

SYNTHESE DU CERES

Composition du CERES : A. Coustenis, présidente, J.M. Hameury, Président sortant, J.L. Monin, responsable SME, N. Aghanim, K. Amsif, C. Delaroche, E. Falcon, P. Laudet, F. Leblanc, A. Marchaudon, F. Montmessin, C. Mustin, A. Omont, I. Petitbon, C. Renault, F. Rocard, M. Viso, P. Wolf

Le spatial, central dans le domaine des sciences de l'Univers, donne une forte visibilité à la communauté française et fournit des résultats de premier plan. Sur les 100 publications les plus citées du domaine, tous pays confondus, sur 2014 – 2019, 40 s'appuient de façon quasi-exclusive sur des données spatiales (dont 18 sur Planck), auxquelles il faut ajouter 5 publications où le spatial a joué un rôle déterminant.

Dans ce contexte, les chercheurs français sont très visibles sur le plan international ; ainsi, en planétologie, la France se situe à la deuxième place mondiale en nombre de publications et en citations, derrière les États-Unis. Outre ses compétences scientifiques, ces succès s'appuient sur une forte implication de la communauté française dans la réalisation des charges utiles. En effet, si les missions sont sélectionnées par les agences spatiales, la réalisation de leur charge utile est, dans le domaine des sciences de l'Univers, généralement confiée à des consortia de laboratoires ; la maîtrise des performances reste sous le contrôle des scientifiques car la conception et les tests sont réalisés le plus souvent dans les laboratoires ou en collaboration étroite avec eux. Ainsi, les missions sélectionnées correspondent aux priorités scientifiques des pays capables d'assurer la maîtrise d'œuvre des instruments, sachant que la charge utile représente environ un tiers du coût total d'une mission.

Il faut enfin souligner que le périmètre du CERES s'est étendu depuis le SPS de La Rochelle en incluant les sciences de la matière et s'appuie désormais sur six groupes thématiques. Le fonctionnement général des groupes est apparu satisfaisant, les sujets aux interfaces n'apparaissant pas comme moins bien traités, au contraire.

1. Priorités scientifiques

1.1. Lois de la physique gouvernant l'Univers

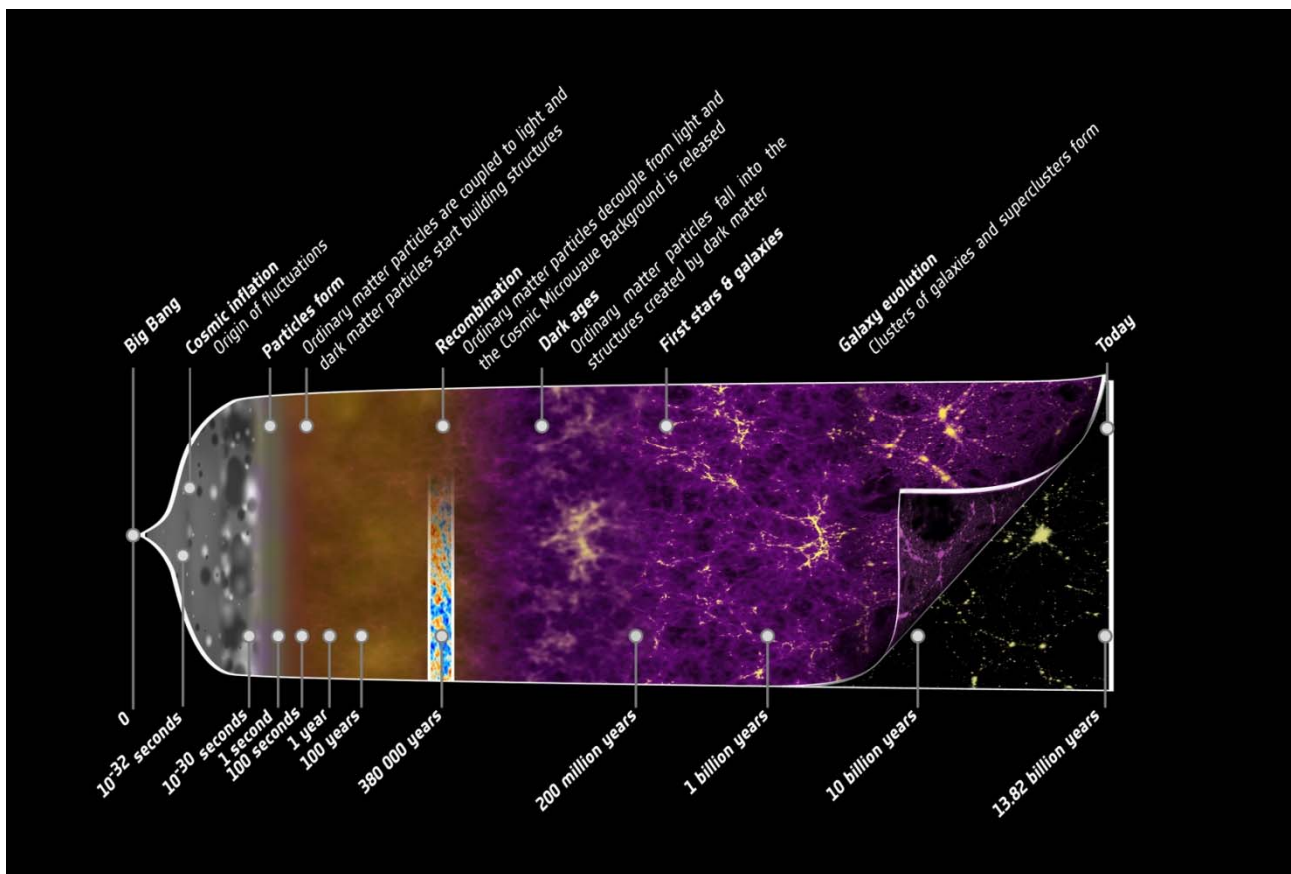
Une des questions majeures de la physique est de réconcilier mécanique quantique et relativité générale. Cela passe par le test du principe d'équivalence, fondement des théories métriques de la gravitation, alors que de nombreuses théories cherchant à unifier la gravitation avec les autres interactions prévoient une violation de ce principe, notamment à travers des nouveaux champs introduits dans ce type de théorie. Se pose également la question de savoir si la relativité générale décrit bien la gravitation, tant en régime de champ fort, au voisinage de trous noirs, qu'en régime de champ faible, tels qu'ils existent aux confins des galaxies.

