

COMITE D'EVALUATION DE LA RECHERCHE ET DE L'EXPLORATION SPATIALE (CERES) DU CNES

Membres du Ceres : Aghanim Nabila (présidente entrante), Amsif Kader, Blouvac Jean (responsable Exploration), Boutelier Martin, Bret-Dibat Thierry, Coustenis Athéna (présidente sortante), Decourchelle Anne, Gauquelin-Koch Guillemette, Grasset Olivier, La Marle Olivier (responsable Science de l'Univers), Marques João, Kretzschmar Matthieu, Lallement Rosine, Laudet Philippe, Morbidelli Alessandro, Morel Jean-Luc, Mustin Christian, Petiteau Antoine, Petrelis François, Rocard Francis, Szopa Cyril

1. INTRODUCTION

Le Comité d'évaluation de la Recherche et de l'Exploration spatiale (Ceres) du Cnes couvre historiquement les thématiques de l'astronomie et l'astrophysique (AA) à l'exobiologie en passant par la physique fondamentale, l'héliophysique, et l'exploration du système solaire. Ce périmètre s'est étendu depuis le Séminaire de Prospective Scientifique (SPS) de 2019 en incluant l'exploration robotique et humaine, les sciences de la matière et de la vie et le Ceres s'appuie désormais sur sept groupes thématiques (GTs) abordant les grands thèmes suivants, qui seront détaillés ci-après :

- ***Lois de la physique gouvernant l'Univers***
- ***Origine et évolution de l'Univers***
- ***Fonctionnement global du système Soleil-planètes***
- ***Formation et évolution du système solaire, exoplanètes, habitabilité et planétologie comparée***
- ***Processus physiques de la matière***
- ***Sciences de la vie et exploration humaine de l'espace***

Les recherches en Sciences de l'Univers et Exploration (SUE) nécessitent un accès à l'espace, aux côtés de télescopes ou d'installations au sol. Il ne s'agit pas seulement de nouveaux projets car plusieurs missions spatiales, en opération de longues années après leur lancement (certaines pour plus de 25 ans, ex. Mars Express, SOHO, XMM-Newton), permettent aujourd'hui encore à la communauté scientifique d'obtenir des résultats de haut niveau. Ainsi entre 2019 et 2023, 39 publications internationales de rang A sur les 100 les plus citées dans le domaine AA utilisent des données de missions spatiales au leadership français comme Planck ou Gaia. Parmi ces 39 publications, la France détient le deuxième plus grand nombre d'auteurs ou co-auteurs principaux en Europe (6) derrière les Etats Unis (15). Ces succès et la moisson de résultats originaux obtenus depuis le SPS 2019, dont certains seront mentionnés ci-dessous, rendent compte du dynamisme de la communauté française et du Cnes qui sont devenus des partenaires privilégiés pour les agences spatiales dans le monde (Etats Unis, Japon, Chine, Emirats Arabes Unis, etc.). Ces résultats traduisent la forte implication des équipes françaises et du Cnes dans l'élaboration de missions spatiales ambitieuses, dans l'exploration d'objets de notre système solaire, dans la réalisation des charges utiles, dans l'exploitation de la basse orbite terrestre et dans l'analyse des données collectées ou archivées.

2. AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

Comme il serait vain de tenter un bilan exhaustif de toutes les avancées scientifiques depuis 2019, seules quelques-unes sont présentées ici, les rapports des GTs mettant en lumière davantage de résultats scientifiques.

2.1. LOIS DE LA PHYSIQUE GOUVERNANT L'UNIVERS

Le cadre des modèles décrivant l'Univers et ses constituants est globalement établi, mais notre compréhension des lois de la physique qui le régissent reste incomplète. Nous ne savons toujours pas comment unifier la relativité générale et les théories quantiques, si la relativité générale décrit correctement la gravitation dans tous les régimes, quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire, ou comment expliquer l'inflation cosmique.

Des avancées majeures en physique fondamentale ont été réalisées ces dernières années par la communauté française. En 2022, l'analyse des données de Microscope, collectées de 2016 à 2018, a amélioré de deux ordres de grandeur la limite supérieure sur une violation possible du principe d'équivalence, la portant à 10^{-15} . Ces résultats, combinés avec l'analyse des données du laser lune ou des éphémérides planétaires améliorées par les dernières données Gaia, conduisent à la réjection de toute une famille de modèles/théories unifiant la gravitation avec les autres interactions. Depuis le dernier SPS, deux événements majeurs ont concerné le domaine des ondes gravitationnelles. Tout d'abord, l'adoption de Lisa par l'Esa en janvier 2024 marque un tournant pour la communauté française fortement impliquée dans cette mission large de l'Esa. Ensuite, les collaborations Pulsar Timing Array impliquant fortement la France ont obtenu la première indication forte de l'existence d'ondes gravitationnelles, autour de quelques nanoHertz en juin 2023. Ces ondes pourraient être émises par des sources similaires à celles qui seront observées par Lisa. Enfin, la combinaison des derniers résultats (2020) du satellite Planck avec ceux des observatoires au sol impose des contraintes strictes sur le fond d'ondes gravitationnelles primordiales.

Sur le front de l'Univers sombre, ces cinq dernières années ont permis d'éliminer de nombreux candidats matière noire grâce aux travaux d'équipes françaises, notamment au grand collisionneur de hadrons du CERN. La recherche indirecte dans les objets astrophysiques se poursuit donc notamment avec l'utilisation des données du satellite Gaia. Concernant la nature de l'énergie noire, les résultats du relevé sol de galaxies DESI, en avril 2024, indiquent une accélération de l'expansion de l'Univers due à une constante cosmologique présentant de petites déviations et suggérant une énergie noire évoluant au cours de l'histoire de l'Univers. Dans un avenir proche, le satellite Euclid nous apportera des éléments de réponse sur l'origine de l'accélération de l'expansion.

2.2. ORIGINE ET ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

Ici, la question centrale est de savoir comment l'Univers s'est formé et a évolué, sous l'effet de processus comme la gravité, la turbulence ou le champ magnétique, etc., dans la diversité des milieux astrophysiques, depuis les galaxies, amas et filaments cosmiques aux étoiles, disques protoplanétaires et planètes. Pour répondre à cette question, il faut avoir accès aux premiers instants de l'Univers car ils déterminent les perturbations de matière donnant naissance aux galaxies. Les résultats de Planck obtenus en 2020 confortent une origine liée à l'inflation cosmique. Il faut aussi connaître les conditions dans lesquelles les galaxies vont se former et évoluer. Comprendre la récente phase d'accélération de l'expansion de l'Univers est critique car ce phénomène régit le taux de croissance des structures cosmiques et donc leur évolution dans le temps. Inversement, en mesurant la distribution et les formes des galaxies au cours du temps, il est possible d'étudier l'accélération de l'expansion et son origine. Euclid, lancé en juillet 2023, apportera des éléments de réponse à ces questions et les programmes Early Research Observations confirment les excellentes performances qui augurent des succès à venir de son exploitation scientifique.

D'autre part, il faut suivre la formation et l'évolution des étoiles et des galaxies, notamment la coévolution des galaxies avec leurs trous noirs super-massifs centraux et la structuration de la matière dans l'Univers. Aux plus grandes échelles spatiales, l'organisation de la matière en grands filaments de la toile cosmique a suscité un fort intérêt, en particulier avec la première détection par les équipes françaises du gaz chaud qu'ils contiennent, dans les données Planck, ROSAT et dans les premières données du relevé eRosita. L'observation dans le

domaine des rayons X et aux plus hautes énergies permet d'étudier la nature et les propriétés des phénomènes violents ou transitoires dans l'Univers. L'observation grâce à eRosita d'une nova pendant son éruption, celle d'un sursaut gamma avec le Fermi Gamma ray Telescope ou encore la détection d'un écho émis par le trou noir central de la Galaxie (SgrA*) il y a 200 ans grâce à l'Imaging X-ray Polarimetry Explorer sont autant d'exemples illustrant les futures avancées qui seront réalisées dans un très proche avenir par des missions telles que Svom (lancement juin 2024) ou Einstein Probe.

