions M, il a été décidé en 2013 par la Science Team de STE-Quest de placer l'horloge pour le test du redshift en option et de ne proposer que l'expérience d'interférométrie (instrument Ati) mais en gardant tous les liens avec le sol.

Les horloges optiques, les senseurs inertiels à atomes froids, qui utilisent et développent les technologies quantiques dont Pharao est le précurseur, nécessitent de disposer de liens optiques ayant des sensibilités compatibles en particulier sur le très long terme. L'expérience de télémétrie laser T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser), maintenant embarquée sur le satellite d'altimétrie Jason-2 avec le soutien du CNES, permet d'obtenir des précisions impressionnantes dans les mesures de distance avec les satellites, dans les comparaisons d'horloges au sol, et est utilisée par de nombreuses stations sol pour faire de la métrologie. L'expérience T2L2 fonctionne sans discontinuité depuis 2008 et son extension sur la période 2015-2016 est recommandée. La stabilité en fréquence relative de comparaison d'horloges descend maintenant au-dessous de 10^{-16} sur le long terme, et la précision en temps est meilleure que 100 ps.

Les horloges d'Aces seront reliées au sol par un instrument de télémétrie laser analogue à T2L2, et STE-Quest inclut une option avec un lien optique de nouvelle génération. Une utilisation des données T2L2 pour la calibration des mesures de tirs

lasers sur l'orbiteur lunaire LRO est initiée et devra permettre par combinaison aux données laser sur les réflecteurs lunaires une amélioration importante de la modélisation de la dynamique lunaire, apportant ainsi de nouvelles contraintes sur la structure interne de la Lune et sur les scénarios de sa formation. De telles avancées dynamiques permettront de repousser ainsi les limites des tests du principe d'équivalence dans le Système solaire. Par ailleurs, des travaux sont en cours à l'OCA sur le test de l'invariance de Lorentz à partir des données T2L2. La télémétrie laser est donc une technique cruciale pour la physique fondamentale, avec l'amélioration de la connaissance du champ de gravité de la Terre, la mesure de l'effet Lense-Thirring et le test du principe d'équivalence par tirs lasers vers la Lune ou le LRO. De plus elle ouvre la voie à de nouvelles applications qui concernent plusieurs disciplines voisines, comme les sciences de la Terre avec la géodésie, et la navigation spatiale car les méthodes optiques peuvent être étendues avec une excellente précision à des sondes naviguant dans le Système solaire.

La métrologie du champ de la Terre offre un accès privilégié aux sources du champ gravitationnel, et donc aux variations spatio-temporelles de masse volumique dans chacune des parties de la Terre. Le champ de gravité conditionne aussi les mouvements de fluides à sa surface, par exemple la circulation océanique par rapport au géoïde terrestre. Les missions de géodésie spatiale Champ, Grace et Goce, dont les accéléromètres de l'ONERA constituaient le cœur instrumental, ont révolutionné la connaissance de notre planète. A noter que ces accéléromètres forment aussi le cœur instrumental de Microscope et seront emportés sur la prochaine mission de géodésie spatiale Grace-Follow On.

La connaissance et la mesure très précise du champ de gravitation du Soleil et des planètes est un enjeu crucial dans le contexte de la physique fondamentale. De là découlent la trajectographie très précise des satellites, une meilleure réalisation des systèmes de référence, et l'amélioration des éphémérides planétaires dans le Système solaire. L'objectif d'emport d'un accéléromètre de type Gap sur des missions lointaines, retenu lors du précédent séminaire de prospective, n'a pas pu aboutir sur la mission Juice, mais il reste important pour des projets futurs en particulier vers Neptune ou Uranus. La démonstration du principe d'un accéléromètre à biais compensé a été faite en laboratoire. La connaissance du champ de gravitation à grande distance du Soleil est également intimement liée aux modèles de formation du Système solaire, une des grandes questions de la planétologie comparée qui se développe aujourd'hui grâce à l'accumulation de données sur les exoplanètes.

Les senseurs inertiels et accéléromètres utilisant les techniques d'interférométrie atomique offrent maintenant des performances comparables ou meilleures que leurs pendants classiques. L'interféromètre atomique Ice (Interférométrie atomique à sources Cohérentes pour l'Espace), mesurant l'accélération d'atomes de rubidium refroidis par laser, a été testé avec succès en vol parabolique dans l'avion Airbus ZéroG. Le piégeage simultané de deux espèces atomiques, rubidium et potassium, a été démontré et le test du principe d'équivalence au niveau quantique entre ces deux espèces est sur le point d'être réalisé dans l'avion. Cette expérience pave la voie pour des missions futures telles que STE-Quest.

L'observatoire spatial d'ondes gravitationnelles eLisa, qui avait été candidat pour une mission L1 à l'ESA, a maintenant été retenu par le SPC dans le cadre du thème « Univers gravitationnel » pour la mission L3 avec un lancement programmé en 2034. Le projet a connu une évolution remarquable depuis le dernier séminaire, avec une redéfinition complète du projet initial Lisa qui remontait aux années 1980 et était à l'origine prévu en coopération avec la NASA. La nouvelle version européenne eLisa est maintenant constituée d'un grand interféromètre optique avec des bras de 1 million de kilomètres en orbite autour du Soleil. Un point important est qu'eLisa bénéficiera directement des technologies et des performances du démonstrateur Lisa-PF testées pour l'instant au sol, et qui est maintenant prêt pour un lancement vers le point de Lagrange L1 en 2015.

Les problèmes du traitement des données, de leur mise à disposition pour des communautés plus larges, se sont posés pour l'ensemble des missions concernées. La question est bien entendu traitée au cas par cas, en appliquant des règles communes, qui tirent bénéfice de l'expérience des communautés de l'astrophysique et de la physique du Système solaire. Depuis le dernier séminaire il y a eu une solide mise en place du Science Working Group (SWG) associé à Microscope, avec pour mission la validation, l'analyse et l'interprétation des données, et qui va permettre de mobiliser la communauté autour des équipes aujourd'hui impliquées dans le projet. D'autre part une phase 0 a été faite au CNES sur la préparation au traitement des données d'eLisa. Un gros effort est également en cours pour organiser l'interface entre les équipes travaillant sur les éphémérides planétaires (INPOP), sur les analyses des données de navigation des sondes planétaires (Cassini, Messenger, Juice, etc.) et sur les modèles alternatifs de gravitation.

Le précédent séminaire de prospective avait insisté sur des questions liées à l'organisation de la communauté de physique fondamentale, qui accède aujourd'hui à un nouveau statut vis-à-vis du spatial. Depuis 2009,

des efforts multiples ont permis de mieux prendre en compte cette nouvelle réalité, en profitant de l'expérience plus ancienne des communautés Astrophysique et Physique du Système solaire. L'insertion de la physique fondamentale dans le pavage disciplinaire de l'INSU a été considérablement améliorée par la création de l'action spécifique GRAM, qui rassemble tous les laboratoires impliqués, qu'ils appartiennent ou non à l'INSU. Un autre problème relié est celui de l'absence de « laboratoire spatial » dans le domaine, même si plusieurs laboratoires ont maintenant acquis une réelle expérience du travail en commun avec les agences et les industriels. Une solution pourrait être la mise en place d'un « pôle spatial » ou d'un « pôle thématique » dédié, rassemblant les compétences déjà accumulées sur les missions spatiales existantes.

Dans ce bilan et pour la prospective discutée ci-dessous, il faut souligner la grande cohérence du programme spatial de physique fondamentale du CNES et de l'ESA, avec des filiations claires entre les missions (comme par exemple Microscope et Aces/Pharao puis STE-Quest), des développements techniques bien identifiés pour ces missions (T2L2, Ice, Lisa-PF), la mise en place des centres de traitement des données (Lisa-PF, Microscope, Aces/Pharao, eLisa), des instruments embarqués flexibles (Gap) et des supports théoriques dans les laboratoires (INPOP, modèles alternatifs de gravité, théorie post-newtonienne et relativité numérique pour les ondes gravitationnelles). Ce programme de physique fondamentale place le CNES et l'ESA en pointe des agences spatiales au monde dans ce domaine.

3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE PHYSIQUE FONDAMENTALE

Les grandes questions scientifiques en physique fondamentale pour l'espace peuvent être abordées par trois moyens :

- Les tests du principe d'équivalence et de ses diverses facettes que sont la variation des constantes fondamentales et le décalage gravitationnel des fréquences (effet Einstein) ;
- Les tests de la relativité générale proprement dite avec notamment la mesure des paramètres post-newtoniens β et γ mesurés dans le Système solaire ;
- Les observations en rayonnement gravitationnel avec notamment le comportement de la loi de la gravitation en champs forts et rapidement variables.

3.1. Le principe d'équivalence

Le principe d'équivalence d'Einstein (égalité de la masse gravitationnelle et de la masse inertielle des corps, et validité de la relativité restreinte dans les référentiels en chute libre) est une voie d'accès importante à de la physique nouvelle possible à l'interface entre la relativité générale et les autres interactions. Le CNES s'est engagé dans un programme unique pour tester le principe d'équivalence à un niveau inégalé tant pour l'Universalité de la chute libre avec Microscope que pour l'effet Einstein avec Aces/Pharao.

La prospective envisagée pour l'après Microscope consiste en l'utilisation de deux techniques expérimentales : d'une part l'interférométrie atomique (nouvelle pour l'espace) avec STE-Quest, pour un test du principe d'équivalence faible au niveau 10^{-15} comparable à Microscope ; d'autre part la cryogénie (qui a bien sûr déjà volé comme par exemple sur GP-B) avec Cryoscope, une version cryogénique de Microscope qui vise à un test plus approfondi au niveau 10^{-17}.

L'originalité de STE-Quest est de tester le principe d'équivalence pour des ondes quantiques, en comparant par interférométrie atomique (grâce à l'instrument ATI) la chute libre de deux espèces atomiques différentes (deux isotopes du Rb). Les tests du principe d'équivalence au sol pour des ondes quantiques ont débuté avec la fameuse expérience d'interférométrie neutronique de Colella, Overhauser et Werner en 1975 au niveau 10^{-3} et se sont poursuivis à partir des années 1990 avec les expériences d'interférométrie atomique. Le niveau de précision des expériences d'interférométrie atomique atteint 10^{-7} entre deux atomes différents (K et Rb pour Ice et deux isotopes du Rb dans une expérience de l'ONERA) et 10^{-9} entre le Cs et la chute libre d'un corps macroscopique (en pratique, un coin cube). La précision visée par STE-Quest est de 10^{-15}, soit 6 ordres de grandeur de mieux que les meilleurs tests du principe d'équivalence réalisés au sol par interférométrie atomique.