Un résultat majeur des vingt dernières années est que l'Univers est composé pour l'essentiel de matière et d'énergie noires, dont la nature nous est totalement inconnue, et qui pourraient bien être liées à ces nouveaux champs qui, par exemple, violent le principe d'équivalence et la relativité générale. Les progrès passeront par la détection directe de la matière noire au sol et par la caractérisation des propriétés de ces deux composantes via l'observation de leurs effets sur la distribution des galaxies dans l'Univers.

Enfin, l'Univers primordial permet de sonder la physique à des énergies inaccessibles sur Terre. On veut comprendre la période d'inflation de l'Univers pendant laquelle l'expansion s'est produite exponentiellement sur plusieurs dizaines d'ordres de grandeur, expliquant l'homogénéité de l'Univers actuel. Pendant cette phase, des ondes gravitationnelles primordiales ont été générées et ont laissé une empreinte sur la polarisation du fond diffus cosmologique – les modes B – qu'on cherche à détecter. Dans un premier temps, cette détection se fera par imagerie conjointement au sol et dans l'espace ; à long terme, la mesure de distorsion du spectre du fond diffus deviendra prioritaire. Par ailleurs, l'univers primordial a laissé une empreinte gravitationnelle, le fond stochastique d'ondes gravitationnelles qui peut être sondé par des détecteurs spatiaux d'ondes gravitationnelles à basse fréquence.

1.2. Origine et évolution de l'Univers

Il s'agit de comprendre comment l'Univers s'est formé et a ensuite évolué pour donner naissance aux galaxies, étoiles et planètes que nous observons aujourd'hui, et ce que sera son devenir à long terme. Deux thèmes font l'objet d'une attention particulière :



Description schématique de la formation et de l'évolution de l'Univers.

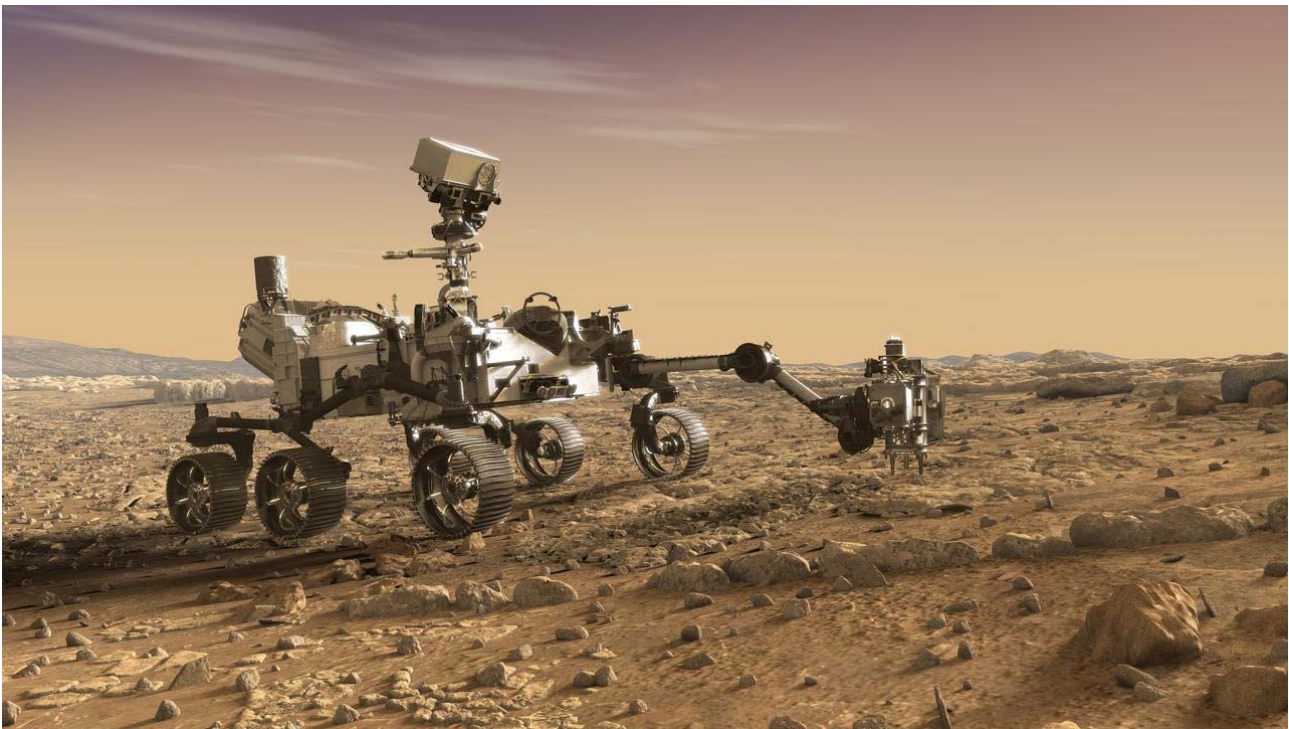
- la formation et l'évolution des galaxies, et notamment la coévolution des galaxies et du trou noir qu'elles hébergent pratiquement toutes en leur cœur,
- le rôle du champ magnétique dans la structuration de l'Univers, depuis l'échelle stellaire jusqu'à celle des grandes structures.

Ce dernier point est assez nouveau dans les préoccupations de la communauté scientifique. On savait certes depuis longtemps que les champs magnétiques jouent un rôle important, mais les observations récentes – Herschel par exemple pour la formation stellaire – ont montré que les modèles ne pouvaient plus se passer de cet ingrédient essentiel, même si cela aboutit à les complexifier sensiblement. L'observation polarimétrique qui trace les effets du champ magnétique devient alors un enjeu majeur.

1.3. Formation des planètes et émergence de la vie

On cherche à savoir comment s'est formé et comment a évolué (avec en particulier la migration des planètes géantes ou le bombardement primitif) notre Système solaire, ce qui le rapproche ou le différencie des autres systèmes planétaires. L'observation d'un nombre croissant de systèmes exosolaires très diversifiés pose les bases d'une taxonomie planétaire universelle et donne un nouvel essor à la planétologie comparée : comprendre comment Vénus, Mars et la Terre, initialement très proches, ont évolué dans des directions si différentes et quel est le rôle des processus physiques et des conditions environnementales.