A l'échelle de notre Galaxie, l'exploitation scientifique de la mission Gaia par la communauté française se poursuit changeant notre vision de l'environnement local. Grâce à Gaia-DR3, une solution astrométrique est disponible pour 1,46 milliard de sources et une cartographie chimique de la Galaxie a pu être réalisée. L'histoire de la Voie Lactée en est bouleversée car on détecte des restes de nombreuses fusions avec d'autres galaxies plus petites, étalées sur 10 milliards d'années.

Le lancement de JWST, en décembre 2021, a marqué un autre tournant dans notre compréhension de l'évolution de la matière depuis les plus petites jusqu'aux plus grandes échelles. Des galaxies lointaines, parmi les premières à s'être formées, sont observées pour comprendre la manière dont l'Univers a été ré-ionisé. Avec le JWST, il a été possible de détecter de plus en plus de molécules organiques complexes dans des disques proto-planétaires et de déterminer les propriétés physico-chimiques des glaces pré-stellaires, conduisant à des avancées significatives dans l'identification des processus de formation des étoiles et des systèmes planétaires.

2.3. FONCTIONNEMENT GLOBAL DU SYSTÈME SOLEIL-PLANÈTES

Pour comprendre le fonctionnement global du système Soleil-planètes, il est nécessaire de considérer les phénomènes physiques qui opèrent dans le Soleil et ceux impliqués dans son interaction avec les planètes du système solaire. Il s'agit donc de comprendre l'ensemble de la chaîne des interactions Soleil-planètes, de l'intérieur du Soleil à son atmosphère et ses événements éruptifs, leur propagation et interaction avec le vent solaire. Puis il faut se pencher sur la réponse des environnements ionisés des planètes à ces sources d'énergie variables, sur la création et la dynamique des magnétosphères et ionosphères des planètes du système solaire et leur couplage avec leurs atmosphères neutres et/ou leurs surfaces.

Le domaine de recherche a connu des avancées scientifiques importantes parmi lesquelles des nouvelles contraintes observationnelles sur la propagation des éruptions et des particules énergétiques dans le milieu interplanétaire, essentielles pour déterminer leur capacité à causer une perturbation géomagnétique, ou l'observation des plus petites éruptions solaires dans la basse couronne dans l'extrême ultraviolet, avec l'instrument EUI de Solar Orbiter, qui pourraient jouer un rôle dans le chauffage de la couronne solaire. On notera aussi la cartographie du vent solaire dans l'héliosphère interne avec les instruments *in situ* de Solar Orbiter (notamment RPW et SWA/PAS sous responsabilité française) et Parker Solar Probe, qui a par exemple permis de mettre en évidence le rôle des ondes de sifflements (whistler) sur l'isotropisation des électrons énergétiques qui devraient sans cela s'aligner avec le champ magnétique. Un résultat récent obtenu avec Parker Solar Probe montre l'omniprésence, près du Soleil, de structures alfvéniques créant un retournement du champ magnétique qui structure fortement le vent jeune et pourrait jouer un rôle dans son bilan énergétique. Ces avancées sont cruciales pour comprendre le fonctionnement global du système Soleil-planètes ainsi que pour alimenter les activités liées à la météorologie de l'espace. Dans ce domaine, la communauté française est devenue un acteur majeur en Europe comme l'atteste le succès de la European Space Weather Week organisée en France en novembre 2023. Une nouvelle étape dans l'exploration des magnétosphères planétaires a également démarré avec la mission de l'Esa Bepi Colombo qui a livré des premiers résultats en phase de croisière vers Mercure lors d'un survol de Vénus, et avec le lancement de la sonde Juice en avril 2023 vers Ganymède et le système de Jupiter.

2.4. FORMATION ET ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE, PLANÈTES, HABITABILITÉ ET PLANÉTOLOGIE COMPARÉE

Alors que l'exploration des planètes du Système Solaire avance à grand pas et que nous découvrons de plus en plus de systèmes exoplanétaires, il nous reste toujours à élucider des étapes de la formation et de l'évolution de notre Système Solaire, ainsi que ses différences et similitudes avec les autres systèmes planétaires. La détection de nouveaux types d'exoplanètes à laquelle Cheops a contribué, et la caractérisation chimique de certaines atmosphères grâce au JWST, posent les bases d'une taxonomie planétaire universelle. Les résultats obtenus ces dernières années avec des missions spatiales telles que ExoMars/TGO et Mars 2020 donnent un nouvel essor à la planétologie comparée : il s'agit de 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 centrale concerne l'émergence de la complexité, depuis le milieu interstellaire jusqu'à l'habitabilité des planètes. Il s'agit de savoir comment la Vie est apparue sur Terre, et si des formes de vie existent ou ont existé ailleurs. Cela nécessite (i) de comprendre les processus de formation des molécules prébiotiques dans le milieu interstellaire et les environnements planétaires, (ii) de déterminer où et comment ont été réunies des conditions favorables à l'apparition et au maintien de formes de vie, et (iii) d'identifier des biomarqueurs pertinents. Les données récentes des missions Mars Science Laboratory et Mars 2020, opérant dans des cratères d'impact différents, ont montré que la planète Mars a été habitable et la recherche *in situ* de traces de vie passée revêt donc une importance considérable. Néanmoins cette recherche exhaustive passe impérativement par l'analyse *ex situ* et détaillée des échantillons de roches actuellement collectés par le rover Perseverance qu'il faudra rapporter sur Terre. De même, les découvertes récentes sur l'existence de zones habitables inédites dans des systèmes exoplanétaires ou de conditions habitables sur les satellites glacés des planètes géantes, ouvrent de nouvelles perspectives, notamment avec les contributions françaises dans les missions Nasa Dragonfly vers Titan et Europa Clipper, sur les environnements favorables à l'émergence et au développement du vivant. Enfin, les analyses d'échantillons ramenés de l'astéroïde carboné Ryugu sur Terre par la sonde Hayabusa 2 confirment l'importance de la chimie carbonée des petits corps dans l'apport et l'accumulation de matériaux organiques nécessaires à l'émergence de la vie.

2.5. PROCESSUS PHYSIQUES DE LA MATIÈRE

Les sciences de la matière étudient les propriétés physiques universelles à des échelles mésoscopiques, intermédiaires entre microscopiques et macroscopiques. Pour ce faire, il est nécessaire de s'affranchir de la pesanteur car les phénomènes d'organisation de la matière aux échelles intermédiaires, sont impactés voire causés par la gravité (convection, pression hydrostatique, sédimentation ou drainage, etc.) et affectent les états de la matière dans les expériences menées en laboratoire. Les expériences ainsi réalisées, outre leur intérêt pour leurs aspects fondamentaux, peuvent avoir des applications importantes dans de nombreux domaines technologiques ou sociétaux.