Néanmoins cette précision est comparable à celle de Microscope, donc l'intérêt scientifique de STE-Quest réside dans la spécificité du test du principe d'équivalence au niveau quantique par rapport à un test classique de comparaison entre des masses macroscopiques comme dans Microscope. Cette question a été étudiée par le groupe théorique chargé de la rédaction des motivations scientifiques dans le Livre Jaune de STE-Quest. Notons que ces motivations sont en plus des motivations « classiques » invoquées pour Microscope, qui sont basées par exemple sur l'existence possible d'un champ dilatonique léger.

Une première conclusion, a priori négative, est que le couplage des champs quantiques à la gravitation est tellement contraignant, qu'il n'y a pas de formalisme théorique qui permettrait de distinguer un test de violation du principe d'équivalence pour des ondes de matière quantiques d'un test pour des corps classiques.

Donc, si Microscope ne voit rien au niveau 10^{-15}, il n'y a pas de formalisme théorique qui permettrait de dire que STE-Quest pourrait voir quelque chose au même niveau 10^{-15}.

Néanmoins, l'absence de formalisme théorique ne signifie pas qu'il ne faille pas faire d'expériences. Par exemple l'expérience GBAR du CERN va tester à partir de 2015 la chute libre d'anti-atomes au niveau 10^{-2} (ce qui peut aussi être vu comme un test du principe d'équivalence pour des ondes quantiques), sans qu'il existe de formalisme théorique qui prédirait une violation du principe d'équivalence pour l'anti-matière au niveau 10^{-2}.

La deuxième conclusion, positive, est que le test quantique est intéressant pour plusieurs raisons :

- Contrairement à la mécanique classique, la chute libre en mécanique quantique n'est pas universelle : seule la valeur moyenne d'un ensemble de mesures du temps de vol d'une particule quantique redonne la valeur universelle classique ;
- L'absence de théorie quantique de la gravitation implique des incohérences dans notre description actuelle (théorie semi-classique) de comment les systèmes quantiques engendrent le champ gravitationnel. Bien que les tests quantiques du principe d'équivalence ne permettent pas de tester la théorie semi-classique, ils se situent à la frontière très intéressante entre gravitation et mécanique quantique ;
- Le test avec des ondes de matière quantiques utilise tout l'arsenal de la mécanique quantique pour coupler l'onde à la gravitation et apparaît comme plus fondamental. Notamment le spin quantique du champ doit se coupler à l'aide du formalisme de la tétrade (plutôt que la métrique) et de la dérivée spinorielle ;
- Il serait intéressant de tester le principe d'équivalence avec des ondes fermioniques (ou éventuellement avec des matériaux ordinaires mais dont le spin quantique est polarisé).

Une troisième réflexion concerne le potentiel à long terme de différentes techniques pour effectuer des tests très précis de physique fondamentale. Après des années de développement les tests du principe d'équivalence au sol approchent leur limite ultime de l'ordre de 10^{-13}. D'autre part, les tests classiques dans l'espace après Microscope vont nécessiter la difficile technologie cryogénique avec Cryoscope pour atteindre 10^{-17}. Par comparaison l'interférométrie atomique dans l'espace semble prometteuse sur le long terme mais demande à être évaluée plus précisément.

Il y a un intérêt scientifique fort à effectuer des tests du principe d'équivalence en orbite au niveau quantique par interférométrie atomique. Le satellite STE-Quest (dans sa version recentrée sur l'instrument ATI) correspond aux objectifs scientifiques bien identifiés à la frontière entre mécanique quantique et relativité générale. C'est une mission innovante qui s'inscrit dans un programme scientifique cohérent. En cas de succès, il faudra mettre les moyens nécessaires pour augmenter la maturité technologique de l'instrument, dans la période 2015-2016, en complément des études industrielles déjà réalisées côté français, notamment sur la source laser, et de la démonstration en vol parabolique de l'interféromètre atomique Ice.

À plus long terme, l'objectif ambitieux d'atteindre la précision 10^{-17} sur le principe d'équivalence grâce à une version cryogénique de Microscope doit être maintenu. Les problèmes techniques spécifiquement liés à la cryogénie dans l'espace pour Cryoscope (y compris les aspects collaboratifs avec des partenaires nationaux ou internationaux) devront être abordés.

L'effet Einstein dû au champ gravitationnel de la Terre va être mesuré par Pharao/Aces avec un très bon niveau de précision de l'ordre de 2×10^{-6}, puis par STE-Quest dans le cas des champs du Soleil et de la Lune, avec des précisions respectives de 6×10^{-7} et 1×10^{-4}. Pour aller au-delà (peut-être gagner un facteur 10 par rapport à Aces) une proposition à budget probablement limité est l'emport d'une horloge optique sous ballon (altitude 40 km) à comparer avec une horloge optique identique au sol. Le support du CNES est demandé pour étudier de façon préliminaire les financements et une partie des activités techniques (partenaires éventuels, aspects ballons, etc.) de cette proposition. D'autre part, la réalisation de l'horloge optique SOC (Space Optical Clock) étudiée par l'ESA constituerait une étape naturelle pour une mission spatiale après Pharao/Aces.

Les mesures les plus précises du rapport entre masse gravitationnelle et masse inertielle d'un système de deux corps de compositions atomiques différentes subissant le même champ de gravité sont actuellement obtenues par l'analyse des données du laser-Lune. Ces données présentent des incertitudes de l'ordre du centimètre provenant des modélisations insuffisantes de la rotation de la Lune et de rapports signal sur bruit faibles lors de l'acquisition des données au sol. Des travaux de mise en place de systèmes d'optique adaptative sont en cours d'installation au sein de la station de Calern afin d'améliorer ce dernier point et un groupement des équipes de recherche travaillant sur la dynamique lunaire avance dans la compréhension des mécanismes de rotation. Une mesure du temps aller-retour millimétrique permettrait une mesure du rapport masse gravitationnelle et masse inertielle de l'ordre de 10^{-14}. Une telle performance permettrait de compléter aux échelles astronomiques les mesures réalisées dans l'espace par Microscope ou STE-Quest.

3.2. La relativité générale

La relativité générale a passé avec succès tous les tests observationnels et expérimentaux, depuis l'échelle du laboratoire jusqu'aux échelles des orbites planétaires et des pulsars binaires. Néanmoins ce n'est que la théorie la plus simple dans la classe des théories métriques de la gravitation qui satisfont au principe d'équivalence d'Einstein. En laboratoire et jusqu'aux échelles planétaires, les théories métriques peuvent être paramétrisées par les paramètres post-newtoniens d'Eddington, essentiellement γ qui caractérise le taux de courbure spatiale dans la théorie, et β, qui mesure le montant de non-linéarité. Ces deux paramètres sont par convention égaux à 1 dans le cas de la relativité générale. La meilleure contrainte actuelle sur le paramètre γ a été obtenue en mesurant l'effet de retard gravitationnel Shapiro avec les données de navigation de la sonde Cassini (γ est mesuré égal à 1 à 2×10^{-5} près). Quant à β il est mesuré à 1 à 10^{-3} près en combinant le résultat pour γ avec la mesure de l'effet de précession relativiste des planètes comme Mercure. Gaia va permettre de contraindre beaucoup plus les paramètres β et γ notamment β grâce à la précession relativiste de certains astéroïdes. Les tirs lasers sur la Lune contraignent au niveau 10^{-4} une certaine combinaison de β et γ (dite combinaison de Nordtvedt) qui traduit la violation du principe d'équivalence au sens fort par une théorie métrique.

Des projets spatiaux visant à mesurer γ au niveau 10^{-7} ou 10^{-8} grâce à des tirs lasers sur des satellites dans le Système solaire ont été proposés. Dans le projet Sort (Solar Orbit Relativity Test) deux satellites sur une même orbite héliocentrique passent successivement en occultation derrière le Soleil et la déviation de la lumière par le Soleil est obtenue par la mesure de l'angle entre les deux satellites vus de la Terre, et le retard Shapiro est obtenu grâce à des horloges ultra-stables embarquées et permettant de dater les instants d'arrivées des impulsions laser. Plus récemment le projet Lator (Laser Astrometric Test Of Relativity) a été proposé avec des objectifs comparables. De telles missions devraient aussi contraindre les effets post-newtoniens du second ordre (au-delà de β et γ) et permettre une mesure directe du moment quadrupolaire et du moment cinétique du Soleil.

La motivation principale pour mesurer β et γ à ce niveau est de tester la présence d'un champ scalaire additionnel de longue portée. Il existe une classe de théories tenseur-scalaire qui convergent vers la relativité générale avec l'évolution cosmologique. Les paramètres β et γ dans ces théories varient au cours du temps, et diffèrent très peu de 1 après la longue évolution cosmologique, à un niveau qui pourrait être testé par Sort et Lator. Un projet dédié à une mesure très précise de β et γ avec des satellites connectés au sol (ou à un autre satellite en orbite terrestre) par liens laser, et munis d'horloges ultra-stables, serait très intéressant. Ce projet serait probablement de la classe des missions L de l'ESA. La télémétrie laser est évidemment une technique cruciale pour un tel projet.

Depuis 10 ans a émergé un champ nouveau qui est d'utiliser les éphémérides planétaires (c'est-à-dire l'ajustement global de haute précision des positions des planètes et satellites dans le Système solaire) pour affiner les contraintes sur les modèles alternatifs de gravitation. Cette application a notamment été développée à l'observatoire de Paris avec les éphémérides Inpop. Elle concerne les sciences spatiales car la précision des éphémérides modernes telles qu'Inpop repose en grande partie sur les données de navigation des sondes spatiales comme Cassini et Messenger, avec une part qui ira croissant dans l'avenir. Grâce aux éphémérides le paramètre β du champ du Soleil a déjà été mesuré égal à 1 avec une précision de l'ordre de 10^{-5} soit la meilleure détermination connue.

Ce type de mesure est intéressant aussi car il permet de contraindre β et γ sur plusieurs millions d'années en utilisant des solutions des mouvements planétaires à très long terme. L'influence d'une théorie tenseur-scalaire peut ainsi être testée en prenant en compte l'évolution réaliste de β et γ dans cette théorie. Une synergie avec la cosmologie est à noter car les modèles de gravité modifiée invoqués pour remplacer la matière noire (Mond) sont aussi contraints par les éphémérides planétaires.