Une autre question concerne l'habitabilité, depuis le milieu interstellaire jusqu'aux planètes. Il s'agit de savoir comment la vie est apparue sur Terre, et si elle existe ou a existé ailleurs que sur Terre. Cela nécessite de comprendre les processus de formation des molécules prébiotiques dans le milieu interstellaire et les environnements planétaires, de déterminer où existent les conditions favorables à l'apparition puis au maintien éventuel de la vie, et d'identifier les biomarqueurs pertinents pour la détecter. Les données récentes de nombreuses missions spatiales ont montré que la planète Mars a été habitable le fait qu'elle ne l'est plus nous interpelle pour mieux comprendre le passé et l'avenir de notre planète. La recherche de traces de vie passée revêt donc une importance considérable, et passe par l'analyse d'échantillons qu'il faudra rapporter sur Terre. De même, les découvertes récentes sur l'existence de conditions habitables sur les satellites glacés des planètes géantes ou de zones habitables inédites dans des systèmes exoplanétaires ouvrent de nouvelles perspectives sur les questions de l'émergence et du maintien de la vie. Enfin, les petits corps jouent un rôle important dans l'histoire de la Terre et l'apparition de la vie qu'il nous faut mieux comprendre.



Le rover de la mission Mars 2020, emportant l'instrument Supercam qui aidera à la sélection d'échantillons.

1.4. Fonctionnement global du Système solaire

La question est de comprendre les couplages et les interactions entre l'intérieur du Soleil, l'héliosphère, puis le vent solaire et les magnétosphères terrestres et planétaires, et ultimement les atmosphères. Cela implique d'étudier la structure interne du Soleil, l'origine de la couronne solaire, son chauffage et l'accélération du vent solaire ; cela implique aussi de comprendre les mécanismes de déclenchement et de propagation des phénomènes éruptifs solaires et de production des particules énergétiques solaires. Il faut encore considérer la propagation du vent solaire et les mécanismes de chauffage de celui-ci, et étudier l'interaction du vent solaire et des événements énergétiques solaires avec les magnétosphères intrinsèques ou induites des objets du Système solaire, et en tout premier lieu avec la magnétosphère terrestre. Enfin, on s'intéresse à l'ionosphère, non seulement comme lieu ultime des perturbations issues de la magnétosphère et de son interaction avec le Soleil mais également comme région en relation étroite avec l'ensemble des couches atmosphériques. Cela nécessite de comprendre les effets du forçage solaire sur notre atmosphère mais également d'étudier tous les phénomènes se propageant de la basse atmosphère jusque dans l'ionosphère. Les progrès dans ce domaine requièrent l'exploration de zones peu connues telles l'héliosphère interne ou les zones aurorales, ainsi que l'exploration de régimes spatio-temporels nouveaux, par des mesures multipoints et multi-échelles. Il faut observer simultanément les échelles fluides, ioniques et électroniques pour comprendre le transfert de l'énergie dans les plasmas spatiaux.

Un enjeu important est de comprendre la variabilité solaire des courtes aux longues échelles de temps, et leurs impacts sur notre environnement spatial pour permettre à terme une météorologie de l'espace opérationnelle.

1.5. Comprendre les processus élémentaires de transformation de la matière

La question centrale ici est de comprendre les propriétés de la matière qui, lorsqu'on veut les étudier en laboratoire sur Terre, sont masquées par les effets de la gravité (convection, sédimentation, pression hydrostatique, drainage, etc.). Trois thèmes principaux sont concernés :

- Matière molle et fluides complexes : un des enjeux est de comprendre les comportements dynamiques des milieux hétérogènes, en particulier des milieux multiphasiques (milieux granulaires, mousses, émulsions, brouillards...). On s'intéresse notamment à leurs processus d'évolution et de transport, ainsi qu'à leurs réponses à diverses sollicitations.
- Etats et transitions d'état de la matière : cette thématique est étudiée depuis plusieurs années ; l'accent est aujourd'hui mis sur l'étude de la combustion froide et hydrothermale dans l'eau supercritique.
- Instabilités, transferts et ondes dans les milieux comportant des interfaces liquide/solide, liquide/liquide ou liquide/gaz : il s'agit d'étudier, par exemple, la dynamique des flammes dans les aérosols combustibles ou les propriétés statistiques des grandes échelles en turbulence d'ondes de surface.

Ces sujets ont, outre leur intérêt pour leurs aspects fondamentaux, des applications importantes dans de nombreux domaines technologiques ou sociétaux, telles que la transformation des matériaux, la météorologie

et la climatologie (échanges liquide/vapeur), la transition énergétique (combustion, valorisation des déchets), la santé (biophysique, biomimétisme)

2. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

2.1. Faits marquants

Il serait vain de tenter un bilan exhaustif des nombreuses avancées scientifiques depuis 2014. On les illustrera plutôt par deux faits marquants.

2.1.1. Gaia et l'archéologie galactique

Gaia est une mission d'astrométrie et de spectroscopie lancée fin 2013, qui a mesuré la position de 1,7 milliards d'étoiles, la distance et les mouvements sur la sphère céleste de 1,3 milliards d'étoiles, avec une précision meilleure que 10% pour 70 millions d'étoiles et les vitesses radiales de 7 millions d'étoiles. C'est une avancée majeure, les distances des étoiles n'étant connues avec une précision raisonnable avant Gaia que dans le voisinage du Soleil. Gaia touche pratiquement tous les domaines de l'astrophysique, de la détection des planètes extrasolaires à la formation de la Galaxie. L'archéologie galactique permet de retracer l'histoire de la Galaxie via la cinématique des étoiles ; Gaia a ainsi montré que la Galaxie a fusionné il y a 10 milliards d'années avec une galaxie de la taille du Grand Nuage de Magellan, qui représentait à l'époque le quart de la masse de la Galaxie. Cela permet de mieux comprendre le rôle de l'accrétion de galaxies naines dans la formation des galaxies.

L'exploitation scientifique n'en n'est qu'à ses débuts, mais Gaia est d'ores et déjà la mission la plus productive de l'histoire de l'ESA en nombre de publications par an (plus de 800 articles parus dans des revues de rang A en 2018), comparable au nombre de publications issues du télescope spatial Hubble.

2.1.2. Rosetta et la Terre primitive

Lancée en 2004, la sonde Rosetta a rejoint la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko en 2014, et a envoyé l'atterrisseur Philae se poser pour analyser la composition de son sol et sa structure. L'impact médiatique de cet événement a été considérable. Même si l'atterrissage de Philae ne s'est pas déroulé comme prévu, Rosetta a fourni plus de mille publications (plus de 600 depuis 2014), dont plus de la moitié à un co-auteur français.