Grâce à l'accès à différents moyens (*International Space Station (ISS)*, vols paraboliques, fusées sondes, tour à chute libre) mis à disposition dans un contexte Esa, Cnes et international, la communauté française est parmi les plus actives et reconnues en Europe. Elle a pu être impliquée dans la réalisation de nombreuses expériences dans différents domaines : matière molle et fluides complexes, états et transition d'état de phases de la matière, instabilités, transfert et ondes. La période a vu la montée en puissance des activités dans le thème biophysique, conduisant à sa sélection pour un vol en fusée sonde. Parmi les faits marquants les plus importants dans les dernières années, on peut noter les avancées dans la compréhension et la modélisation des phénomènes qui gouvernent la croissance d'une bulle de vapeur sur une paroi surchauffée, et les échanges de chaleur associés à son évaporation. Également, en solidification des matériaux transparents dans l'insert Declic/DSI, des résultats spectaculaires et inédits ont été obtenus sur la sélection microstructurale et la dynamique

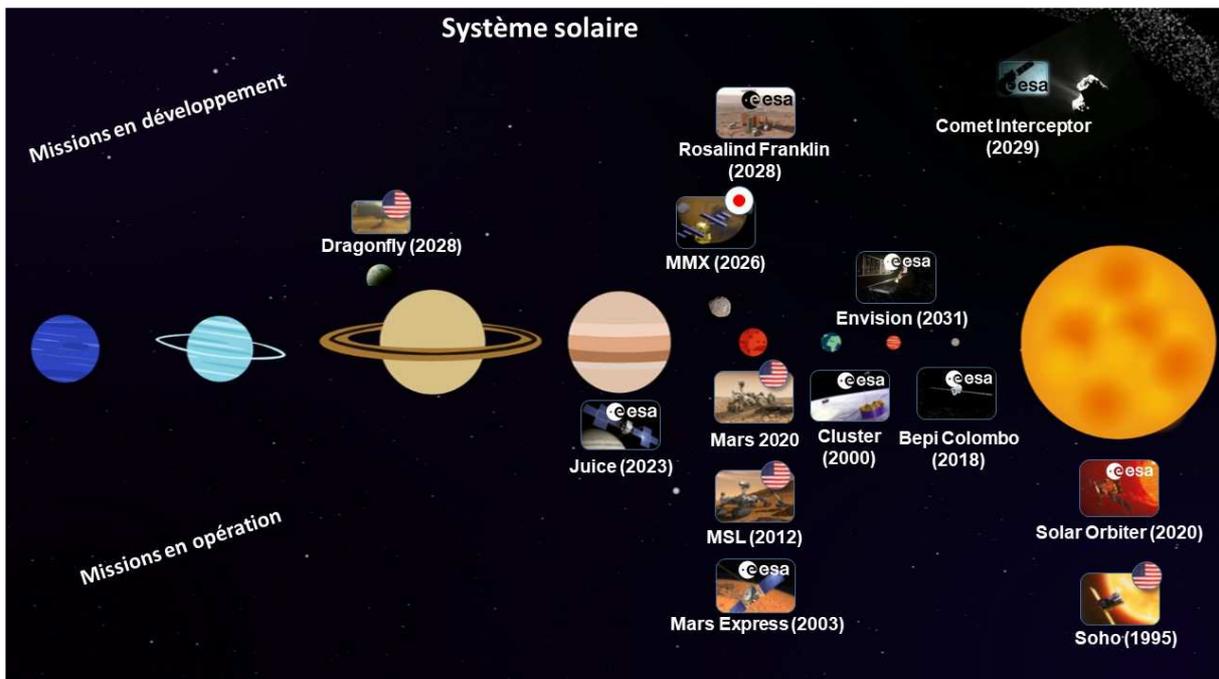
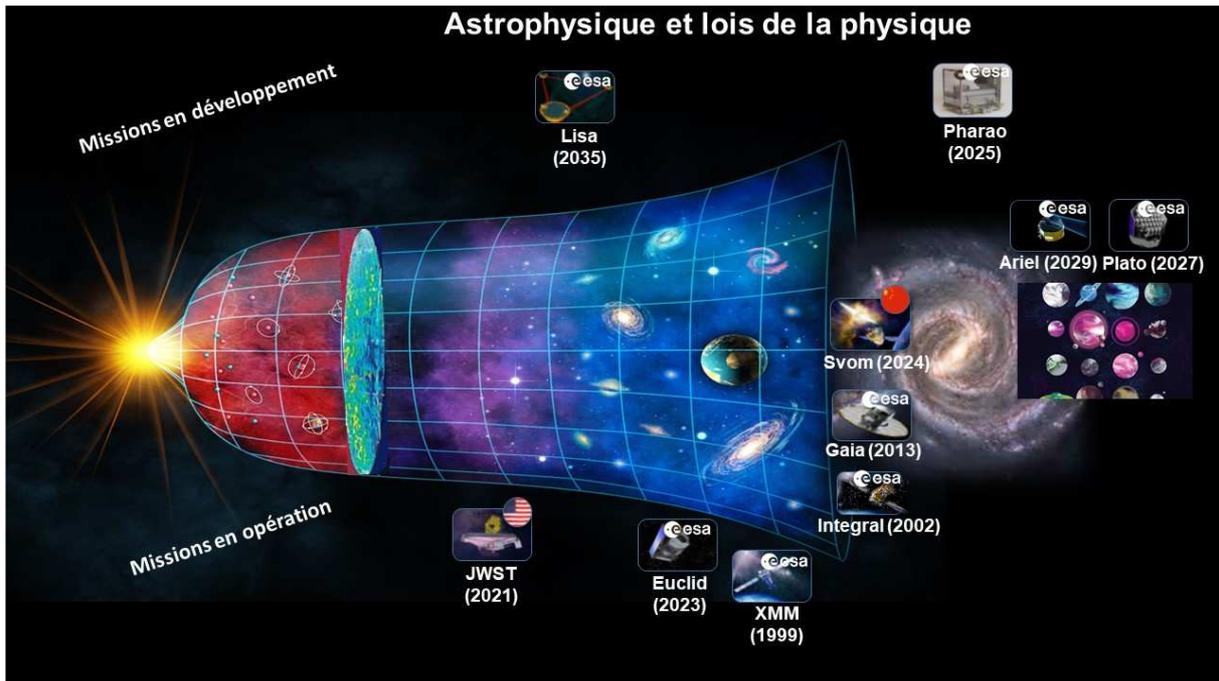
d'ordre/désordre sous l'influence de distorsions du champ thermique ou de la cristallographie (compétition de grains, "cellules solitaires"). Les expériences sur les mousses humides ont quant à elles permis de mieux identifier la transition entre deux régimes de mûrissement, étape dans la fabrication des matériaux qui peut influencer sur leur comportement mécanique. Par ailleurs, le Cnes et les scientifiques ont avancé sur la définition de nouveaux instruments spatiaux dédiés à l'étude de la microphysique des nuages, la combustion bas carbone et les turbulences d'onde.

2.6. SCIENCES DE LA VIE ET EXPLORATION HUMAINE DE L'ESPACE

L'exploration humaine est liée aux progrès technologiques ; elle sert une variété d'intérêts économiques et politiques nationaux et internationaux et offre des opportunités pour faire progresser la science et en particulier la science du vivant. Les mesures des précurseurs de l'exploration humaine concernent principalement des aspects pratiques de santé, de sécurité et d'ingénierie, ainsi que des aspects de science fondamentale. De plus, l'exploration humaine donne accès à des études dans des conditions particulières, avec une gravité et des niveaux de radiation modifiés conduisant à des nouveaux modèles d'adaptabilité du vivant, et des progrès en médecine de la sédentarité, télémédecine et médecine d'urgence.