Le consortium pour l'utilisation scientifique des données de navigation spatiale (CESDN) est appelé à se développer car les données de navigation des sondes spatiales futures ont vocation à être systématiquement exploitées. Il est important que le statut des données de navigation pour les missions interplanétaires futures du CNES et de l'ESA soit clair avec un accès facilité. Le consortium CESDN a regroupé plusieurs équipes scientifiques pour améliorer l'exploitation scientifique des données de navigation de sondes spatiales. Les éphémérides planétaires Inpop, qui sont la référence pour l'Europe comme le montre le cas de Gaia dont elles sont les éphémérides de référence, reposent en grande partie sur l'exploitation des données de sondes spatiales. Il est donc essentiel que les scientifiques puissent accéder aux données de navigation des missions spatiales. Le rôle joué par les scientifiques français dans l'analyse des données radio-science de Juice est un résultat remarquable de l'activité développée par le consortium.

En 2013, la mission ESA, Juice, d'exploration du système jovien a été sélectionnée en L1 avec un lancement prévu en 2022. Cette sonde embarque notamment une instrumentation de radio-

science, 3GM, qui permet des mesures Doppler (0,002 mm/s à 1 000 s de temps d'intégration) et range (environ 20 cm pendant la phase orbitale autour de Ganymède). Avec une telle précision, des estimations très précises des champs de gravité des satellites joviens et de Jupiter seront possibles de même que des caractérisations détaillées de leurs atmosphères. Cette précision est également très intéressante du point de vue de la mécanique céleste et de la physique fondamentale, et elle appelle une exploitation scientifique spécifique des données de navigation. Le PI de l'instrument, Luciano Iess de l'Université de Rome, a accepté d'intégrer des scientifiques français dans l'équipe scientifique avec l'objectif de coupler le calcul des éphémérides et l'analyse des données de radio-science. Ceci permettra de réajuster les positions héliocentriques de Jupiter et de ses lunes en tenant compte des mesures de radio-science et, ainsi, de ne pas dégrader leur utilisation pour les mesures locales dans le système jovien. De plus, l'exploitation de ces données par les meilleurs experts permettra d'effectuer des tests de la loi de la gravitation aux échelles du Système solaire profond. Le CNES doit soutenir très fortement cette activité sous des formes à définir au mieux.

CESDN a aussi pour but de préparer l'analyse des données de projets futurs dédiés à la physique fondamentale en espace lointain (au-delà de l'orbite de Jupiter) tels qu'Odyssey ou Sagas. La caractéristique de tels projets est l'emport d'un accéléromètre pour analyser avec précision les accélérations non gravitationnelles subies par la sonde. On pourra ainsi lever les incertitudes encore présentes dans les restitutions d'orbites actuelles liées notamment aux propriétés thermiques des sondes (et qui avait donné lieu à la fameuse anomalie Pioneer). Les mesures d'accélérométrie sont complémentaires des mesures de radio-science effectuées sur les sondes et permettent, combinées à elles, d'en déduire l'accélération d'origine purement gravitationnelle de la sonde, donc de mesurer l'écart de trajectoire de la sonde avec la trajectoire prédite par la relativité générale.

Plutôt qu'une sonde spatiale dédiée, une solution très séduisante consiste à placer un instrument scientifique dédié en passager sur des missions interplanétaires visitant les planètes ou lunes du Système solaire lointain (Saturne, Uranus ou Neptune). C'est l'instrument Gap (Gravity Advanced Package) qui est un accéléromètre performant proposé par l'ONERA, avec une sensibilité de l'ordre de 10^{-11} m/s^2.

L'ajout d'un accéléromètre tel que Gap sur une mission interplanétaire permettrait :

- En phase orbitale, d'améliorer considérablement la description du champ de gravité de la planète et de ses satellites ;
- En phase de survol (lors des assistances gravitationnelles), d'avoir une meilleure étude de la dynamique de la sonde et de la planète survolée notamment en vue des éphémérides planétaires ;
- En phase interplanétaire, d'obtenir pour la première fois une caractérisation précise de la dépendance en distance de la loi de la gravitation.

Ces mesures n'interfèrent pas avec les mesures de planétologie, mais sont complémentaires en phase orbitale, avec une meilleure connaissance de la structure interne de la planète obtenue à partir de son champ de gravité, et donc une meilleure identification du scénario de formation du système planétaire.

Le champ de gravitation du Soleil au niveau d'Uranus est de l'ordre de 10^{-6} m/s^2 et pourra être caractérisé par Gap avec une précision relative d'environ 10^{-5}. A ce niveau de précision une modélisation du champ de gravitation produit par la sonde elle-même (typiquement de l'ordre de 10^{-9} m/s^2) est nécessaire.

À noter aussi que l'accélération typique de la Galaxie au voisinage du Soleil est de l'ordre de 10^{-10} m/s^2, ce qui est du même ordre de grandeur que l'accélération Mond et un facteur 10 plus petit que l'anomalie Pioneer, mais qui est un facteur 10 plus grand que l'objectif visé par l'accéléromètre Gap.

Dans le cadre d'appels d'offre de l'ESA (missions M et L), Gap apparaît comme une instrumentation mature pour l'emport sur des missions planétaires vers Saturne, Uranus ou Neptune, avec un fort retour scientifique tant pour la physique fondamentale que pour la dynamique des systèmes de planètes et satellites visités. Faute de perspective à l'ESA pour les missions lointaines, l'emport de Gap est probablement à considérer dans le cadre de missions d'opportunité. La communauté française a une expertise dans ce domaine qui pourrait intéresser les scientifiques et les agences non européennes.

3.3. L'Univers gravitationnel

Les ondes gravitationnelles constituent l'un des piliers fondamentaux de notre compréhension de l'Univers. Leur existence a été indirectement prouvée par l'observation de la décroissance de la période orbitale des pulsars binaires relativistes, ce qui a conduit à des tests précis de la relativité générale. Le réseau de détecteurs au sol (configurations avancées des interféromètres à laser LIGO, VIRGO, etc.) va probablement détecter de façon directe avant la fin de la décennie le rayonnement gravitationnel émis par la coalescence d'objets stellaires

compacts (étoiles à neutrons et peut-être trous noirs). L'objectif des détecteurs dans l'espace comme eLisa est l'observation des ondes gravitationnelles dans une gamme de fréquences basses inaccessibles depuis le sol, entre environ 0,1 mHz et 10 mHz. Dans cette bande de fréquence, les sources d'ondes gravitationnelles attendues sont :

- Des milliers de systèmes binaires évolués dans notre Galaxie, contenant des étoiles compactes. Il sera possible d'étudier la distribution de ces systèmes binaires et d'en déduire les scénarios de leur formation ;
- Des objets compacts stellaires (étoiles à neutrons ou trous noirs) en orbite très relativiste avant d'être capturés par des trous noirs supermassifs galactiques. Les ondes gravitationnelles devraient révéler la nature des populations stellaires au voisinage du trou noir central dans les noyaux de galaxies ;
- La coalescence de trous noirs supermassifs galactiques lors de collisions de galaxies à des distances cosmologiques, même au-delà de l'époque de la ré-ionisation s'ils existent. Les mécanismes de formation des trous noirs dans les noyaux de galaxies, puis leur évolution due à l'accrétion et aux fusions, pourront être étudiés ;

- L'Univers primordial, lors d'une transition de phase du premier ordre survenant à une énergie comprise entre environ 100 GeV et 10 TeV (incluant donc la transition électro-faible vers 250 GeV), ou par l'amplification de fluctuations quantiques du vide par l'inflation dans des scénarios alternatifs tel que le pré-Big-Bang ou un scénario ekpyrotique.

Pour ce qui concerne la physique fondamentale la prospective couvre tous les aspects cosmologiques, avec à terme (mais peut-être seulement pour l'après eLisa) l'observation d'un fond stochastique de rayonnement gravitationnel produit dans l'Univers primordial. Seront aussi possibles avec eLisa des tests du modèle cosmologique Λ-CDM grâce aux coalescences de binaires de trous noirs supermassifs. Celles-ci jouent en effet le rôle de « sirènes standard » (analogues aux chandelles standard de l'astronomie classique), car les ondes gravitationnelles contiennent l'information sur la distance cosmologique de la source, indépendamment de la valeur des masses des deux trous noirs. Combinée à la mesure du redshift si l'on sait déterminer l'amas de galaxies dans lequel a eu lieu la coalescence, cette information donne accès aux paramètres cosmologiques. On peut par exemple tester l'équation d'état de l'énergie noire par cette méthode, et étudier sa variation avec le redshift (de façon complètement indépendante de ce que fera Euclid). Comme les ondes gravitationnelles sont déviées par les champs gravitationnels comme les ondes électromagnétiques, il y aura dans ces mesures un signal de lentillage faible dû aux grandes structures de l'Univers, comme pour les photons du CMB mesurés par Planck.

Le second intérêt pour la physique fondamentale concerne les tests de la physique des trous noirs. Avec les binaires à rapport de masse élevé (EMRIs), où une étoile compacte est en orbite relativiste autour d'un trou noir supermassif, on peut tester le fameux théorème de la calvitie (no-hair theorem) des trous noirs en relativité générale, qui affirme que le trou noir est donné par la solution de Kerr, et est donc décrit simplement par sa masse et son spin, avec tous les moments multipolaires d'ordre plus élevé comme le quadrupole qui s'en déduisent. Tester ce théorème (ce qui n'a jamais été fait jusqu'à présent) consiste donc à placer une contrainte sur un éventuel moment quadrupolaire anormal du trou noir par rapport à Kerr. Les détecteurs tels que eLisa pourront aussi tester le théorème lors de la phase terminale (dite de vibration) des coalescences de trous noirs supermassifs, et même les détecteurs au sol LIGO/VIRGO s'ils observent des trous noirs assez massifs.

Vérifier que le trou central de notre Galaxie est bien un trou noir de Kerr est aussi l'un des enjeux des observations au VLT d'étoiles au voisinage de Sagittarius A* (projet Gravity). Les observatoires X comme Athena et ses successeurs seront en principe aussi capables de tester les propriétés des trous noirs en observant la matière chauffée dans le disque d'accrétion jusqu'à des orbites proches de la dernière orbite circulaire stable. Tous ces tests sont importants car ils pourraient révéler l'existence d'un état nouveau de la matière dense.

Le groupe scientifique Lisa-France s'est mobilisé depuis de nombreuses années sur tous ces aspects et a participé activement à la coopération internationale. L'intérêt scientifique considérable des ondes gravitationnelles pour l'espace a motivé le choix récent du thème « Univers gravitationnel » et de la mission eLisa pour la sélection L3 de l'ESA. Au sein du consortium de la mission eLisa, la France aura la responsabilité du futur centre de traitement des données (DPC), et de l'intégration du senseur inertiel et du banc optique avec les tests de performance au niveau système. Le démonstrateur technologique Lisa-PF sera lancé en 2015 vers le point de Lagrange L1 et permettra de valider la performance du senseur inertiel au niveau requis. La mission eLisa sera principalement basée sur les technologies qui auront été démontrées par Lisa-PF en orbite (les autres technologies pouvant être testées au sol). L'étude de phase 0 du futur centre de Traitement des Données menée conjointement par le CNES et la communauté scientifique s'est conclue avec succès. Le groupe recommande de poursuivre la même démarche avec une phase 0 pour analyser la

contribution française relative aux études système de la charge utile d'eLisa, en liaison avec l'intégration.