Parmi la moisson de résultats, on note la résolution de l'énigme du xénon terrestre, une des quatre percées recensées en 2016 par *Science* et où le premier auteur est français. L'atmosphère terrestre possède une signature isotopique spécifique, différente de celle des météorites et du Soleil ; Rosetta a montré que le xénon primitif apporté sur Terre durant la formation du Système solaire serait issu d'un mélange de xénon provenant de comètes et d'astéroïdes. Ce résultat indique également que le xénon de la comète serait antérieur à la formation du Système solaire. On retient aussi la découverte de matières organiques primitives : macromolécules complexes dans les grains cométaires, molécules comme la glycine, un acide aminé, dans la coma et à la surface du noyau. Ce dernier résultat renforce l'hypothèse selon laquelle la vie pourrait s'être formée sur Terre grâce à l'apport de molécules d'origine extraterrestre.

2.2. Bilan programmatique

Côté ESA, les cinq dernières années ont vu l'adoption de la mission Plato (M3) de détection d'exoplanètes, la sélection d'Ariel (M4) qui caractérisera les atmosphères d'exoplanètes, d'Athena (L2), observatoire en rayons X, de Lisa (L3) pour l'observation des ondes gravitationnelles à basse fréquence, les présélections de Spica (observatoire infrarouge lointain), Theseus (détection des sursauts gamma), et Envision (mission vers Venus) pour la mission M5, et la sélection de la première mission F (Comet Interceptor). Ces missions correspondent aux priorités affichées lors du séminaire de prospective de 2014, même si on regrette l'absence de mission européenne de détection des ondes gravitationnelles primordiales par leur signature sur la polarisation du fond cosmologique et d'une mission dédiée à l'exploration des plasmas spatiaux. Le programme ExoMars a été stabilisé ; l'échec de l'atterrisseur Schiaparelli de la mission ExoMars 2016 est certes à déplorer, mais l'orbiteur TGO fonctionne nominalement et produit déjà des résultats intéressants.

Du côté du CNES, on se félicite :

- du succès de l'instrument Seis de sismologie martienne embarqué sur la mission InSight de la NASA ; Seis a été reconstruit dans un calendrier très tendu, lancé en 2018 (et a enregistré son premier séisme martien en avril 2019) ;

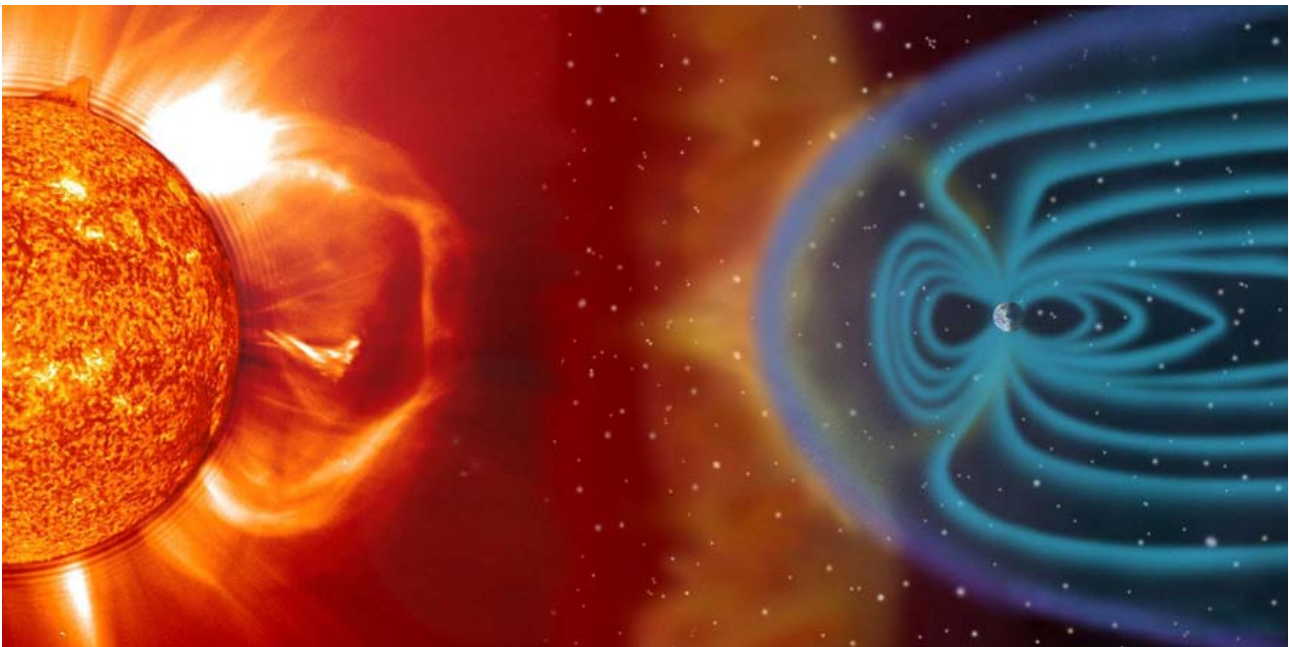


Illustration de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre

- du passage en phase C/D des instruments de Juice (mission vers Jupiter), de Supercam à bord de la mission NASA Mars 2020, et de SVOM, mission franco-chinoise d'observation de sursauts gamma ;
- du passage en phase A/B du spectromètre à intégrale de champ XIFU d'Athena, instrument sous responsabilité française ;
- du passage en phase A des instruments embarqués à bord des missions Lisa, Ariel, MMX (mission japonaise vers les satellites Phobos et Deimos) et des trois missions présélectionnées dans le cadre M5 de l'ESA. Le financement par l'ESA d'une partie significative des trois phases A M5 a été déterminant.
- de la décision de participer au volet météorologie de l'espace du programme optionnel SSA (Space Situational Awareness) de l'ESA et de la création d'Oframe (Organisation Française de Recherche Appllicative en Météorologie de l'espace) dont l'objectif est d'organiser la communauté scientifique dans le but de répondre de manière visible, efficace et structurée aux sollicitations dont elle est l'objet.

On regrettera que les contraintes budgétaires ne permettent d'espérer qu'une participation limitée à la prochaine mission F de l'ESA.

Il faut noter qu'il n'y a qu'une mission prévue dans le domaine SHM au-delà de l'horizon 2020. La communauté SHM sera certes alimentée par les données de nombreuses missions, mais le maintien des compétences instrumentales dans ce domaine est une préoccupation ; un effort soutenu de R&D sera un élément de la solution, au moins à court terme, mais il ne suffira sans doute pas.