Grâce au soutien du Cnes, de nombreuses études ont été initiées sur les effets du bain de radiation gamma avec MarSimulator, la médecine spatiale d'urgence et l'immersion sèche qui permet de mimer les effets précoces du vol spatial. Des avancées scientifiques majeures ont été enregistrées en gravité modifiée et notamment sur les effets des radiations (dose/nature) sur le vivant (santé et support vie) appliquées à l'homme et au végétal dans les conditions martiennes et lunaires.

Les études sur les modèles précliniques (rongeurs et ours hibernant) ont permis de proposer la nécessité de coupler exercice physique et apports nutritionnels particuliers pour réduire les effets atrophiques mis en évidence pendant des vols ISS longue durée concernant les altérations physiologiques en vol et post-vol de l'architecture osseuse, la fonction vasculaire et le système immunitaire. De plus, les expériences au sol en immersion sèche, bed-rest et confinement ont mis en avant des différences homme-femme et des effets sur la réponse immunitaire. Enfin, des résultats majeurs ont été obtenus en médecine spatiale grâce aux développements significatifs de l'instrumentation et de la pratique médicale permettant d'améliorer les échographies et de proposer des gestes de médecine d'urgence.



Missions spatiales en astronomie (haut) et système solaire (bas) avec contributions françaises importantes. Le drapeau indique l'agence maîtresse d'œuvre.

3. BILAN PROGRAMMATIQUE DEPUIS LE SPS 2019

Après une période marquée par des retards et surcoûts importants, le programme Science de l'Esa a engrangé de nombreux succès depuis 2019. Il y a eu le lancement par l'Esa de la mission Nasa JWST (2021), les lancements de Cheops (2019), Solar Orbiter (2020), Juice (Avril 2023) et Euclid (Juillet 2023). Par ailleurs, les expériences sur l'ISS et les avancées dans les éléments pour l'exploration robotique et humaine de la Lune et de Mars se sont poursuivies.

Le tableau ci-dessous résume la situation des priorités majeures identifiées lors du SPS 2019, en indiquant l'objectif scientifique principal, les activités mises en place depuis le précédent SPS et la situation actuelle.

| Mission | Objectifs scientifiques | Activités depuis SPS2019 | Situation actuelle |
|---|--|---|---|
| Athena (Esa) | Observatoire en rayons X pour l'étude de l'Univers chaud et énergétique | Phase d'étude et de prototypage Reconfiguration en NewAthena suite aux coûts Esa trop élevés | Etudes complémentaires en vue de l'adoption début 2027 Lancement 2037 |
| Lisa (Esa) | Observatoire d'ondes gravitationnelles | Phase d'étude, adoption Esa et engagement Cnes (2024) | Engagé Lancement 2035 |
| Litebird (Jaxa) | Recherche des preuves de l'inflation | Phase d'étude | Etudes complémentaires Lancement 2032 |
| Spica (Esa) | Galaxies, milieu interstellaire | Etudes Spica mais abandon Esa pour raison de coût Instruction de contributions Cnes à Prima et Firsst (Nasa) | Spica abandonné Prima et Firsst en compétition Probe à la Nasa ; Lancement 2032 |
| Ariel (Esa) | Etude des exoplanètes | Adoption Esa et engagement Cnes (2021) | Engagé Lancement 2029 |
| Retour d'échantillons martiens (Nasa/Esa) (Jaxa) | Recherche de traces de vie passée Etude des lunes de Mars ; retour d'échantillons de Phobos | Travaux Nasa et Esa (ERO) sur MSR ; Lancement du projet Markus (gestion des échantillons) du PEPR Origins Développement et livraison des contributions françaises à MMX | Coût du programme MSR jugé trop élevé côté Nasa, recherche en cours d'alternatives moins coûteuses Intégration MMX ; Lancement 2026 |
| Exomars (Esa) | Recherche de traces de vie passée | Livraison des contributions françaises et intégration Reconfiguration avec la Nasa suite au retrait de Roscosmos | Développements complémentaires liés au changement d'organisation Lancement 2028 |
| Géantes glacées | Systèmes Uranus et Neptune | Decadal Survey US : 1 ^{ère} priorité Uranus Orbiter & Probe | En attente de démarrage des études Nasa |
| Priorité sans mission définie en 2019 | Observations simultanées des échelles fluides, ioniques et électroniques | Sélection et phase d'étude d' Hélioswarm (Nasa) Pré-sélection de Plasma Observatory (Esa, M7) | Fin des études Helioswarm ; engagement à venir (Lancement 2029) Début des études Plasma Observatory (Lancement 2035) |
| STE-Quest (Esa) | Universalité de la chute libre | Candidature STE-Quest aux M7 Esa non retenue | Pas de cadre de réalisation identifié actuellement |
| Accès aux moyens de micro-gravité | Sciences de la matière et du vivant dans l'espace | 2 nd vol ISS de Thomas Pesquet Vols paraboliques | Accès avion zéroG et ISS toujours assurés |

Plusieurs des priorités du SPS 2019 ont pu être réalisées et la communauté française peut se féliciter de ce **bilan programmatique positif**. Il y a en effet une excellente implication de la France dans le programme Cosmic Vision de l'Esa, une très bonne participation dans des programmes bilatéraux, notamment avec les Etats Unis, ainsi qu'une impressionnante moisson de résultats scientifiques. Depuis le dernier SPS, les développements par le Cnes de ballons, incluant des vols longues durées, et des nacelles, ainsi que le soutien aux expériences sous ballons Nasa, ont été mis à profit dans de nombreux domaines du périmètre Ceres pour des mesures directes ou pour la préparation de mesures depuis l'espace (par exemple avec Euso-SPB, Taranis-ballon, Bisou, etc).

4. PROSPECTIVE ET RECOMMANDATIONS DU CERES

4.1 PRIORITES THEMATIQUES

La prospective scientifique s'est nourrie de celles élaborées au niveau national (CNRS), européen (Astronet 2023, Esa Voyage 2050) et international notamment la National Academy of Sciences, Engineering and Medicine (Nasem) qui a élaboré les Decadal Surveys Astronomie et Astrophysique (DSAA) en 2020, planétologie et astrobiologie (PADS) en 2022, Biological and Physical Science (BPS) en 2023, et héliophysique (en cours).

Le Ceres a dégagé des priorités scientifiques dont les majeures¹ sont détaillées ci-dessous avec leur cadre de réalisation, et a identifié des actions pour préparer l'avenir. Il aborde aussi des questions liées à l'organisation, les ressources et la stratégie du programme spatial français.

4.1.1 Aux origines de l'Univers et des galaxies

Invoqué pour expliquer l'origine des perturbations de matière qui donneront naissance aux structures cosmiques (galaxies, amas) et pour rendre compte de la phase d'expansion exponentielle de l'Univers, le processus physique associé à l'inflation reste un mystère qu'on étudie en observant l'Univers très jeune. Cette priorité scientifique, affirmée lors des précédents SPS, nécessite la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique (CMB) aux grandes échelles angulaires, inaccessibles depuis les télescopes au sol, qui mettra en évidence le fond d'ondes gravitationnelles primordiales reliquat du Big-Bang. Le Ceres réaffirme cette priorité scientifique majeure. La mission **LiteBIRD** décidée par la Jaxa (lancement horizon 2032) constitue aujourd'hui le meilleur cadre de réalisation envisageable. La France a la responsabilité du télescope à hautes et moyennes fréquences. Cette importante contribution d'opportunité consolidera l'expertise française et sa visibilité internationale acquise grâce au succès de la mission Planck.