Des missions spatiales comme Core et Prism sont proposées pour observer la polarisation du fond diffus cosmologique (CMB) et notamment mesurer l'amplitude du mode B de polarisation qui n'a jamais pour l'instant été détecté. Cela nécessite une très bonne sensibilité et passe par la soustraction d'avant plans, avant tout galactiques. Un deuxième objectif très important est l'extraction de la carte du champ du lentillage faible agissant sur les fluctuations du fond cosmique et qui a déjà été détectée par Planck. L'observation du mode B constituerait la vérification d'une des prédictions les plus importantes de l'inflation et permettrait ainsi d'aborder par une voie sans doute unique la physique aux échelles d'énergie proches de l'énergie de Planck. Le mode B est une signature unique des ondes gravitationnelles primordiales émises lors de l'inflation. Les projets de satellite de 4ème génération (après Cobe, WMAP et Planck) pour l'étude de la polarisation du CMB, notamment pour la détection du mode B, sont d'une importance cruciale pour la cosmologie et pour la physique fondamentale.

CONCLUSIONS

Le groupe de Physique Fondamentale a établi ses priorités scientifiques :

1. eLisa (dans le cadre de la mission L3) pour l'observation du rayonnement gravitationnel dans une gamme de fréquences inaccessibles depuis le sol ;
2. STE-Quest (en vue de la sélection M4) pour un test du principe d'équivalence par interférométrie atomique au niveau 10^{-15} et des comparaisons d'horloges sol sur des distances intercontinentales ;
3. Gap pour la mesure du champ gravitationnel du Soleil et des planètes avec une précision de 10^{-11} m/s^2 grâce à un accéléromètre embarqué sur une mission interplanétaire d'opportunité.

De plus, le groupe recommande :

1. Une phase 0 pour l'étude système de la charge utile d'eLisa en liaison avec la mise en place future de l'intégration ;
2. La poursuite des développements R&T dans le domaine de l'interférométrie atomique pour l'espace (Ice) et des liens optiques ;
3. Une étude de faisabilité pour l'emport d'horloges optiques sous ballon pour les tests du redshift gravitationnel et des applications en géodésie relativiste.

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE EXOBIOLOGIE

L'exobiologie s'intéresse à la recherche des origines de la vie sur Terre ou ailleurs et aux processus impliqués dans le passage d'une chimie simple à des systèmes organisés. La communauté exobiologique étudie donc les conditions physico-chimiques favorables à l'émergence de la vie ou au développement d'êtres vivants dans des environnements planétaires variés. Cette recherche, éminemment interdisciplinaire, est essentiellement centrée sur la détection de traces laissées par des systèmes vivants carbonés se développant dans un milieu aqueux. L'exobiologie partage ainsi, avec d'autres disciplines comme la planétologie ou l'astronomie, des questionnements sur les interactions entre l'eau, les matières organiques et les phases solides, dans les corps célestes ou dans le milieu interstellaire. L'exobiologie contribue ainsi à contextualiser ou à globaliser le concept interdisciplinaire de l'habitabilité. Enfin, l'exobiologie a aussi une mission culturelle et éducative.

Les notations « R. # » insérées dans le texte de bilan font référence aux recommandations du séminaire de Biarritz de 2009.

Les recommandations 2014 sont numérotées par ordre de priorité.

1. CONTEXTE

1.1. Contexte scientifique

L'exobiologie étant par essence une thématique interdisciplinaire, les missions spatiales concernées par ce domaine sont de nature très diverses : exploration planétaire et des petits corps, missions orbitales, vols paraboliques... Actuellement, la priorité des exobiologistes porte sur la poursuite et l'achèvement de la mission d'exobiologie ExoMars. D'autre part, l'exploration martienne et des environnements planétaires, associée aux connaissances acquises lors de simulations ou de modélisation rendent évidente la nécessité d'un futur retour d'échantillons de Mars ou d'autres corps célestes (astéroïdes, comètes...) pour la recherche de traces de vie ou de molécules organiques pré-biotiques.

De même, la compréhension des processus de synthèse et d'évolution de la matière organique dans les milieux interplanétaires ou interstellaires avant leur incorporation au sein d'environnements planétaires est essentielle pour l'exobiologie. Les expériences d'exposition de composés organiques aux radiations solaires à bord de la Station Spatiale Internationale s'orientent vers des protocoles combinant la préparation extemporanée d'échantillons avec une analyse *in situ* en continu des processus de transformation.

La communauté marque aussi son intérêt pour la mission planétaire Juice, ainsi que pour la mission Plato et les projets futurs liés à la caractérisation des atmosphères d'exoplanètes.

1.2. Contexte national et international

Le séminaire de prospective de Biarritz avait émis treize recommandations (R. #1 à #13).

Dès son lancement en 2007, le programme interdisciplinaire du CNRS OPV « Origine des Planètes et de la Vie », a été soutenu par une contribution financière annuelle récurrente du CNES (R. #1, #3, #6, et #8). Ce soutien financier du CNES a été reconduit en 2010 sur les deux dernières années du programme EPOV « Environnements Planétaires et Origine de la Vie ». Cet effort a permis de financer les recherches interdisciplinaires de nombreux laboratoires et la tenue de plusieurs colloques et ateliers de travail. De 2009 à 2013, le CNES a également soutenu l'animation d'ateliers interdisciplinaires sur : « l'environnement de la Terre Primitive », «les molécules interstellaires et les molécules pré-biotiques», « la chiralité dans l'Univers », « la photochimie en orbite », « l'Équation de Drake », « l'évolution de la matière organique dans les milieux interplanétaire et interstellaire », « la trappe orbitale » et « les analogues pour l'exobiologie ».

Dans le cadre du prolongement de la Mission Cassini-Huygens jusqu'en 2017, le CNES a poursuivi son soutien aux activités d'Inter-Disciplinary Scientist (IDS) et aux développements des moyens de calibration correspondants (synthèses de produits de référence, simulations...) (R. #2). L'évolution et le renouvellement des IDS et des participating scientists de la mission sont directement gérés par la NASA, en concertation avec l'ESA.

La complémentarité des expériences d'exposition en orbite et des expériences menées au sol en laboratoire ou au synchrotron a été analysée et s'est traduite par des collaborations nouvelles ou renforcées. Les expériences de simulation qui participent à l'analyse de certains résultats acquis avec des sondes spatiales (Cassini) ou des observatoires (Herschel) ont été poursuivies (R. #11).

La préparation de l'interprétation des résultats de la mission Rosetta est essentiellement menée par les laboratoires de planétologie (R. #4). Une attention particulière a été cependant portée à la préparation de l'interprétation des résultats des analyses de la matière organique par le spectromètre de masse Cosima (cofinancement d'une thèse et des travaux associés). L'arrivée de la sonde au voisinage de la comète et les premières analyses se dérouleront à l'automne 2014. Des équipes ayant développé des simulations sol sont co-investigateurs de Cosima et contribueront aux analyses et à leurs interprétations.

Dans la suite de l'expérimentation Expose-E, les expériences françaises pour Expose R et R2 sont soutenues (R. #5). D'importantes améliorations techniques et scientifiques ont été apportées au matériel utilisé et aux démarches scientifiques proposées. Les échantillons testés en vol ont été adaptés pour la nouvelle mission, à la lumière des résultats d'Expose-E, de nouvelles expériences ont été associées (Biopuce, cellules « martiennes », collaboration avec l'Université de Leyden).

La mission ExoMars de l'Agence Spatiale Européenne a eu une évolution programmatique chaotique. Elle se compose maintenant de deux missions (2016 et 2018) et de cinq objets (TGO 2016, EDM 2016, Cruise bus 2018, Véhicule de surface 2018 et plateforme de surface 2018) (Fig. 1). La coopération avec la Russie qui prend des responsabilités programmatiques, techniques et scientifiques importantes commence à se concrétiser et à se traduire dans les coopérations scientifiques et les partenariats techniques. Le développement des instruments ou des participations instrumentales françaises suivent le calendrier du projet ESA et les instruments ont atteint la maturité technique requise (R. #12). Les instruments sont prêts à entamer les phases de conception détaillée et de fabrication.

La communauté scientifique tant en planétologie qu'en exobiologie, entraînée par les réussites de la mission MSL et forte des acquis de la préparation de la mission ExoMars, est très enthousiasmée par la mission Mars 2020 de la NASA. De nombreux laboratoires se sont déclarés prêts à y revendiquer (R. #9 et # 13) une place significative proposant des instruments en tant que principal investigateur ou co-investigateur.

Les études pour l'amélioration d'instruments existants (chromatographie gazeuse), le développement de nouveaux instruments innovants (R. #13) comme la spectrométrie de masse haute résolution (basée sur la trappe orbitale), la résonance paramagnétique électronique (RPE), ou l'utilisation des bio-puces sont également soutenus par les programmes R&T du CNES.

Fig. 1 : Architecture de la mission ExoMars : Mission 2016 avec le Trace Gas Orbiter (TGO) et le démonstrateur d'atterrissage (EDM). Mission 2018 avec Le module de croisière (CM), le module de descente contenant la plateforme d'atterrissage et le véhicule (Rover).

2. BILAN DEPUIS BIARRITZ

2.1. Résultats scientifiques marquants

2.1.1. Titan et la mission Cassini-Huygens : résultats d'intérêt exobiologique

Grâce à la mission Cassini-Huygens, il a été montré que Titan est le seul satellite du Système solaire ayant une atmosphère dense de N_2 avec quelques pourcents de CH_4. Titan est une planète en pleine évolution physique et chimique, possédant en surface des réservoirs de méthane et d'éthane liquides (Fig. 2) dont le cycle est analogue à celui de l'eau sur Terre (précipitation, évaporation, ruissellement...). Sa surface est façonnée par des processus d'érosion éolienne et fluviale et le cryo-volcanisme. Titan abrite également une chimie organique active impliquant plusieurs composés-clés de la chimie pré-biotique. Les instruments GC-MS et ACP de la sonde Huygens ont montré que la matière organique complexe dans la basse atmosphère est principalement concentrée dans les aérosols atmosphériques. Les instruments INMS et CAPS de l'orbiteur Cassini ont mis en évidence la formation dans l'ionosphère de composés organiques de très haut poids moléculaire, qui alimentent les zones plus basses. Une fois en contact avec la glace d'eau ou même l'eau liquide qui peut s'y trouver de façon épisodique, ces composés peuvent évoluer ultérieurement, et former des composés d'intérêt exobiologique, y compris dans l'hypothétique océan interne de Titan. Enfin, malgré les basses températures de surface, Titan pourrait remplir les critères d'habitabilité, tous les ingrédients nécessaires à l'apparition d'une vie carbonée étant présents. Certains exobiologistes spéculent même sur la présence d'une vie exotique dans les lacs et mers d'hydrocarbures de Titan.