Les cinq ans passés ont enfin vu le lancement de plusieurs missions dans lesquelles la France avait une contribution instrumentale : Hayabusa 2 (2014, mission japonaise de retour d'échantillons vers l'astéroïde Ryugu), Lisa Pathfinder (2015, mission ESA préparatoire à Lisa), Microscope (mission française lancée en 2016, test du principe d'équivalence), ExoMars (2016), InSight (2018), BepiColombo (2018, mission ESA vers Mercure), et Parker Solar Probe (2018, mission NASA s'approchant à 0,3 unités astronomiques du Soleil). Depuis 2014, on note la fin des missions Cassini (mission NASA/ESA vers Saturne et Titan), Corot (sismologie stellaire et exoplanètes), Herschel (observatoire infrarouge lointain), Picard (observation du Soleil), Planck, Rosetta et T2L2 (comparaison d'horloges par liens lasers).

Malgré quelques préoccupations mentionnées plus haut, **ce bilan programmatique est extrêmement positif.**

3. Stratégie programmatique

3.1. Programmes de l'ESA

Les programmes de l'ESA, et en premier lieu le programme obligatoire, restent l'ossature de la programmation pour le CERES, en raison de l'investissement national dans ces programmes et du fonctionnement du programme obligatoire basé sur des consensus scientifiques. Pour les raisons mentionnées en introduction, les choix de l'ESA sont en phase avec les priorités scientifiques de la communauté nationale et lui procurent l'opportunité de participer à une grande variété de missions.

Le CERES soutient l'accroissement du niveau de ressources du programme obligatoire qui a baissé de 20% depuis 1995 alors que l'ESA a accueilli plusieurs nouveaux pays membres (le PIB des états membres a presque

doublé sur cette période). Cette augmentation est indispensable pour la réalisation d'une mission M* vers les géantes glacées Uranus et/ou Neptune conjointe avec la NASA. Elle permettra aussi à l'ESA de s'impliquer davantage dans la réalisation des charges utiles, y compris financièrement, tant durant les phases A/B que les phases de réalisation. L'expérience récente a montré combien ce soutien pouvait être précieux, avec par exemple le financement d'une part significative des phases A pour M5. Cette croissance du niveau de ressources implique une croissance parallèle, mais moindre, du financement des charges utiles par le CNES. Les missions L et M structurent le programme obligatoire et bénéficient donc d'une priorité importante, modulée par les intérêts spécifiques de la communauté française. Les missions de moindre envergure, S dans le passé et F aujourd'hui, sont à considérer au cas par cas, au même niveau que les missions d'opportunité. Le CERES soutient également la souscription au programme optionnel Mars Sample Return (MSR) du Directorate Human Spaceflight and Robotic Exploration (HRE), le retour d'échantillons de la planète Mars étant une priorité forte réaffirmée ici. Il souhaite enfin que la France puisse renforcer sa participation au programme SSA.

3.2. Missions d'opportunité du CNES

Ces missions jouent un rôle essentiel. Au-delà de considérations politiques qui peuvent être déterminantes dans les décisions de collaborer avec tel ou tel pays, elles complètent le dispositif et assurent la réactivité aux évolutions scientifiques. Les opportunités stratégiques, apparues lors du séminaire de Biarritz en 2009, sont des missions pour lesquelles la contribution française à la charge utile peut être du même ordre de grandeur que celle aux missions de l'ESA. L'expérience a montré combien elles étaient précieuses et avaient un retour scientifique important pour un investissement limité ; elles assurent une forte visibilité de la contribution française.

A côté de ces contributions majeures qui ont pu aller jusqu'à fournir l'instrument principal d'une mission NASA (Seis), les petites contributions d'opportunité permettent de valoriser les compétences techniques (si fourniture instrumentale) et scientifiques de la France. Le retour scientifique de ces « petites » contributions d'opportunité est extrêmement élevé, et valorise l'implication importante de la France dans d'autres missions, qui conditionne le désir de pays étrangers à faire appel à une collaboration avec le CNES.

La question de l'équilibre entre les programmes de l'ESA et les missions d'opportunité est délicate. Le premier est, pour l'essentiel, engagé jusqu'en 2035 et se prépare actuellement jusqu'à l'horizon 2050, alors que l'échelle de temps des missions d'opportunité est plus courte, ce qui biaise la vision du poids des opportunités sur le long terme. D'un autre côté, le ratio actuel programme ESA / opportunités est fortement affecté par le poids de SVOM. Cela rend inopérant l'affichage d'un ratio prévisionnel programme ESA / opportunités ; il faut par contre avoir la possibilité, comme aujourd'hui, de réaliser plusieurs missions d'opportunité stratégiques en parallèle.

Il est aussi apparu qu'en raison du développement rapide du programme spatial de pays tels que la Chine, les sollicitations se multiplient, et elles doivent être gérées avec rigueur. Le CERES souhaite que les décisions politiques correspondent autant que possible aux priorités scientifiques. Cela suppose qu'avant des engagements significatifs, les groupes, ou à tout le moins leur président, soient consultés.

Enfin, la science ne justifie pas les vols habités en projet vers la Lune et Mars qui peuvent cependant offrir des possibilités d'emport d'instruments scientifiques ; elles devront être évaluées et comparées aux autres opportunités.

3.3. Nanosatellites

Les réponses à l'appel à contribution du SPS ont montré l'intérêt de la communauté scientifique pour les nanosatellites. Ils sont particulièrement bien adaptés au domaine SHM et à certaines investigations du Système solaire, car ils offrent des perspectives très intéressantes de constellations et de mesures in-situ, et les capteurs dans ce domaine sont souvent de petite taille, même si celle-ci devrait être encore réduite. Ils offrent des possibilités inaccessibles aux systèmes traditionnels, pour des raisons de coût. Reste cependant à lever plusieurs obstacles, dont la propreté électromagnétique ou la communication entre nanosatellites ; une fois ces verrous levés, une mise en priorité des projets, prématurée aujourd'hui, sera possible. En planétologie, les nanosatellites peuvent compléter une mission de plus grande envergure, et être par exemple utilisés comme éléments sacrificiables d'une mission pour des mesures dont le risque ne pourrait être pris par le vaisseau mère. Dans les autres domaines, ils peuvent être une option intéressante sur des cas scientifiques précis, comme l'a montré l'expérience de PicSat, qui devait observer les transits de la planète Beta Pictoris b, même si cette mission s'est achevée prématurément.