La spectroscopie du CMB, identifiée dans le cadre du programme Voyage 2050 pour l'étude de Univers très jeune, constitue une perspective future qu'il convient de préparer. Cette mesure révélera l'histoire thermique de l'Univers apportant des informations uniques à toutes les étapes de son évolution depuis l'inflation.

Une priorité scientifique majeure pour comprendre la gravité est d'améliorer les contraintes du test du principe d'équivalence pour identifier quels sont les modèles qui permettent l'unification relativité générale/théories quantiques. Pour cela, il sera nécessaire de mesurer les différences d'accélération grâce à une mission comme **Microscope 2**, qui pourrait être proposée dans le cadre programmatique des missions de type F de l'Esa. Dans le domaine des ondes gravitationnelles, **Lisa** (lancement prévu en 2035) est une priorité majeure dans laquelle la communauté poursuivra son implication de premier plan. Lisa ouvrira aussi la voie à l'étude de la coalescence des trous noirs super-massifs et celle de la découverte des étoiles binaires dans notre Galaxie.

4.1.2 Structuration et évolution de la matière à toutes les échelles

La structuration de la matière, depuis les échelles des filaments cosmiques et des amas de galaxies jusqu'à celles du milieu interstellaire et des étoiles, est le résultat de l'effondrement gravitationnel des perturbations de densités initiales et des processus physiques complexes qui affectent la matière ordinaire (les baryons). Ces processus interviennent à différentes échelles, spatiales et temporelles, et conditionnent les cycles des baryons dans les galaxies.

Dans ce contexte, l'environnement des objets compacts et des trous noirs, la co-évolution des galaxies avec leurs trous-noirs supermassifs ou encore la croissance des amas de galaxies déterminent le cycle des baryons chauds ($T > 10^5 \text{K}$) qu'on ne peut étudier qu'avec des mesures en spectroscopie haute résolution dans le domaine des rayons X, accessible uniquement depuis l'espace. Cette priorité majeure, déjà identifiée lors des précédents SPS, a souffert de retards et d'une redéfinition. Elle est réaffirmée par le Ceres et elle a maintenant

¹ Des priorités substantielles ou modérées sont présentées dans les rapports des Groupes thématiques.

pour cadre de réalisation la mission large de l'Esa, **NewAthena** (adoption prévue en 2027), dans laquelle la France est responsable du spectromètre à intégrale de champ X-IFU.

Comprendre le cycle des baryons froids, en étudiant les milieux interstellaires galactique et extragalactique et en déterminant les processus physiques en jeu, est la seconde partie du puzzle de la formation et de l'évolution des structures. En effet ce cycle sous-tend la formation des étoiles et galaxies dans l'Univers et il nous éclaire sur la formation des disques protostellaires dans lesquels émerge la complexité moléculaire et se forment les systèmes exoplanétaires. Réaliser cette priorité scientifique majeure nécessite des mesures spectroscopiques haute résolution et polarimétriques de l'infrarouge moyen à lointain, uniquement accessibles depuis l'espace. Dans un contexte programmatique où aucune mission Esa n'est envisageable dans ce domaine avant l'horizon ~2040, il faut assurer la participation française aux projets de la Nasa tels que **Prima** (PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics), **Firsst** (Far-IR Spectroscopy Space Telescope) ou **Saltus** (Single Aperture Large Telescope for Universe Studies), en compétition dans le cadre de l'appel **APEX 2023** (pour lancement prévu en 2032) ouvert pour des missions de classe Probe.

4.1.3. Des origines du système solaire à la recherche des traces de vie

Les récentes découvertes sur les systèmes exoplanétaires, et les développements théoriques sur leur formation, montrent qu'il reste encore beaucoup à comprendre sur l'architecture de notre système planétaire. La formation des planètes géantes glacées, Uranus ou Neptune, est une priorité scientifique majeure pour comprendre pourquoi elles diffèrent de Jupiter et Saturne par leur structure et leur composition atmosphérique, tout en apparaissant représentatives de certaines exoplanètes. Elle nécessite la mesure de leur structure interne en cartographiant les champs gravitationnel et magnétique et une meilleure détermination de l'enrichissement en éléments lourds au sein de leurs atmosphères, en effectuant des mesures *in situ* (par exemple grâce à une sonde d'entrée, de type Galileo). Le PADS a identifié comme première priorité une future mission Flagship vers **Uranus** qui représente une opportunité stratégique unique pour que la France, et/ou l'Europe, contribue à de nombreux instruments dont le développement devrait commencer en 2027.

Pour comprendre pourquoi seule la Terre possède des conditions habitables aujourd'hui, il est particulièrement important de connaître les origines de la matière organique et les phases de l'eau dans les planètes telluriques. La réalisation de cette priorité scientifique majeure, identifiée lors des précédents SPS, repose sur le programme d'exploration, notamment de Mars. Plusieurs missions prévues permettront de valoriser les expertises et l'investissement français dont : **ExoMars/Rosalind Franklin**, du programme optionnel Terrae Novae de l'Esa avec contribution Nasa et prévue pour 2028, ainsi que le programme **Mars Sample Return (MSR)** de la Nasa avec forte implication de l'Esa, en cours d'évaluation technologique et programmatique pour un retour d'échantillons à l'horizon 2035.

L'exploration d'autres mondes potentiellement habitables dans le système solaire externe (e.g. satellites des planètes géantes) sera de nouveau sur le devant de la scène à l'horizon 2045 avec la **quatrième mission large de l'Esa** dans le cadre Voyage 2050, décidée en avril 2024, vers Encelade, lune de Saturne. Cette mission caractérisera la structure interne et l'océan d'eau liquide en sous-surface afin d'y rechercher des biosignatures et bio-indicateurs. Les satellites de glace sont aussi des priorités déclarées dans le PADS et le DSAA.

Des milliers de planètes extrasolaires ont été découvertes, mais pour comprendre la formation des systèmes exo-planétaires et y rechercher des conditions habitables dans des planètes semblables à la Terre, il faut avoir accès à leur observation directe par imagerie haut contraste et caractériser les propriétés physiques et chimiques de leurs atmosphères par spectroscopie. Suivant la recommandation du DSAA, la Nasa a identifié comme première priorité une future mission de type flagship, **Habitable World Observatory (HWO)**. Les concepts à l'étude offrent une opportunité de contribution française importante. En parallèle, dans le cadre du programme Voyage 2050 de l'Esa, une mission large à l'horizon post-2045, **Large Interferometer for Exoplanets (Life)**, est envisagée pour caractériser spectralement les atmosphères des exotérres.

4.1.4. Fonctionnement global du système Soleil-planètes

Le Soleil et les planètes du système solaire sont baignés dans des milieux ionisés couplés à leurs interfaces et dont les propriétés sont régies par des processus physiques comme la reconnexion magnétique, les chocs, la turbulence, l'accélération et le chauffage des particules, et l'émission de rayonnements électromagnétiques.

Pour comprendre ce système complexe Soleil-planètes, il faut élucider les processus de chauffage et de dissipation dans l'atmosphère du Soleil et dans le vent solaire. Cette priorité scientifique majeure sera réalisée, dans le cadre de contributions d'opportunité à des missions Jaxa et Nasa, via deux types de mesures complémentaires. D'une part, il s'agira d'effectuer des mesures haute résolution de l'atmosphère solaire sur une large gamme de températures grâce au spectrographe Extreme UV de la mission **Solar-C** (Jaxa) prévue pour 2028 et à laquelle la France contribue. D'autre part, il s'agira de réaliser les premières mesures multi-échelles (fluides et ioniques) simultanées dans le vent solaire grâce à la constellation de 9 satellites de la mission **HelioSwarm** (Nasa), prévue pour 2029, et qui comprend une importante contribution française.