La communauté française s'est largement impliquée au cours des dernières années dans l'étude expérimentale des processus permettant d'expliquer la chimie organique de l'atmosphère et de la surface de Titan et traiter au mieux les données de la sonde Cassini. On peut citer : (i) le programme Set-Up (LISA), qui étudie simultanément les processus photoniques et électroniques initiaux impliqués dans l'ionosphère et la chimie atmosphérique de Titan ; (ii) l'établissement de bases de données (principalement infrarouge et UV) indispensables pour le traitement des données des instruments de Cassini, en particulier Cirs, Vims et Uvis ; et enfin (iii) les programmes Pampre (LATMOS) et Plasma (LISA) qui étudient les propriétés des aérosols de Titan à partir d'analogues de laboratoire (tholins). Ces études portent en particulier sur la composition chimique de ces analogues, leurs propriétés physico-chimiques (solubilité dans des solvants cryogéniques, propriétés optiques) et leurs possibilités d'évolution en présence de milieu eau-ammoniac (modèles du

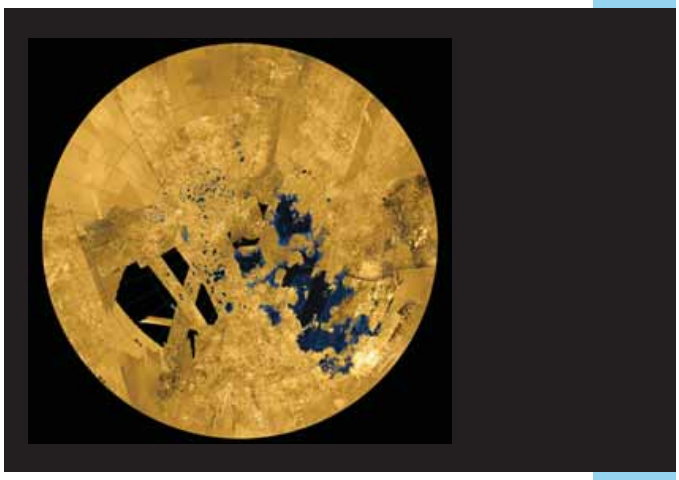


Fig. 2 : En bleu la signature radar des lacs et mers de méthane et d'éthane au pôle sud de Titan ; en noir les zones non cartographiées (mission Cassini-Huygens – NASA-JPL-USGS)

cryomagma de Titan). Elles ont mis en évidence la présence possible de nombreux composés d'intérêt biologiques, acides aminés et bases azotées, à la surface de Titan. Les aspects exobiologiques de la mission par la synergie des approches observationnelles (données de Cassini-Huygens), des modèles et des expériences en laboratoire, ainsi que ceux impliquant la protection planétaire ont aussi été étudiés.

2.1.2. Matière organique d'intérêt exobiologique : synthèse et mécanismes

De nombreux résultats ont été obtenus au niveau d'études en laboratoire intéressant l'exobiologie en assistance aux missions en cours (Rosetta, Cassini, Herschel) ou en préparation de futures missions (ExoMars, Vitrine).

À partir d'un mélange H_2O : CH_3OH : NH_3, l'irradiation en lumière polarisée ultraviolette a montré la formation préférentielle d'un énantiomère d'un acide aminé, l'alanine, avec un excès énantiomérique de quelques pourcents (Fig. 3). Ce résultat indique une origine possible d'excès énantiomériques observés dans les météorites. Amenés sur la Terre primitive par la chute des météorites, ces acides aminés ont pu, par des phénomènes d'enrichissements énantiosélectifs, conduire aux composés homochiraux considérés comme nécessaires à l'apparition de la vie. De même, sous irradiation UV, l'hydantoïne, une espèce suspectée de jouer un rôle important dans la formation de poly- et oligopeptides, a été détectée. Vingt acides aminés et six acides diaminés ont été identifiés après irradiation dans ces glaces simulées du milieu interstellaire. L'analyse des spectres du résidu contient un grand nombre de molécules formées des éléments CHNO,

Fig. 3 : Chiral MicMoc - Montage expérimental au synchrotron SOLEIL

Fig. 4 : Expose R à l'extérieur du module russe Zarya de la la Station Spatiale Internationale (crédit ESA)

incluant des entités de plus de 4 000 daltons. Au réchauffement, l'hexaméthylènetétramine (HMT), a été identifiée comme un des composants importants du résidu réfractaire (programme Oregoc). Ces expériences en laboratoire se sont ainsi révélées être un outil déterminant pour la compréhension de l'évolution chimique de la matière organique abiotique complexe dans les milieux astrophysiques.

2.1.3. Expériences d'exposition de composés organiques en orbite basse terrestre

Au cours des dernières années, pour étudier l'évolution de la matière organique dans le cosmos sous le rayonnement UV solaire et compléter les travaux « classiques » de photochimie en laboratoire, plusieurs expériences d'astrochimie et exobiologie pilotées par le LISA se sont déroulées en orbite, soit sur la capsule russe Foton, soit sur la Station Spatiale Internationale (Fig. 4). Une nouvelle expérience, PSS, partira à destination de la Station Spatiale Internationale en Juillet 2014. La section efficace de destruction de plusieurs espèces d'intérêt exobiologique a ainsi été déterminée et comparée aux mesures en laboratoire. Les méthodes d'extrapolation aux environnements extraterrestres des mesures de laboratoire (réalisées par l'exposition à des lampes de différentes gammes spectrales) conduisent ainsi à une sous-estimation de plusieurs ordres de grandeur de la section efficace de destruction des espèces dans l'espace interplanétaire, par rapport aux valeurs déterminées grâce à leur exposition en orbite basse.

D'autres expériences d'exposition sont programmées avec des échantillons organiques et minéraux types représentatifs des comètes, de Mars et de l'atmosphère de Titan ou en lien avec les missions Rosetta, Curiosity et Cassini-Huygens. La stabilité au cours d'un vol spatial de capteurs de type Biopuce candidat sur Mars 2020 sera aussi évaluée.

2.1.4. Caractérisation de la matière organique extraterrestre

Les études menées autour de la synthèse et de la caractérisation de la matière organique (MO) soluble et insoluble servent à préparer les méthodes, les séquences et les instruments qui seront utilisés ou développés dans les missions spatiales futures. Ces études sont aussi indispensables pour conforter les modèles et déterminer les performances à atteindre pour confirmer les hypothèses scientifiques initiales.

Plusieurs types de MO ont été caractérisés pour répondre à différentes questions scientifiques. Le carbone des chondrites carbonées est essentiellement sous forme de MO majoritairement insoluble. Cette MO suscite un grand intérêt en exobiologie car elle pourrait constituer un précurseur pour les premières formes de vie. Il est important d'en connaître précisément la structure et le mécanisme de formation. Une combinaison d'approches analytiques incluant des méthodes spectroscopiques, des dégradations thermiques et chimiques, des observations en microscopie électronique à haute résolution et des mesures isotopiques sur composés individuels a été mise en œuvre pour proposer un modèle de structure moléculaire et un mécanisme de formation pour cette MO insoluble. Si le mécanisme d'incorporation de deutérium a été validé expérimentalement, il reste à valider le mécanisme de l'organosynthèse. L'étude de la MO insoluble d'une chondrite à enstatite a révélé des différences dans sa structure chimique par rapport aux chondrites carbonées peu métamorphisées principalement en raison de son altération thermique.

L'analyse et l'imagerie de la MO dans les roches anciennes (archéennes) et dans les météorites par résonance paramagnétique électronique (RPE) ont validé l'intérêt de cette technique pour l'exobiologie.

2.1.5. Progra2 en exobiologie

Progra2 (Propriétés Optiques des GRAins Astronomiques et Atmosphériques), porté par le LPC2E et le LATMOS, est dédié à l'étude de la matière organique dans divers objets du Système solaire (planètes et satellites et leurs atmosphères, petits corps). Les propriétés optiques de particules solides carbonées (produits expérimentaux ou broyats d'échantillons extraterrestres) sont obtenues pendant leur lévitation avec une orientation aléatoire en micropesanteur lors de vols paraboliques à bord de l'A300 ZéroG (Fig. 5). Ces mesures contribuent à l'interprétation des observations astronomiques des milieux où ces grains carbonés sont présents. Il est ainsi possible de mieux connaître certaines de leurs propriétés physiques (taille, distribution en taille, porosité, indice complexe et composition...).

Plusieurs dizaines de courbes de diffusion ont déjà été obtenues pour différents composés carbonés de compositions chimiques variées, et parfois produits dans des conditions proches de celles attendues pour la nébuleuse primitive. Une étude de la maturation thermique de ces poussières est prévue en pensant plus précisément aux environnements cométaires, dans le cadre de Rosetta. Ces résultats sont utilisés pour interpréter des observations astronomiques de poussières cométaires, d'aérosols de Titan, de poussières interplanétaires... Un instrument dédié à ces études est en cours de développement à l'ESA pour voler sur la Station Spatiale Internationale dans la période 2012-2016 (Icaps).

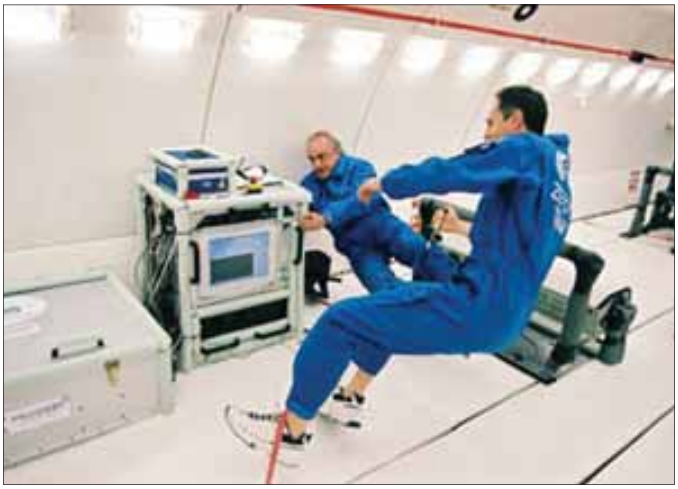


Fig. 5 : L'expérience Progra2 en fonctionnement à bord de l'Airbus A300 ZeroG (crédit ESA)

2.1.6. Contributions à la préparation de missions et d'instruments : développement d'échantillons de calibration

Les activités du groupe Exobiologie en amont des missions concernent principalement les missions martiennes et surtout ExoMars, Mars 2020, Mars Sample Return (MSR), mais sont aussi pertinentes pour la mission MSL ainsi que diverses missions *in situ* (Rosetta, Lune, astéroïdes, etc.).