3.4. Exploitations

Le soutien à l'exploitation d'une mission conditionne son retour scientifique et est crucial, mais il faut veiller à d'éventuelles dérives afin d'éviter que le financement des exploitations prenne une part excessive et empêche le développement de nouveaux projets. Cependant, les missions lancées d'ici 3 ans (Cheops, ExoMars 2020, Mars2020, Taranis, Solar Orbiter, SVOM, JWST, Juice, Euclid) vont fournir sur la période 2020 - 2025 une moisson de données qu'il faudra exploiter. La recherche de financements externes pourra contribuer à la solution, mais ne suffira pas ; la ligne exploitation devra croître pendant quelques années, et ceci doit être bien anticipé.

Les organismes et les universités ont une responsabilité particulière dans ce domaine ; il est regrettable que la réduction des effectifs, en particulier ITA, constatée dans les laboratoires aboutisse à ce que des tâches qui devraient normalement être assurées par des personnels permanents le soient par des CDD CNES. Il est peu probable que la situation évolue rapidement ; la recherche de financements extérieurs est un impératif. L'ERC peut amener des financements substantiels, mais trop concentrés sur un petit nombre d'équipes. Le CNES et le CNRS auraient tout intérêt à agir conjointement auprès de la commission européenne pour faire croître le budget européen dédié à l'accompagnement scientifique, aujourd'hui très insuffisant dans H2020.

Enfin, la croissance du volume des données et surtout de leur complexité, de la précision des mesures, la nécessité de traiter simultanément des données sol et spatiales, l'émergence de la variable temporelle, la nécessité de développer des simulations « end-to-end », imposent un changement de positionnement du CNES dans le traitement des données qui est détaillé dans le chapitre « numérique et données ».

3.5. R&D

La R&D permet de préparer l'avenir à long terme en permettant que l'instrumentation reste à la pointe des possibilités techniques. Avec les exigences croissantes des agences spatiales en matière de TRL requis lors de la sélection des missions, la R&D joue un rôle croissant qui peut, dans un nombre limité de cas, aller jusqu'au besoin de réaliser un démonstrateur.

3.6. Ballons

L'emport d'instrument sur des ballons stratosphériques peut répondre à des objectifs ponctuels bien identifiés ; l'intérêt, au moins en ce qui concerne les charges utiles lourdes, restera cependant limité tant que la durée des vols ne dépassera pas quelques jours. Dans ce contexte, l'action actuelle du CNES pour étendre la durée de ses vols est suivie avec intérêt.

3.7. Liens avec l'Union Européenne

Suite à l'accord de coopération avec l'ESA, les laboratoires français devraient tirer parti des opportunités offertes par les appels Horizon Europe en soutien à l'exploitation des données (cf. supra) et pour le développement d'instruments, notamment sur les aspects sol – espace. L'ERC est également une ressource à ne pas négliger.

4. Priorités et recommandations

Les priorités vont pratiquement jusqu'à l'horizon du programme Cosmic Vision (2035). Elles incluent les priorités sur les missions décidées à l'ESA mais pas encore engagées en phase C/D au CNES. Certaines sont mutuellement exclusives (M5 ESA) ; d'autres sont liées à des décisions à prendre lors de la ministérielle de 2019 (MSR, M*).

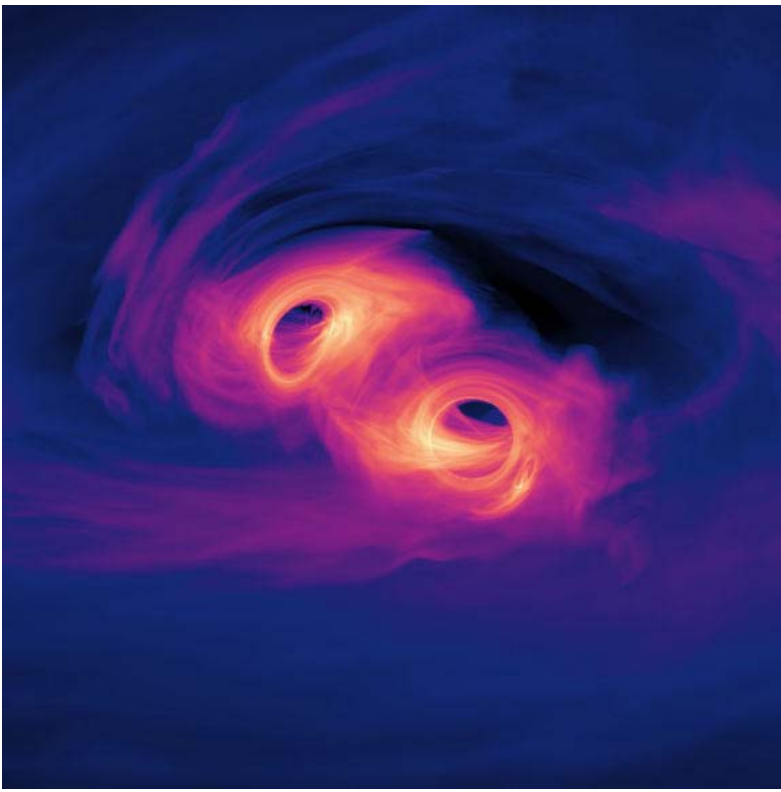
4.1. Consolider la participation française aux missions décidées

4.1.1. Athena (Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics)

Deuxième mission « large » de l'ESA qui sera lancée en 2031, Athena observera l'Univers chaud et énergétique, avec de multiples objectifs ; les plus importants concernent la formation des premières structures que sont les amas distants de galaxies, la coévolution des galaxies et du trou noir supermassif hébergé en leur cœur, la confirmation de l'existence de filaments chauds entre galaxies qui pourraient constituer 30% de la matière baryonique et l'histoire de la genèse des éléments. Athena permettra également d'étudier l'environnement des objets compacts et des trous noirs.

La France est responsable du spectromètre à intégrale de champ X-IFU, et il faut conforter cette position.

Simulation numérique de la coalescence de deux trous noirs supermassifs entourés de gaz.



4.1.2. **Lisa (Laser Interferometer Space Antenna)**

Mission L3 de l'ESA qui sera lancée en 2034, Lisa ouvrira une nouvelle fenêtre sur l'Univers en détectant les ondes gravitationnelles à basse fréquence émises par la coalescence de trous noirs supermassifs ou par les phases de contraction de binaires stellaires précédant de quelques mois ou quelques années leur coalescence observable par les détecteurs au sol. Lisa devrait aussi détecter le fond stochastique d'ondes gravitationnelles. Cette mission comporte un volet astrophysique (formation des trous noirs) et un volet de physique fondamentale (lois fondamentales opérant dans des champs forts).

L'implication française, forte, porte sur le centre de traitement de données et les AIV, tous deux déterminants pour le retour scientifique.