Les processus à l'œuvre dans l'énergisation des particules et le transport de l'énergie jouent un rôle clé dans la formation et l'évolution des environnements radiatifs de la Terre et des planètes du Système Solaire. Les comprendre et en évaluer l'impact est une priorité scientifique majeure qui nécessite des mesures *in situ* multi-points et multi-échelles dans les magnétosphères et ionosphères planétaires, notamment de la Terre et de Mars. Cette priorité scientifique majeure repose donc sur deux concepts en compétition pour la mission M7 de l'Esa et dans lesquels la France a des contributions importantes: **Plasma Observatory** qui effectuera des mesures multi-échelles dans la magnétosphère terrestre et **M-Matisse** (Mars Magnetosphere ATmosphere Ionosphere and Space-weather Science) qui, grâce aux observations simultanées de deux orbiteurs, cartographiera l'ionosphère et la basse atmosphère de Mars en découplant les variations spatiales et temporelles.

4.1.5. La matière dans (presque) tous ses états

Pour comprendre les propriétés universelles qui gouvernent les états de la matière et leurs transformations, il est nécessaire de s'affranchir de la pesanteur. Le maintien de l'accès aux moyens de microgravité est donc une nécessité.

La première priorité scientifique est d'identifier les états fondamentaux de la matière, et de savoir comment s'opèrent les transitions entre états (e.g., solidification, évaporation, ébullition, fluides supercritiques). Parmi les expériences clé, on note celles ayant pour but l'étude de la combustion bas carbone de matière organique dans l'eau supercritique ou encore celles visant à mettre en évidence les propriétés microphysiques des nuages et la condensation de l'eau. La réalisation de ces priorités nécessitera le développement de l'instrument **Declic-Evolution**, avec les inserts **Aerosol** et **SCWO**, dans la continuité de la collaboration avec la Nasa.

Comprendre la dynamique des fluides et les phénomènes comme la convection, ou l'apparition des instabilités et la propagation des ondes, revêt un intérêt fondamental en physique, et pour le rôle que ces processus jouent dans les fluides naturels en géophysique (e.g., océans, atmosphère), en astrophysique (e.g., étoiles, disques d'accrétion, milieu interstellaire) ou pour les applications industrielles (e.g., exploration spatiale). L'étude des propriétés statistiques des grandes échelles en turbulence et la dynamique d'interface, permise par l'instrument **Fluidics-L**, proposé par la communauté française dans le cadre collaboratif avec l'Esa, permettra d'atteindre les objectifs de cette priorité majeure.

4.1.6. Des sciences de la vie dans l'espace à l'exploration humaine

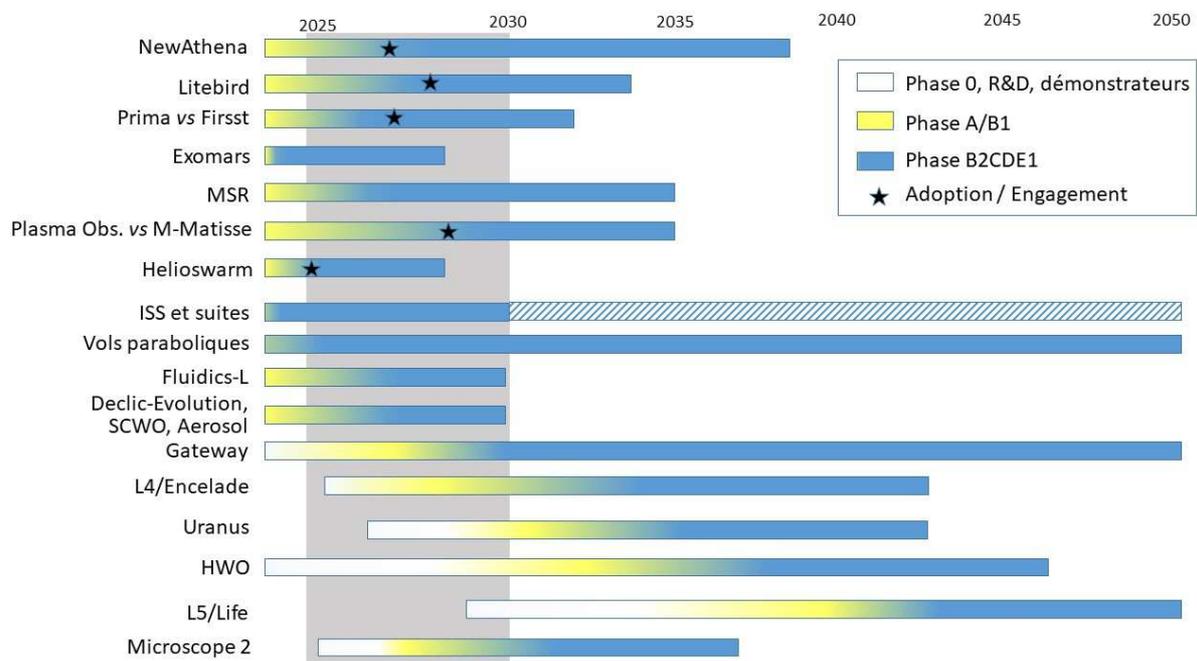
Le regain d'intérêt pour l'exploration de la Lune, illustré par les programmes de la Nasa (mission Artémis) et d'autres agences spatiales, laisse envisager un nombre croissant de missions robotiques et habitées vers la Lune et à plus long terme vers Mars. Dans ce contexte, il s'agira de préparer et d'accompagner les équipages lors de vols habités, notamment sur la Lune. Cette perspective implique des séjours dans l'espace plus longs et plus éloignés de la

Terre avec des expositions étendues à des niveaux de radiation plus élevés, des délais de contacts avec la Terre allongés, et l'impossibilité de retour rapide sur Terre en cas d'urgence. Protéger la santé des équipages représente une priorité majeure des activités de recherche en science de la vie. Elle se basera sur un programme de recherche dont les volets prioritaires sont l'adaptation de la médecine d'urgence à l'environnement spatial et le suivi de l'état de santé des équipages, dont notamment le développement de dispositifs de diagnostic et de prise en charge des accidents cardiovasculaires et l'adaptation de la pharmacologie spatiale. Cette priorité repose sur l'accès aux conditions de microgravité. Ces recherches offriront de nombreuses opportunités pour l'étude du vivant dans l'espace conduisant à de possibles retombées applicatives. Le maintien des **vols paraboliques** et la sécurisation de l'**accès à l'ISS et ses successeurs** sont une nécessité ; la perspective du **Gateway** ouvrant de nouvelles possibilités.

Une autre priorité majeure en sciences de la vie est la dimension préventive consistant à assurer la bonne santé des équipages pendant et après les vols. Pour cela, il faudra mieux comprendre l'effet des conditions spatiales sur les êtres humains grâce aux études pré-cliniques et comportementales, notamment en isolement, qui permettront de mettre en place des contre-mesures adaptées et personnalisées incluant l'exercice physique, la nutrition, la pharmacologie ou la centrifugation. De plus, il sera fondamental de trouver des solutions qui rendront possible l'exploration spatiale par les humains en assurant la production d'une alimentation adaptée aux besoins des équipages, en la couplant avec le développement de systèmes bio-régénératifs dans les supports vie des stations. Pour cela, en plus de l'accès à l'ISS, le recours à des expériences embarquées dans des **ballons** et à des **analogues sol** sont prioritaires.

4.2 Synthèse des recommandations

Les priorités majeures du Ceres sont synthétisées sur le chronogramme ci-dessous, avec une indication du phasage potentiel des activités associées. La période de la prospective scientifique est indiquée en grisé.