L'objectif d'ExoMars étant la recherche de traces de vie, les conditions de l'habitabilité microbienne de Mars ont été étudiées et les objectifs scientifiques pour l'étude de vie sur Mars ont été réévalués par le MEPAG. Le groupe Exobiologie a été fortement impliqué dans les groupes de travail ESA /NASA en préparation des missions futures et du retour d'échantillons martiens (MSR).

Fig. 6 : Barberton (Afrique du sud) lieu de prélèvement de roches analogues aux roches martiennes pour la constitution de la lithothèque Isar.

Une lithothèque (Isar, International Space Analogue Rockstore) constituée d'analogues naturels ou artificiels (roches et minéraux) de matériaux martiens a été construite au CBM (Orléans) avec l'objectif de tester et calibrer les instruments d'une charge utile pour mieux interpréter les données obtenues lors d'une mission dédiée à l'exobiologie comme ExoMars (Fig. 6). Isar est associé à une base de données qui référence l'ensemble des caractéristiques structurales, texturales, géochimiques et géotechniques des échantillons. Quelques échantillons ont en particulier été utilisés dans un test en aveugle pour évaluer la complémentarité des données fournies par les instruments d'ExoMars (par ex. : argiles, basaltes, évaporites...)

Des échantillons organiques tels que ceux utilisés pour la calibration des expériences de Cassini-Huygens (voir ci-dessus) sont également développés pour d'autres applications, en particulier pour Rosetta. Le groupe Exobiologie participe à la préparation de l'exploitation de cette mission, en particulier via l'analyseur de poussières Cosima.

2.2. Programmatique

Le programme ExoMars est le point qui a préoccupé le plus la communauté des exobiologistes. Le programme a été profondément modifié à deux reprises. La nouvelle configuration se traduit par la division du programme en deux missions, un changement des dates de lancement, une reconfiguration de la charge utile, des changements d'interfaces. Le CNES a suivi avec attention les activités de l'ESA et a accompagné les cinq équipes scientifiques françaises impliquées (R. #13). L'accord entre l'ESA et Roscosmos a été signé en 2013 et les lancements sont maintenant prévus en 2016 et 2018.

Les activités de protection planétaires sont placées sous l'égide de l'ESA. La France participe au Planetary Protection Working Group de l'ESA et est observatrice au NASA Planetary Protection Sub-Committee (R. #8). Pays de lancement potentiel (utilisation d'Ariane 5 ou de Soyouz à partir de Kourou), la France devra s'assurer du respect des règles internationales (en ce qui nous concerne : les recommandations pour la protection planétaire). Le CNES aura vis-à-vis de l'état français un rôle de certification du lancement. Ce rôle justifie la poursuite de la participation du CNES aux forums internationaux qui traitent de ces questions.

3. PROPOSITIONS PROGRAMMATIQUES

Les propositions ci-dessous sont construites en particulier à partir des réponses à l'appel à idées émis par le CNES et par l'analyse qui en a été faite par le groupe de travail Exobiologie. Quatre ateliers ont été organisés à l'initiative du groupe de travail pour préparer le séminaire de prospective scientifique : la photochimie en orbite, évolution de la matière organique dans les milieux interplanétaire et interstellaire, la trappe orbitale (avec des contributions du groupe Système solaire), les analogues pour l'exobiologie.

3.1. Projets prioritaires dans le cadre ESA

3.1.1. ExoMars

Fig. 7 : Modèle de rover d'ExoMars en test dans le désert d'Atacama (Chili), portant les instruments CLUPI, WISDOM et PANCAM

Recommandation #1 : réussir ExoMars 2016-2018 dans sa nouvelle configuration.

Le programme ExoMars est mené dans le cadre du programme optionnel d'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. C'est d'abord une mission technologique pour démonter les capacités de l'Europe à se poser, se déplacer et à analyser des roches à la surface de Mars (Fig. 7). 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 Russie 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.

3.1.2. Juice

Un des objectifs prioritaire de la mission Juice ((JUpiter ICy moon Explorer - lancement prévu 2022) est d'étudier l'émergence de planètes habitables dans le Système solaire. Il s'intéressera principalement à Ganymède, Callisto et Europa. Leurs survols apporteront des informations sur la structure de ces satellites, qui confirmeront ou infirmeront les hypothèses issues des modèles. La texture des surfaces de ces satellites est probablement déterminée par les activités tectoniques et la présence d'océans sous glaciaires perchés ou au contraire en contact direct avec le manteau rocheux. L'identification des conditions physico-chimiques qui règnent au sein des océans de ces satellites aura une influence importante sur la notion d'habitabilité et pourra servir de modèle pour certaines planètes extrasolaires. La mission pourra de plus analyser la composition des poussières en orbite.

Recommandation #5 : soutenir les communautés d'exobiologie et de planétologie fortement investies dans les missions Cassini-Huygens et Rosetta jusqu'à la fin des opérations. Encourager des équipes scientifiques à préparer les futures missions planétaires d'exploration d'intérêt exobiologique vers les systèmes de Jupiter et de Saturne (Juice et TSSM...).

3.1.3. Exoplanètes : Cheops, JWST, Plato

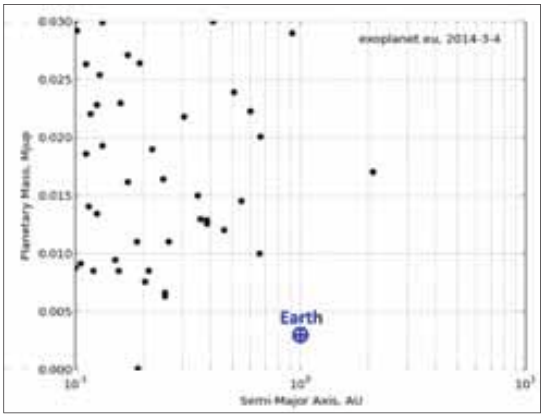


Fig. 8 : Répartition des planètes extrasolaires de 0 à 10 masses terrestres (env. : 0,030 MJup) ayant un demi grand axe compris entre 0,1 et 10 UA (Données Exoplanetes.eu au 24/03/2014).

L'exobiologie s'intéresse à la diversité des conditions physico-chimiques dans lesquelles une vie pourrait a priori émerger et se développer à la surface d'exoplanètes présentes dans la « zone habitable » (Fig. 8). Des méthodes spectroscopiques pourront à terme caractériser la composition de l'atmosphère de ces exoplanètes. Les missions Cheops et Plato identifieront des exoplanètes en transit devant des étoiles brillantes. L'observatoire spatial infrarouge JWST et les observatoires au sol type ELT amélioreront les spectres qui caractérisent l'atmosphère des exoplanètes. La spectro-photométrie des atmosphères en émission et/ou en réflexion demandent une maturation technologique (missions de type L), mais seront prometteuses pour l'exobiologie (Darwin, Terrestrial Planet Finder, Spices...).

3.2. Propositions prioritaires de missions multilatérales

3.2.1. Retour d'échantillons (Mars, Phobos, Lune)

Malgré l'échec de Phobos-Grunt en 2011, mission à laquelle plusieurs équipes françaises participaient, le retour d'échantillons martiens (MSR) reste une priorité pour l'exobiologie et la planétologie, malgré toutes les difficultés techniques d'une telle mission. Pour valider certaines hypothèses sur l'évolution géochimique ou biochimique de la planète, il est nécessaire de disposer d'une série d'échantillons diversifiés de sols, de roches et d'atmosphère de Mars. Envisagée successivement sur 2005-2008, puis sur le créneau 2015-2020, la programmation de MSR semble aujourd'hui repoussée à l'horizon 2030. La collecte raisonnée, le conditionnement *in situ* ou la conservation des échantillons pendant leur transport et sur Terre sont des étapes à franchir pour le succès d'une telle mission, dans l'optique des objectifs scientifiques visés. Les véhicules Mer et MSL ont clairement démontré la possibilité de réaliser des analyses *in situ* de plus en plus pointues. Cependant, les charges utiles des véhicules en opération ou qui sont envisagés pour les prochaines années (ExoMars 2018, Mars 2020) demeurent limitées. La variété, la précision, la sensibilité des analyses réalisables *ex situ* (i.e. dans les laboratoires terrestres) seront toujours largement supérieures à celles des instruments embarqués. Les analyses *in situ* demeurent cependant indispensables pour effectuer la collecte raisonnée et suffisamment variée d'une faible quantité d'échantillons (~1 kg) à rapporter sur Terre. La mission Mars 2020 de la NASA inaugurera probablement la première phase de collecte et de mise en réserve (caching) d'échantillons. Les missions complémentaires pour les rapatrier éventuellement sur Terre sont encore à concevoir et financer.

Des missions « plus modestes » de retour d'échantillons de Phobos (PhootPrint, 2022, hors programme obligatoire) ou de la Lune pourraient aussi constituer des étapes intermédiaires destinées à valider les protocoles de collecte, de conservation et d'analyse d'échantillons potentiellement fragiles (riches en substances volatiles, minéraux hydratés…).

3.3. Missions d'opportunité à mettre en avant

3.3.1. Mars 2020

La communauté exobiologique française structurée autour de la mission ExoMars est prête à participer à un bon niveau à la mission NASA Mars 2020. Dans le contexte programmatique chaotique d'ExoMars, cette participation est importante, en particulier car Mars 2020 constitue potentiellement une première étape au retour d'échantillons. La communauté exobiologique souhaite pouvoir participer à la réflexion sur la sélection du (ou des) sites d'atterrissage et de potentiel retour d'échantillons.

3.3.2. Missions de retour d'échantillons de corps primitifs (Hayabusa-2, Osiris-Rex)

La communauté exobiologique française regrette que la mission européenne Marco Polo-R de retour d'échantillons d'un astéroïde carboné exceptionnel n'ait pas été sélectionnée dans le cadre de Cosmic Vision M3. Le retour d'échantillons d'astéroïdes primitifs pourra être envisagé dans le cadre de deux missions d'opportunité : Hayabusa-2 (JAXA, lancement décembre 2014 – retour 2020) et Osiris-Rex (NASA, lancement septembre 2016 – retour 2023). Un instrument français (MicrOmega) sera présent sur Hayabusa-2. Des co-Investigateurs scientifiques français participent à Osiris-Rex.

