

GRUPE THÉMATIQUE EXOBILOGIE, EXOPLANÈTES, PROTECTION PLANÉTAIRE

Beaulieu Jean-Philippe, Boccaletti Anthony, Fray Nicolas, Mustin Christian (thématicien),
Pilorget Cédric, Pisapia Céline, Quirico Éric, Schoepp-Cothenet Barbara, Selsis Franck,
Szopa Cyril (président), Vuitton Véronique

En quelques années, la problématique de l'habitabilité des corps célestes de notre système solaire et des systèmes exoplanétaires découverts a donné naissance à des champs de recherches très féconds au sein de la planétologie, de l'astrophysique et de l'exobiologie. À partir d'observables à toutes échelles, astronomes, géologues, biologistes, physiciens et chimistes s'efforcent de comprendre l'évolution des systèmes planétaires et essaient d'en dégager les propriétés physiques et chimiques qui seraient favorables à l'apparition ou au développement de formes de vie. Aujourd'hui ce sont les bases systémiques de l'écologie planétaire et d'une « géographie » des habitats au sein des systèmes solaire et planétaires, qui sont posées (Fig. 1). Répondre à la question de l'habitabilité des corps célestes ou de l'existence présente ou passée de formes de vie extraterrestres exige de développer des stratégies et des méthodes de prospection et d'analyse de plus en plus sophistiquées. Les missions spatiales dédiées à l'observation et l'étude des exoplanètes ou à l'exobiologie sont un pilier de ces recherches. Complexes et audacieuses, elles sont souvent mises en œuvre dans un cadre international, principalement avec l'Esa, la Nasa et la Jaxa.

Grâce au Cnes et à sa politique de soutien à long terme, la France est aujourd'hui présente dans de nombreuses missions spatiales dédiées *pro parte* à l'étude de l'habitabilité d'exomondes et en position de leadership pour certaines. De même, l'Insu ainsi que d'autres instituts du CNRS (INC, INSB) ont un rôle fédérateur à jouer via leurs programmes nationaux et leurs actions thématiques dans cette recherche interdisciplinaire, couverte par le groupe Exobiologie, Exoplanètes et Protection Planétaire. La communauté scientifique française est fortement impliquée dans l'étude des grandes questions actuelles :

- i. Quelle est la diversité des systèmes exoplanétaires et comment évoluent-ils ? Aujourd'hui, identifier de nouveaux systèmes planétaires pour documenter leurs structures et leurs modes de formation, est un objectif partagé avec le groupe Astronomie et Astrophysique, avec l'ambition de rechercher des exoTerres et de contraindre les propriétés chimiques et physiques des atmosphères d'exoplanètes.
- ii. Quels environnements du système solaire sont favorables à l'apparition et l'épanouissement de formes de vie ? Ce questionnement central pour définir l'habitabilité de corps célestes, est abordé de manière transverse avec le groupe Système Solaire, afin de connaître les processus ayant forgé ces habitats et réuni les conditions d'émergence de formes de vie.
- iii. Comment identifier et qualifier les contaminations chimiques ou biologiques et les éviter dans le cadre de la protection planétaire ? Avec l'essor des missions de retour d'échantillons sur Terre, en particulier de Mars prochainement, il est nécessaire de développer des moyens de contrôle de la non-contamination et de détection agnostique de signes de vie.

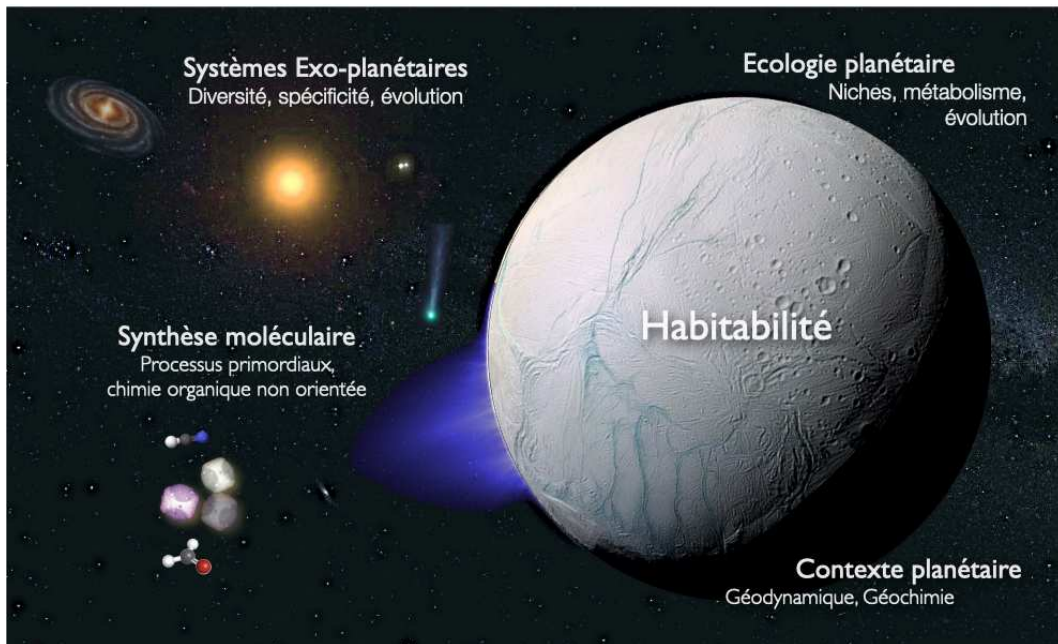


Fig. 1. L'habitabilité des corps célestes de notre système solaire et dans les systèmes exoplanétaires, un champ structurant dans le cadre programmatique du groupe Exobiologie, Exoplanètes et Protection Planétaire. Les observations à toutes échelles servent à comprendre l'évolution des systèmes planétaires et à identifier les déterminants physico-chimiques favorables à l'apparition ou au développement de formes de vie