4.1.3. **Ariel (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey)**

Mission M4 de l'ESA qui sera lancée en 2028, Ariel permettra l'étude détaillée d'un millier d'exoplanètes en caractérisant les atmosphères de planètes chaudes autour d'étoiles brillantes par spectroscopie infrarouge entre 2 et 8 μm lors de transits. Ariel mesurera la composition et la structure des atmosphères planétaires, contraindra la nature des cœurs planétaires, détectera la présence de nuages et étudiera les interactions avec l'étoile hôte. La France est responsable de la conception et de la fourniture du spectromètre infrarouge, instrument principal de la mission.

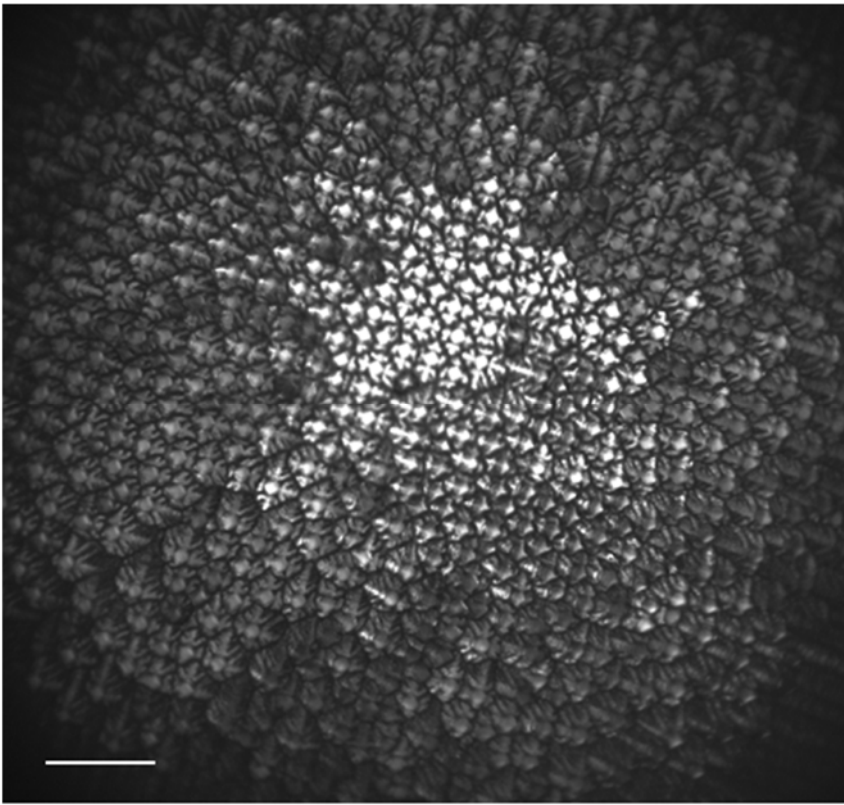
4.1.4. **MMX (Martian Moons eXploration)**

Mission JAXA qui sera lancée en 2024, MMX a pour objectif principal de déterminer l'origine des satellites Phobos et Deimos en rapportant sur Terre un échantillon du sol de Phobos. C'est une première étape d'enjeu majeur dans la perspective d'un retour d'échantillons martiens, les modèles prédisant que Phobos est recouvert d'une fine couche de poussière arrachée de la surface martienne.

La France fournirait le spectroimageur infrarouge qui jouera un rôle clé dans la sélection des échantillons. Elle se propose également de fournir un rover dont l'intérêt est principalement technologique.

4.1.5. **Accès aux moyens de microgravité**

Les sciences de la matière et les sciences de la vie ont besoin d'accéder à des moyens de microgravité (avion 0g, fusées sondes, Station spatiale internationale). Leur maintien est une nécessité.



Exemple de réseau dendritique observé par l'expérience DECLIC lors de la solidification dirigée d'alliages

4.2. Priorités sur les missions ESA à venir

4.2.1. Mission M5

Trois missions sont en compétition pour la future mission M5 de l'ESA qui sera lancée en 2032 :

Spica (SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics) permettrait d'étudier la formation des premières étoiles et des premières galaxies, et en particulier le rôle du champ magnétique dans la structuration de la matière de l'échelle stellaire aux grandes échelles. Spica bénéficie d'une forte priorité liée à la combinaison de la spectroscopie haute résolution et de la polarimétrie qui donne accès au champ magnétique, justifiant un investissement important de la France qui assurerait la fourniture du spectropolarimètre BPOL.

Envision déterminerait la nature et l'état actuel de l'activité géologique sur Vénus et sa relation avec l'atmosphère, afin de mieux comprendre pourquoi la Terre et Vénus ont suivi des voies évolutives si différentes. Elle cartographierait une partie de la surface à partir d'images radar d'une résolution cent fois meilleure que celle de la mission Magellan des années 1990. Sa technique d'interférométrie permettrait de restituer les déplacements centimétriques de la croûte, révélant ainsi la tectonique de la planète. La contribution française envisagée porte sur la responsabilité d'un spectroimageur ultraviolet et une participation à un instrument infrarouge.

Theseus (Transient High-Energy Sky and Early Universe Surveyor) observerait à très haute énergie des événements transitoires à travers le ciel sur toute l'histoire cosmique et effectuerait un recensement complet des sursauts gamma survenus pendant le premier milliard d'années d'existence de l'Univers afin de faire la lumière sur le cycle de vie des premières étoiles. La France souhaite prendre la responsabilité du spectromètre infrarouge qui observerait les contreparties des sursauts gamma.

4.2.2. Géantes glacées

Il s'agit de la mission M*, conditionnée par l'augmentation du niveau de ressources du programme obligatoire de l'ESA en discussion dans le cadre de la ministérielle 2019. Cette mission effectuerait la première exploration *in situ* d'Uranus et/ou Neptune, conjointe avec la NASA, en tirant parti d'un alignement planétaire unique en 2028-2032. Ces deux planètes, intermédiaires entre les planètes telluriques et les planètes géantes ont un intérêt particulier en ce qu'elles constituent une classe planétaire représentative d'une fraction notable d'exoplanètes restée inexploree à ce jour et que leur intérieur est constitué d'un fluide supercritique.