Recommandation #3 : préparer les missions de retour d'échantillons martiens et de petits corps primitifs du Système solaire. Cela impose de participer à bon niveau au programme facultatif ESA MREP-2 (Mars Robotic Exploration Preparation Programme). Il est aussi indispensable de contribuer aux missions d'opportunité vers Mars (Mars 2020) ou vers des petits corps (Phootprint, Hayabusa-2, Osiris-Rex…). Contribuer à la définition des sites d'atterrissage appropriés et optimaux.

3.3.3. Missions de caractérisation des exoplanètes

Cheops et Plato fourniront un catalogue de cibles de premier choix pour la caractérisation par spectroscopie des transits (spectres d'absorption) et des éclipses (spectres d'émission). Il sera alors important de pouvoir participer à une éventuelle mission qui aurait pour objectif de caractériser les atmosphères de ces planètes dans l'infrarouge (équivalent « Finesse ») ou dans l'UV. Avec Spitzer et HST, les équipes des laboratoires français ont montré qu'elles avaient toutes les compétences nécessaires pour participer à ce type de programme scientifique.

3.4. Exploitations à poursuivre de manière prioritaire

(Voir recommandation #5 de 2014, déjà citée ci-dessus).

3.4.1. Cassini et sa suite IDS

Le programme InterDisciplinary Scientist Titan's chemistry & Exobiology de la mission Cassini-Huygens va s'étendre jusqu'à la fin de la mission, fin 2017. Dans ce cadre, il est prévu de développer les études des tholins, largement entamées au cours des dernières années, avec deux directions principales : leur caractérisation physico-chimique et l'étude de leur évolution dans des conditions plausibles de la surface de Titan. Ce programme inclut aussi la participation aux sessions du Cassini PSG (sessions plénières et Executive sessions), et l'animation du Titan Working Group, pour les aspects scientifiques.

3.4.2. Rosetta

La caractérisation *in situ* de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko par la mission Rosetta fournira des informations cruciales pour l'exobiologie en termes d'apport potentiel de matière pré-biotique par les comètes. Il est important de soutenir la participation à ces analyses à partir de l'automne 2014.

4. PHASES 0/A À DÉMARRER

4.1. Vitrine

Un atelier a été organisé autour de l'exposition de composés organiques directement au flux lumineux du Soleil. Les moyens de reproduire ces expériences au sol, soit avec des lampes de laboratoire, soit au synchrotron, ont été abondamment discutés. Il n'est pas possible de reproduire fidèlement et exhaustivement en laboratoire le spectre solaire. Les expériences de laboratoires doivent cependant impérativement précéder une éventuelle expérience spatiale. Les expériences qui pourront être menées dans l'avenir devront obligatoirement assurer des mesures *in situ* par opposition aux analyses avant/après qui sont pratiquées actuellement dans les expériences Expose. Il est nécessaire d'achever une phase 0/A pour l'instrument Vitrine en l'envisageant comme une « facilité » à l'extérieur de la Station Spatiale Internationale (en prenant en compte l'hypothèse de sa prolongation à 2024) ou sous forme d'expériences simplifiées à bord de nano-satellites dédiés.

Recommandation #9 : poursuivre le soutien aux expériences d'exposition en orbite sur la Station Spatiale Internationale et en laboratoire pour l'étude des processus de synthèse abiotique et d'évolution de la matière organique sous irradiation. Étudier les possibilités offertes par les nano-satellites.

4.2. Trappe orbitale martienne

L'exploration de Mars pendant les années 2020 et 2030 reste une priorité de la communauté avec en ligne de mire le retour d'échantillons martiens à un horizon encore incertain. L'exploration se poursuivra dans des sites de mieux en mieux caractérisés à partir d'observations orbitales. Cependant, pour être bien choisis, les échantillons devront être partiellement caractérisés lors de leur collecte. Dans ce scénario, la spectrométrie de masse à haute résolution (trappe orbitale) à appliquer *in situ* est un atout français à valoriser rapidement en Europe et au-delà. En se fondant sur les études menées au cours des dernières années en R&T, il faudrait rapidement se fixer comme objectif le développement d'une phase d'étude pour déterminer les actions à mener pour que cet instrument atteigne une maturité suffisante afin de candidater sur la charge utile des prochaines missions.

Recommandation #4 : poursuivre et accélérer la spatialisation de la spectrométrie de masse à haute résolution (trappe orbitale)

4.3. Autres instruments (RPE, HPLC, Lithospace…)

D'autres instruments sont en cours d'étude en R&T (voir paragraphe 5) et devraient dans les 5 prochaines années être proposés pour des phases 0 instrumentales afin d'en définir les contours techniques et budgétaires une fois les points durs identifiés et en voie de résolution.

Recommandation #6 : poursuivre les études sur la spatialisation de moyens d'analyse *in situ* comme la résonance paramagnétique-électronique (RPE) et la chromatographie en phase liquide (HPLC) ainsi que de techniques de préparation d'échantillons *in situ* (Lithospace).

5. GRANDS AXES DE R&T ; PROPOSITIONS DE DÉMONSTRATEURS

5.1. Spectrométrie de masse haute résolution, trappe orbitale

Sept réponses à l'appel à idées proposent des applications différentes de la spectrométrie de masse haute résolution basée sur un « cœur » de trappe ionique de type trappe orbitale (Fig. 9). Un atelier a mis en lumière l'approche différenciée nécessaire pour le développement d'instruments spatiaux en fonction des objectifs analytiques et de l'environnement spatial envisagé (Mars, Titan…). Les actions entreprises actuellement par le consortium français sur la trappe orbitale sont centrées autour de la trappe ionique, de son système d'alimentation en haute tension, du système de mesure et d'acquisition de données. Ce cœur est essentiellement commun aux différentes applications spatiales envisagées.

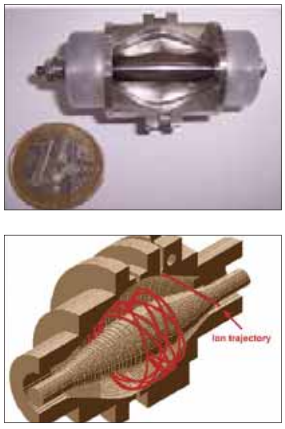


Fig. 9 : Trappe ionique cœur des spectromètres de masse haute résolution (A. Makarov, Anal. Chem., 2 000).

La conception et la fabrication d'un instrument nécessiteront des coopérations internationales. Les usages de laboratoires et les premiers travaux de R&T ont démontré l'intérêt scientifique des performances actuellement atteignables. La haute résolution (> 100 000) sur une large plage de masse moléculaire fera franchir à l'analyse *in situ* un pas qualitatif significatif tant en planétologie (analyse des minéraux et des isotopes) qu'en exobiologie (analyse de la matière organique et des isotopomères). La résolution visée (100 000 à la masse 400) génèrera des quantités de données très importantes. D'ores et déjà, anticipant les missions spatiales envisageables, il serait nécessaire de travailler sur les algorithmes de réduction des données spectrales obtenues sans perte de l'information.

L'intérêt d'une large communauté en France, s'intéressant aux petits corps, à Titan, et à Mars, justifie la préparation d'instruments de ce type en coopération européenne ou internationale. D'autres communautés pourraient être concernées par les capacités de cet instrument. Le développement d'un modèle compact et opérationnel de trappe orbitale pour des études de la haute atmosphère sous ballon, sera un pas significatif vers une démonstration des capacités de spatialisation d'un tel instrument. L'avance acquise grâce à la coopération étroite avec l'industriel ne sera conservée que si l'effort est maintenu et développé dans les prochaines années.

5.2. Résonance Paramagnétique Electronique (RPE)

Le prototype d'un spectromètre RPE basse fréquence (250 MHz) ultra léger, spatialisable et adapté à la recherche et à la caractérisation *in situ* non invasive de carbone fossile dans les roches sédimentaires est en cours de développement. La partie radiofréquence (génération-détection) et le résonateur sont déjà manufacturés. La partie magnétique, l'interfaçage et le pilotage sont en cours d'achèvement. Si ce prototype (~4 kg) donne des résultats intéressants, une deuxième version plus adaptée à la spatialisation pour une mission martienne sera développée.

5.3. Spatialisation de la chromatographie liquide

La Chromatographie Liquide à Haute Performance (HPLC) est un moyen très classique de séparation et d'identification des molécules polaires organiques dans les laboratoires de biochimie et de biologie. Elle est particulièrement adaptée à l'analyse de la matière organique qui est présente sur les petits corps du Système solaire et éventuellement dans les sédiments martiens. Les premières études de conception et de spatialisation pour un usage à la surface d'un corps planétaire ont débuté et devraient se poursuivre au cours des prochaines années.

5.4. Préparation de prélèvements minéraux (Lithospace)

L'identification des roches et des minéraux par des moyens optiques lors des missions martiennes sera d'autant plus importante que les échantillons à analyser ou à rapporter sur Terre devront être sélectionnés. Les moyens d'observation optiques (Clupi, Pancam) ou d'analyse minérale par spectrométrie (Raman laser spectrometer, MicrOmega, ChemCam) abondent mais les échantillons sont bruts. Au sol, la base des observations géologiques des roches demeure l'observation de lames minces notamment en lumière polarisée. Une équipe se propose d'étudier la possibilité de concevoir un système de litho-lamellage automatique pour fabriquer *in situ* de tels objets et ensuite les observer avec les moyens optiques développés par ailleurs. Les premières activités en R&T devraient définir un cahier des charges fonctionnelles, passer en revue des solutions techniques existantes et identifier les points durs techniques. Un tel instrument pourrait être adapté ultérieurement pour l'exploration d'autres corps telluriques ou glacés du Système solaire.

6. PROPOSITIONS D'ACTIONS DE STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTÉ À METTRE EN PLACE EN CONCERTATION AVEC LES AUTRES ORGANISMES

La communauté française en exobiologie s'est structurée dès 1999 en créant le Groupement de Recherche en exobiologie du CNRS avec pour action principale de renforcer les collaborations entre les chercheurs français et sensibiliser les jeunes scientifiques à cette science. À la fin du GDR Exobio en décembre 2008, la communauté a créé la Société Française d'exobiologie (SFE). GDR et SFE ont rempli leur mission en organisant deux colloques et sept ateliers de travail. Une action spécifique a été menée vers les jeunes scientifiques avec les rencontres Exobio pour Doctorants, organisées chaque année depuis 2007, et en 2013 une première conférence nationale organisée pour de jeunes chercheurs en exobiologie.