Synthèse des priorités majeures et programmation associée

5. STRATEGIE

Le Ceres réaffirme l'importance des programmes Science (SCI) et Human and Robotic Exploration (HRE) de l'Esa car ils offrent un cadre de réalisation à des priorités scientifiques en phase avec celles jugées majeures ou substantielles par la communauté française.

Le programme SCI constitue la colonne vertébrale du programme scientifique du Ceres en raison de son financement assuré, et du processus de sélection des missions motivé par la science. Les cadres de ses missions Medium et Large structurent le programme scientifique du Ceres et permettent de réaliser des missions ambitieuses et d'envergure et d'en garantir le financement. Elles offrent la possibilité de contributions françaises significatives, voire de leadership, et offrent une grande visibilité aux réalisations instrumentales et aux expertises scientifiques françaises. Les missions Fast, beaucoup plus petites, ouvrent des opportunités dont la France peut se saisir pour réaliser certaines priorités importantes. La vigueur et le dynamisme du spatial en France reposent sur les programmes de l'Esa, il est donc important que le Cnes continue d'accompagner les communautés pour qu'elles répondent efficacement à ces appels d'offres et qu'elles se saisissent des opportunités présentées.

Le programme Terra novae HRE donne accès aux missions lunaires, martiennes et de micropesanteur. La recherche de traces de vie dans les planètes du système solaire, via la collecte, le retour et l'analyse d'échantillons de Mars, est une priorité majeure réaffirmée par le Ceres. Elle s'appuie sur la partie d'exploration robotique martienne **ExoMars/Rosalind Franklin** et **MSR**. Ces programmes impliquent un ensemble de missions dont la première, pour **MSR**, a été Mars 2020 à laquelle la France a grandement participé en fournissant l'instrument SuperCAM. Le Ceres recommande la poursuite des contributions françaises à ce programme. En lien direct, l'instruction relative à l'enjeu 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, a été réalisée depuis le SPS 2019. Elle conclut à un changement de stratégie en faveur de la nécessité de disposer d'un centre de référence français avec une offre de services certifiés au niveau international pour l'analyse des risques biologiques sur des échantillons solides, qu'ils soient d'origines terrestres ou extraterrestres. Ce centre s'appuierait sur les compétences nationales, les réseaux de biosécurité européens existants et des infrastructures de recherche européennes distribuées. Le Ceres recommande de poursuivre l'instruction de ce dossier en impliquant les communautés scientifiques concernées et en contribuant à l'élaboration des règles de protection planétaire. On notera qu'aucune priorité scientifique majeure actuelle ne requiert un programme d'exploration de la Lune, ou des vols habités vers la Lune ou Mars, mais ils peuvent offrir des opportunités pour des priorités scientifiques substantielles liées au fonctionnement du système Soleil-planètes.

Pour atteindre les objectifs scientifiques prioritaires majeurs des domaines des sciences de la vie et de la matière, l'accès à l'espace sur des temps longs est une nécessité actuellement remplie par l'ISS. Sa désorbitation est programmée pour 2030 et des projets de stations spatiales commerciales en orbite basse, habitées ou automatiques, sont à l'étude. Le Ceres recommande qu'une instruction soit menée pour garantir le maintien de l'accès à l'espace pour les expériences scientifiques au-delà de la fin de l'ISS.

Les programmes SCI et HRE de l'Esa étant tracés jusqu'à l'horizon 2040 et au-delà, les missions d'opportunité et les collaborations bilatérales sont complémentaires et nécessaires pour répondre aux priorités scientifiques. Elles peuvent résulter de sollicitations de partenaires internationaux, cadre qui permet de valoriser les expertises techniques et/ou scientifiques françaises. Avant engagement, les contributions d'opportunité et collaborations bilatérales doivent impérativement répondre aux priorités scientifiques de la communauté et être instruites d'un point de vue technique et budgétaire.

6. PRÉPARATION DE L'AVENIR

Elle englobe l'ensemble des activités soutenues par le Cnes, depuis les R&T amont à la réalisation de démonstrateurs ou aux études de Phase 0 et A, qui permettent de positionner

la communauté scientifique française avec des rôles importants dans les missions et programmes spatiaux ou d'être force de proposition. Depuis l'implémentation des sélections en deux temps pour une Phase A compétitive des missions M de l'Esa, l'évaluation de la faisabilité technique des propositions est un préalable à leur évaluation scientifique. Il est donc crucial que le Cnes conserve un important programme de préparation de l'avenir, notamment en ciblant les activités qui accompagnent les priorités scientifiques majeures et substantielles. Dans certains cas, il conviendra même de réaliser des démonstrateurs pour valider les concepts ou des éléments de concepts instrumentaux. Pour identifier les actions stratégiques, il faut maintenir un dialogue étroit entre le Cnes et les scientifiques notamment à travers les GT. En parallèle, il faut que les laboratoires puissent être en capacité de s'emparer de ces outils (R&D, Phases d'étude, etc.).

Les programmes de R&D sont nécessaires pour améliorer les filières instrumentales d'excellence (e.g., search coil, capteurs de mesure du champ électrique et de densité des plasmas, sismomètres haute performance, spectromètres de masse haute résolution, spectro-imageurs Infrarouge-UV, réfrigérateurs sub-Kelvin, MicroLIBS, etc.) mais il est crucial d'innover et de développer de nouvelles filières. Le Ceres a identifié quelques exemples de R&D stratégiques à explorer et/ou mettre en place, mentionnés sans ordre de priorité :

- Le développement d'un concept de caméra plasma, c'est-à-dire la miniaturisation de 3Dcam, un spectromètre à particule 3D à haute cadence pour la physique cinétique ;
- La spatialisation et l'intégration de dispositifs médicaux comme les capteurs et instruments physiologiques, échographes et peut-être dans le futur IRM ;
- Le développement de la nouvelle génération de sismomètres, Very Broad Band senseurs optiques pour étudier la structure interne des corps du système solaire ;
- Les développements pour la spectropolarimétrie UV qui incluent de nombreux aspects technologiques comme les matériaux et revêtements, les techniques d'adhérence moléculaire des composants, l'efficacité des revêtements UV, etc. ;
- La démonstration sous ballon d'un concept de spectromètre à transformée de Fourier pour mesurer des distorsions spectrales du CMB ;
- Le développement de l'instrumentation pour la collecte, préparation et stockage des échantillons de matière organique, minérale et biologique, et celle pour l'analyse in situ ou dans les installations sur Terre ;
- Le développement d'accéléromètres de nouvelle génération basés sur des capteurs à atomes ultra froids, plus sensibles que les accéléromètres électromécaniques actuels. La démonstration en cours avec Carioqa et Carioqa PMP est fortement soutenue par le Ceres pour son intérêt pour la physique fondamentale dans l'espace.

7. TRAITEMENT ET ARCHIVAGE DE DONNÉES

Une évolution globale observée depuis plusieurs SPS, illustrée par les missions **Planck**, **Gaia**, **Euclid** ou par **Lisa** dans le futur, est la part grandissante des activités liées au segment sol des missions envisagées ou décidées, et leur importance pour atteindre les objectifs scientifiques primaires.