4.2.3. Retour d'échantillons martiens

La recherche de traces de vie passée ou présente est un des enjeux majeurs dans le domaine des sciences de l'Univers. Le programme MSR consiste en un ensemble de missions dont la première est la mission Mars 2020

de la NASA et à laquelle la France participe en fournissant l'instrument Supercam pour analyser à distance la composition chimique et minéralogique des roches. Cette mission prélèvera des échantillons qui seront ensuite récupérés par deux missions (l'une incluant un rover récupérateur associé au Mars Ascent Vehicle qui acheminera les échantillons en orbite pour être récupéré par le vaisseau de retour sur Terre, amené par la seconde mission), lancées en 2026 pour un retour d'échantillons prévu en 2031 ; la contribution européenne comprendra notamment, outre Supercam qui sera utilisé pour la sélection d'échantillons, le « fetch rover » qui ira rechercher les échantillons et le vaisseau de convoyage vers la Terre.

Un enjeu stratégique est de disposer en Europe, voire en France, d'une installation de quarantaine de type P4 donnant accès à l'analyse d'échantillons pour la détection de traces de vie et l'évaluation des risques biologiques. Ceci est essentiel afin de disposer d'une analyse indépendante tant pour les résultats décisifs que pour toute décision politique de sortie de quarantaine. A noter que la communauté scientifique concernée dépasse largement le périmètre du CERES et de l'INSU.

4.2.4. **Mission F1**

La mission F1, Comet Interceptor, réalisera la première rencontre avec une comète primitive – par opposition aux comètes périodiques qui ont été altérées par plusieurs approches du Soleil. La contribution française à la charge utile est focalisée sur l'interaction entre la comète et le vent solaire, et pourrait être financée en partie par l'ESA ; cette mission rentre dans la classe des petites contributions d'opportunité.

4.3. **Missions d'opportunité stratégiques dans un cadre programmatique défini**

4.3.1. **Litebird (Lite (Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)**

Litebird est une mission qui vient d'être décidée par la JAXA pour un lancement vers 2028 dont l'objectif est la détection des ondes gravitationnelles primordiales par l'empreinte qu'elles ont laissée sur le fond diffus cosmologique. Suivant les recommandations du CPS, la France se propose de prendre la responsabilité du télescope à haute fréquence, avec une contribution financière importante de l'ESA. La participation à Litebird, fortement recommandée par la feuille de route CMB, permettra à la France d'avoir une position privilégiée pour négocier un accès aux données d'observations au sol (projet américain S4), les données spatiales étant indispensables pour contraindre les avant-plans qui se superposent au fond cosmologique.

4.3.2. **SOLAR-C**

La mission Solar-C est la prochaine grande mission de physique solaire de l'agence spatiale japonaise, dont le lancement est prévu en 2025 et qui se propose de mieux comprendre les mécanismes de transfert d'énergie entre la photosphère et la couronne, et ses conséquences pour la structure et la dynamique de l'atmosphère solaire en sondant les structures solaires à toutes les échelles spatiales et temporelles, notamment aux petites échelles. La contribution française porte sur la fourniture d'éléments optiques du spectroimageur ultraviolet, un des instruments clé de la mission.

4.4. **Mission hors cadre programmatique défini**

4.4.1. **Observations simultanées des échelles fluides, ioniques et électroniques**

L'objectif est de résoudre la dissipation aux plus petites échelles turbulentes dans le vent solaire proche, l'accélération des particules dans la magnétosphère terrestre, la reconnexion magnétique et la physique du choc magnétosphérique. Pour atteindre ces objectifs, une mission multipoints et multi-échelles de type Cross-Scale, ou une mission bi-satellites dont la position et la séparation sont contrôlées et variables sont deux options possibles, toutes deux proposées à l'ESA dans le passé. Cette future mission pourrait s'inscrire dans un contexte ESA (mission de type M, voire F), ou bien faire l'objet d'une contribution d'opportunité dans un cadre à déterminer.

4.4.2. **Universalité de la chute libre**

Après le grand succès de Microscope qui a amélioré par plus d'un ordre de grandeur la mesure du principe d'équivalence, l'étape suivante est d'améliorer sa précision d'au moins deux ordres de grandeur, à un niveau de 10^{-17} ou mieux. Ce test peut s'effectuer soit sur des atomes froids afin de tester le principe d'équivalence sur des objets quantiques, soit sur des objets macroscopiques. Dans le premier cas, il s'agirait d'une mission similaire à STE-QUEST, candidate à l'appel M4, qui pourrait être soumise dans le cadre d'un prochain appel M de l'ESA ; dans le second, il s'agirait d'une version évoluée de la technologie Microscope dans un cadre programmatique à déterminer.

4.5. Préparation de l'avenir

4.5.1. R&D

Au-delà des activités habituelles de R&D, notamment sur les détecteurs et le développement de nouvelles générations d'instruments s'inscrivant dans le cadre de filières instrumentales établies, qu'il faut bien entendu maintenir, le CERES a identifié quelques axes novateurs qu'il conviendrait d'explorer :

- développement d'une instrumentation adaptée aux nouveaux moyens disponibles (drones, nanosatellites) dans les domaines SHM et planétologie ; les actions à mener concernent notamment les aspects systèmes des essais, la miniaturisation et la propreté électromagnétique,
- étude d'un spectromètre à transformée de Fourier refroidi recommandé par la feuille de route CMB,
- développement d'instruments analytiques compatibles avec la quarantaine pouvant être introduits dans un laboratoire P4.

4.5.2. Démonstrateurs

Les priorités dans le domaine SHM, mettent en évidence le besoin crucial d'anticiper une contribution française de type nanosatellite aux missions SHM et à des applications en météorologie de l'espace. Les nouveaux concepts de mission dans ce domaine intègrent en effet désormais systématiquement la fourniture d'un ensemble de nanosatellites, mais souvent avec des calendriers courts impliquant des niveaux de maturité très élevés. Il faut donc démarrer rapidement le développement d'un démonstrateur de mesures plasma in situ et de mesure des champs électriques et magnétiques à partir d'une petite plateforme. Acquérir la capacité nationale d'une telle fourniture est stratégique.

Pour cela, il faut étudier, développer et éventuellement réaliser un prototype de nanosatellite dédié à la mesure in situ. Cela implique notamment de résoudre un certain nombre de verrous technologiques (mât, EMC, spin...) au niveau plateforme mais également au niveau instrumentation (miniaturisation).

5. Conclusion

Lors du précédent SPS, le CERES s'était félicité du bilan 2009-2013 et espérait que le bilan 2014-2019 serait aussi bon. Le CERES est heureux de constater que cela a été le cas, même si les problèmes budgétaires du CNES ont généré quelques remous et malgré les préoccupations notées plus haut. Nous espérons que l'avenir de la recherche spatiale en France sera tout aussi brillant dans les années à venir.