En parallèle de l'aide pérenne du CNES, les exobiologistes français ont été accompagnés par le programme interdisciplinaire de recherche du CNRS Origines des planètes et de la vie (OPV 2007-2009) suivi par le programme Environnements planétaires et origines de la vie (EPOV 2010-2012) qui avaient comme

objectif de susciter des collaborations nouvelles, d'encourager et d'accompagner des projets novateurs. Ces programmes ont permis de renforcer les échanges entre les communautés existantes en finançant des programmes et en organisant des colloques. Le programme OPV a donné l'impulsion initiale aux travaux autour de la trappe orbitale en fédérant une communauté dépassant largement le cadre de l'exobiologie. Le programme EPOV a aussi contribué au premier congrès International Origins (2011), qui fédérait pour la première fois l'International Society for the Search of the Origin of Life et la commission Bioastronomy de l'International Astronomical Union.

Recommandation #2 : favoriser la création d'un programme scientifique pluridisciplinaire (chimie, astronomie, biologie, géologie, planétologie…) autour des thématiques exobiologiques, par exemple sur des concepts fédérateurs comme l'habitabilité en soulignant aussi les liens avec la protection planétaire.

7. AVIS ET RECOMMANDATIONS DU GROUPE SUR LES QUESTIONS TRANSVERSES

7.1. Aspects trans-groupes

L'exobiologie est par nature extrêmement inter-disciplinaire. Les thèmes qu'elle aborde sont donc naturellement en recouvrement avec celles de plusieurs autres thématiques. Certaines lignes de partage peuvent cependant se dégager car les communautés mobilisées et les approches méthodologiques sont différentes.

- la formation des planètes, petits corps et comètes sont du ressort de la planétologie ainsi que la notion d'habitabilité définie par des grandeurs physiques (modélisées, théorisées ou mesurées)

- l'origine de la vie (chimie dans l'eau), les conditions de maintien des métabolismes, leurs interactions et les traces qu'elles laissent, les bio-signatures ou les bio-marqueurs sont du ressort de l'exobiologie.

- les apports d'eau et de matière organique (d'origine locale ou interplanétaire par les comètes et les météorites grandes et petites) et leur devenir au cours de l'évolution abiotique de la planète sont un domaine partagé avec la planétologie comme la synthèse de matière organique interstellaire est partagée avec l'astronomie.

- la recherche de bio-marqueurs (mesurés) ou de bio-signatures (observées) *in situ* est un point de convergence et de complémentarité entre les deux disciplines qui peuvent avoir recours à des instruments identiques (MS, GCMS, HPLC, Raman, RPE…) ou spécifiques (Bio-puces…). De même la recherche de bio-marqueurs sur des exoplanètes est un point de convergence entre les communautés d'exobiologie, de planétologie et d'astronomie.

Cette répartition pourra être utilisée pour définir les points de convergences entre les communautés scientifiques autour des thèmes de l'habitabilité, des origines de la vie et de sa pérennité.

Recommandation #10 : organiser une réflexion élargie sur les bio-signatures spectroscopiques éventuelles détectables sur des planètes de type terrestre par les télescopes au sol ou en orbite (Hubble, JWST…).

7.2. Laboratoire de curation et de caractérisation

La mission de retour d'échantillons martiens est toujours en toile de fond des programmes des agences spatiales mais son horizon demeure incertain. Les organismes internationaux comme le COSPAR, les agences spatiales (groupe ISECG) et l'Union Européenne conservent cependant des études sur les contraintes qu'impose l'hébergement d'échantillons extraterrestres. Quatre types de laboratoires sont envisagés. Les trois premiers peuvent avoir de sévères contraintes imposées par les exigences de conservation des échantillons et les règles de protection planétaire :

- le laboratoire d'accueil des échantillons lors de leur retour sur Terre. Cette unité est unique et dédiée à l'ouverture du module de rentrée, l'extraction, la classification des échantillons, leur transfert dans des récipients de conservation.

- les laboratoires de caractérisation physico-chimique préliminaire et le cas échéant (échantillons martiens) de recherche de contaminants biologiques d'origine extraterrestre (Biohazard testing).

- les laboratoires de curation des échantillons qui assurent la garde, la conservation et la gestion des échantillons.

- les laboratoires d'analyse scientifique des échantillons qui répondent aux appels à propositions scientifiques et qui ne demandent pas de régime particulier s'il n'y a pas de restriction pour des raisons de protection planétaire.

Hormis le laboratoire d'accueil qui est unique et qui peut être accolé à une des unités de caractérisation, de test ou de curation, toutes les autres unités peuvent être dupliquées et réparties en différents pays. Pour faciliter les transferts d'échantillons et leur analyse sous confinement (pour les protéger ou pour des raisons de protection planétaire), il faut aussi disposer d'un conteneur de transport fiable, hermétique et adapté. C'est autour des unités de type caractérisation et curation que doivent porter les réflexions de la communauté scientifique au sein d'un consortium européen. La gestion d'échantillons de petits corps (pas de contraintes de protection planétaire) sont aussi un moyen d'acquérir une expérience et un savoir-faire qui préparent l'accueil d'échantillons martiens avec de fortes contraintes de protection planétaire.

Recommandation #7 : encourager l'étude et le développement d'une facilité de caractérisation préliminaire et de curation d'échantillons extraterrestres en Europe, englobant non seulement les enjeux scientifiques mais aussi ceux de la protection planétaire. Profiter des contributions aux missions en cours (Hayabusa-2, Osiris-Rex) pour participer aux programmes de curation d'échantillons extraterrestres.

Des actions concrètes comme le développement de banques d'échantillons de référence (Isar et collection d'analogues minéraux et organiques) sont de premiers supports à la mise en place de collaborations préparant ces projets plus ambitieux et fédérateurs.

Recommandation #8 : poursuivre le développement à moyen terme au niveau français ou européen d'une collection d'échantillons de référence et de standards analytiques (analogues naturels ou artificiels de matériaux extraterrestres) et leurs bases de données associées. Contribuer aux travaux internationaux sur l'échantillonnage et la détectabilité de traces de vie diluées dans de petites quantités d'échantillons hétérogènes.

8. ENTRÉES POUR LA PROSPECTIVE BALLONS

La spectrométrie de masse à haute résolution (trappe orbitale) est prometteuse pour, entre autres, l'analyse des poussières et des atmosphères planétaires. Un démonstrateur issu de la R&T doit être embarqué sous ballon pour effectuer des mesures pour la communauté Terre, Environnement et Climat. Cette étape est maintenant indispensable à la qualification des solutions techniques proposées pour la spatialisation de cet instrument qui présente un intérêt partagé entre l'exobiologie et la planétologie au sein des sciences de l'Univers.

9. ENTRÉES POUR LA PROSPECTIVE INSU

Après avoir bénéficié d'un soutien institutionnel français de 1998 à 2012 au travers des Programmes Interdisciplinaires du CNRS, l'exobiologie a obtenu récemment le soutien de l'Europe via un programme européen Cost Origins TD1308 (Cooperation in Science and Technology). Ce réseau thématique Origins and evolution of life on Earth and in the Universe a pour objectif de soutenir la recherche et la collaboration en exobiologie entre différents pays européens, via des conférences, des échanges d'informations scientifiques et publications. Toutefois, les fonds versés et partagés entre scientifiques des états membres de l'UE au titre du Cost ne permettront pas de soutenir les actions et nouvelles thématiques aux frontières des disciplines dégagées par la communauté exobiologique française. à l'heure actuelle, seule la Société Française d'Exobiologie (SFE créée en 2009) essaie, sans moyens particuliers, de structurer cette discipline qui devient, au niveau international, aussi visible scientifiquement et médiatiquement que la cosmologie.

Pour conforter le rôle de la large communauté scientifique française dans ce champ interdisciplinaire en plein essor, il est nécessaire de lui attribuer un soutien financier pérenne inter-instituts (INSU, INEE, INC, INP, INSB, INSHS, INSIS…).

La communauté scientifique française est en mesure de promouvoir des thématiques fortes et interdisciplinaires par exemple autour de « l'habitabilité, émergence et maintien de la vie » pouvant aboutir à moyen terme à la création d'un Institut Interdisciplinaire des Origines. Ce soutien fournirait un prolongement institutionnel très fort dans un domaine dans lequel la France joue un rôle moteur au niveau européen (Présidence de l'EANA) et international (GdR Exobiologie et SFE membres associés du NASA Astrobiology Institute, Organisation du congrès Origins en 2011).

10. INTÉRÊT POUR LES NANO-SATELLITES

Les nano-satellites (entre 1 et 50 kg) ont fait leur apparition il y a une dizaine d'années, d'abord construits par des laboratoires ou dans le cadre de projets étudiants. L'atelier organisé par le CNES en préparation du séminaire a montré que les technologies devenaient industrialisées et standardisées. La miniaturisation des systèmes de service (contrôle d'attitude, énergie, radiocommunication…) et de certains composants standards autorise à envisager des unités au coût de fabrication limité pour répondre à des questions scientifiques nécessitant une mise en orbite.

L'évolution rapide parallèle des charges utiles (imagerie, spectrométrie...) doit inciter à envisager des utilisations diversifiées (exploration). Plusieurs centaines de nano-satellites sont en cours de conception ou de construction dans le monde. Ce nouvel outil est prometteur même si les systèmes de lancement et les orbites sur lesquelles ils peuvent évoluer demeurent des questions délicates. Pour se l'approprier et en mesurer l'intérêt réel, il est nécessaire de commencer dès maintenant un travail de recensement des possibilités et de le confronter avec les besoins scientifiques exprimés. En exobiologie une réflexion pour la mise en œuvre d'une partie des objectifs de Vitrine pourrait conduire à l'issue d'une phase 0/A à une proposition pour une phase de conception avancée (voir recommandation #9).

CONCLUSION

Au fil des ans, l'exobiologie rassemble des scientifiques qui proviennent autant de laboratoires spatiaux que de laboratoires conventionnels du CNRS. La communauté s'organise, est active et est reconnue internationalement. Sa priorité demeure l'exploration de la planète Mars avec comme objectif la réussite de la mission ExoMars, la préparation des missions futures comme Mars 2020 et les suivantes. L'objectif à moyen terme est de se placer au sein de l'Europe et au sein de la communauté internationale pour jouer un rôle significatif, avec l'aide du CNES, dans une mission de retour d'échantillons martiens. Il est aussi nécessaire de préparer l'exploration à long terme vers les satellites glacés des planètes géantes ainsi que la caractérisation à venir des exoplanètes et la recherche de bio-signatures éventuelles. Cette communauté suscite des questions transverses qui, avec la participation de disciplines variées s'étendant des sciences humaines à l'astronomie, élargissent la réflexion de domaines déjà en débats (habitabilité, protection planétaire) ou de domaine nouveaux (Bio-signatures).