L'amélioration des capteurs et des instruments fait que les signaux mesurés ont aujourd'hui souvent comme frontières les limites fondamentales imposées par le bruit de photon ou celles liées aux effets systématiques instrumentaux. Il est indispensable que les équipes scientifiques continuent de développer des compétences fortes en traitement des données complexes et/ou volumineuses qui couvrent des aspects comme l'analyse d'image, les techniques de dé-mélange (ou séparation) de sources, les données manquantes, l'agrégation de données, l'inférence, etc. Dans ce cadre, l'utilisation des techniques IA ou plus généralement d'apprentissage automatique est grandissante. Cette tendance est partagée avec les thématiques scientifiques dans le périmètre du Tosca. Elle nécessite le renforcement des collaborations avec les communautés des mathématiques appliquées, du traitement du signal et de l'informatique. Le Ceres recommande la mise en place ou le renforcement des outils (e.g., retours d'expérience, R&T ciblées, ateliers, etc.) pour accompagner les communautés scientifiques.

Il est essentiel que les données recueillies par les missions spatiales soient correctement archivées et valorisées car elles constituent des bases de données que les scientifiques utilisent continuellement pour obtenir des nouveaux résultats marquants (e.g., détection de la matière manquante grâce aux données trentenaires du relevé en rayons X ROSAT ou exploitation des données acquises dans la magnétosphère terrestre depuis plus de 20 ans par Cluster). Dans ce contexte et pour les missions sous responsabilité française, la mise en place de pôles de données contribue à valoriser les contributions du Cnes et de la communauté et pourrait conduire à des réductions de coûts en mutualisant les efforts et les infrastructures. Le Ceres estime qu'il est important d'instruire l'intérêt d'un pavage thématique des pôles de données spatiales dans les périmètres Sciences de la vie, Astronomie et Astrophysique et Physique fondamentale. Cette instruction devra intégrer le contexte national (Actions Nationales d'Observation) et international pour optimiser l'utilisation des ressources existantes.

8. ORGANISATION ET RESSOURCES

L'organisation actuelle, fondée sur un partenariat entre le Cnes, les laboratoires des organismes de recherche (CNRS, Cea, etc.) et des universités, adossé à des industriels, permet de réaliser les priorités scientifiques de la discipline. Le Ceres constate que la réduction continue des effectifs, en particulier ITA, relevée dans les laboratoires, conduit à des difficultés grandissantes aussi bien dans la réalisation des instruments que dans l'exploitation des données. En conséquence, une part de plus en plus grande des activités est assurée par des personnels non permanents. Cette situation impacte les activités de préparation de l'avenir dans les laboratoires avec le risque d'assécher leur potentiel d'innovation et leur créativité en termes de concepts instrumentaux nouveaux. Il est donc crucial qu'un équilibre soit trouvé et maintenu entre CDD et personnels permanents sans lesquels la préparation et la réalisation des projets spatiaux, sur le long terme, seraient impossibles.

Le retour scientifique des investissements significatifs, mis dans la réalisation des missions spatiales, est crucial. Il est conditionné par le niveau de soutien à l'exploitation scientifique des données collectées. Dans ce cadre, les lignes budgétaires du Cnes relatives à l'exploitation des missions doivent être préservées et commensurables aux enjeux des missions en opération et à venir. Par ailleurs, il nous semble important de maintenir le rôle unique joué par l'APR dans l'accompagnement scientifique des missions spatiales. Pour compléter le dispositif de soutien à l'exploitation scientifique, la communauté est active dans la recherche de financements externes (European Research Council, Agence Nationale de la Recherche) mais l'absence, tant au niveau national qu'europpéen, d'appels d'offres ciblés pour l'exploitation scientifique des données des missions spatiales est un réel frein. Comme lors du précédent SPS, le Ceres recommande vivement que le Cnes, le CNRS et les organismes de recherche partenaires, et les Universités agissent conjointement auprès des instances nationales et auprès de la commission européenne pour qu'un budget dédié à l'accompagnement scientifique soit mis en place et ouvert à des AO compétitifs.

Pour atteindre leurs objectifs scientifiques certaines missions spatiales nécessitent des données complémentaires au sol, par exemple pour le suivi des alertes, la recherche des petites planètes telluriques, les relevés photométriques des galaxies depuis l'hémisphère Sud. Une coordination étroite entre le CNRS et le Cnes est nécessaire pour assurer le succès des missions dans lesquelles la France est fortement investie.

Le Ceres salue les efforts menés par le Cnes pour minimiser l'impact des problèmes budgétaires sur les priorités scientifiques de la communauté. Cependant, il s'inquiète des évolutions futures et de potentielles baisses du budget qui nuiraient considérablement à la mise en place des priorités scientifiques, même majeures. Il alerte sur la stagnation, voire la réduction, des ressources et le risque de conséquences irréversibles que cela présenterait sur le long terme : affaiblissement des percées scientifiques et perte des talents et compétences français. Le Ceres insiste donc sur la nécessité d'un budget adéquat et pérenne accompagnant la mise en place des priorités scientifiques, qui se déploient sur des périodes

longues, et les différentes activités qui y sont associées de la phase de préparation jusqu'à l'exploitation des missions en opération.

9. CONCLUSIONS

Le Ceres se félicite des succès de la communauté française et de l'engagement de nouveaux projets avec une forte contribution de la France, depuis le précédent SPS. En particulier, ces dernières années ont vu l'implémentation du programme Cosmic Vision de l'Esa avec le lancement des premières missions (Solar Orbiter, Juice, Euclid) et l'adoption des suivantes (Ariel, Comet-Interceptor, Lisa et Envision), et le développement du programme Terrae Novae. La future adoption de NewAthena et la sélection de la mission M7 bouclera ce programme laissant la place à la préparation de Voyage 2050. En parallèle, les contributions stratégiques à des missions d'opportunité de la Nasa et de la Jaxa ont permis de compléter les priorités scientifiques françaises.

Ces succès sont d'autant plus remarquables que nous avons vécu des bouleversements sans précédent qui ont impacté l'écosystème de la recherche spatiale. Nous notons en particulier ceux d'ordre géopolitique, avec l'impact de la guerre en Ukraine sur le programme ExoMars ou sur la mission Euclid ; d'ordre sanitaire avec la pandémie Covid qui a retardé les activités techniques et dont l'impact plus profond reste à évaluer ; et d'ordre financier. Le Ceres salue la résilience de tous les acteurs de l'écosystème de la recherche spatiale qui a permis de poursuivre les projets et activités malgré ces difficultés. C'est le signe que le système de la recherche spatiale française, fondée sur le triptyque laboratoires, Cnes et industries et financé de manière soutenable et adéquate, est bâti sur des fondations solides lui permettant de résister aux remous. C'est un modèle qu'il convient de préserver.

Malgré tout, le bilan global doit être tempéré car certaines des priorités majeures identifiées depuis deux voire trois SPS peinent à voir leur mise en place réalisée. Il en résulte que parmi les priorités majeures du Ceres jusqu'à l'horizon 2040 figurent comme il y a cinq ans des missions en planétologie décidées (surtout vers Mars ou les planètes de glace) ou en astronomie (par ex. Litebird, NewAthena) dont il est crucial d'œuvrer pour qu'elles soient réalisées et d'y consolider la participation française. Les priorités majeures du Ceres incluent aussi de nouvelles missions à venir mutuellement exclusives ainsi que des missions d'opportunité stratégiques. A plus long terme, la fin programmée de l'ISS pose de façon aiguë la question de l'accès à des moyens de microgravité qu'il faut anticiper dès maintenant.

Nous espérons que la recherche spatiale française continuera d'engranger les succès scientifiques et techniques sur la scène européenne et internationale. Face à la tentation du court terme, nous soulignons l'importance des investissements dans l'avenir et dans la recherche fondamentale pour réaliser les succès de la prochaine génération de chercheurs, chercheuses, ingénieures et ingénieurs.