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LE SPS 2019

1.1. CADRE PROGRAMMATIQUE

La communauté « exobiologie et exoplanètes » française maintient sa forte implication dans les missions spatiales majeures européennes et internationales (Fig. 2) dédiées à l'étude de l'habitabilité et la recherche de vie dans le système solaire (rovers martiens **MSL**, **Mars2020** et **Exomars**, sonde **Juice** vers Jupiter, drone **Dragonfly** sur Titan...), et l'étude des exoplanètes (télescopes spatiaux **Cheops**, **Tess**, **JWST**, **Plato**, **Ariel**...).

Depuis 2019, le programme européen s'est enrichi de deux missions actives avec le lancement et l'exploitation de **Cheops** pour l'observation d'exoplanètes et le lancement de **Juice** en 2023 pour l'étude du système de Jupiter, incluant des satellites glacés dont l'intérêt est devenu primordial pour l'exobiologie. Le lancement du rover de la mission **Exomars** prévu en 2022 a été reporté en raison de la rupture des collaborations entre l'Esa et l'agence spatiale russe. Il aura lieu d'ici la fin de la décennie avec le soutien de la Nasa. Les missions en développement **Plato** (2026) et **Ariel** (2029) et **Roman Space Telescope** (Nasa, 2027) enrichiront la flotte des observatoires spatiaux d'exoplanètes, qui ont vu un renfort de poids arriver en 2021 avec le James Webb Space Telescope (**JWST**, Nasa/Esa/CSA) dont les premières observations ont déjà permis des découvertes spectaculaires.

Des équipes françaises sont également impliquées dans des missions majeures d'opportunité de la Nasa et de la Jaxa, que ce soit pour le développement et l'exploitation d'instruments ou l'apport de compétences clé pour la gestion *ex situ* d'échantillons. Depuis 2021, le rover Perseverance de la mission **Mars2020** arpente le cratère Jezero à la recherche des échantillons de roches les plus pertinents à ramener sur Terre vers 2040 par la mission Mars Sample Return (**MSR**). En parallèle, la préparation du retour d'échantillons de Mars ou Phobos a déjà débuté avec une forte implication de la France dans la définition des moyens de curation (Centre de curation National de Matières Extraterrestres, CNME) et de quarantaine (Marcus). Les contributions françaises à la curation et à l'analyse *ex situ* des échantillons d'astéroïdes carbonés apportés par les missions **Hayabusa 2** (Jaxa) et **Osiris-Rex** (Nasa) assurent une montée en compétence de la communauté française dans ce domaine. Enfin,

les contributions instrumentales de la France aux missions **MMX** (Jaxa) pour l'exploration de Phobos, Deimos et de Mars, et de la mission **Dragonfly** (Nasa) pour la surface de Titan sont respectivement finalisées et grandement avancées.

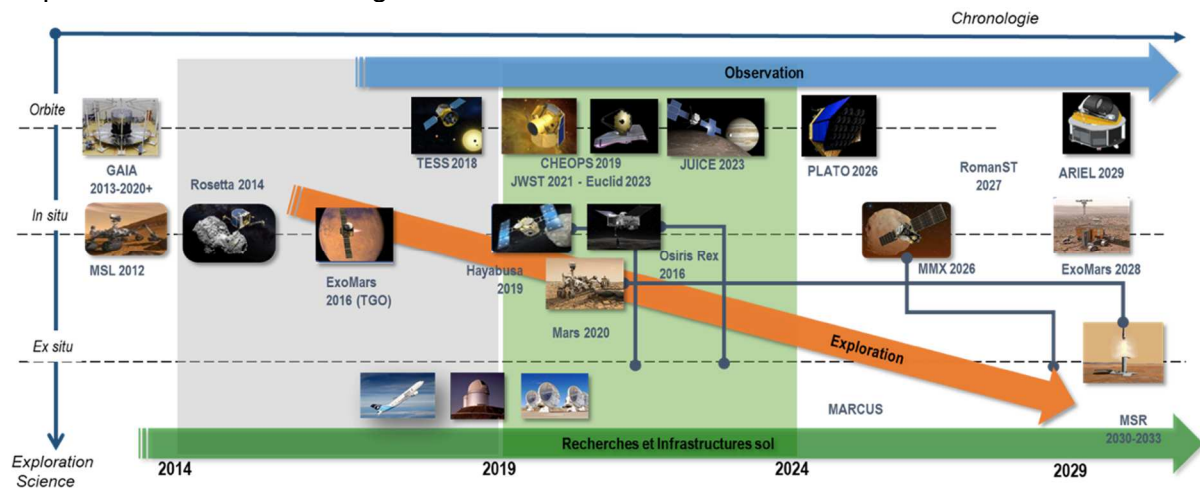


Fig. 2. Chronologie des missions d'intérêt pour l'exobiologie et les exoplanètes en fonction du type d'exploration scientifique. Tendances stratégiques d'exploration (1) - Poursuite mission d'exploration des exoplanètes depuis l'espace, (2) - déploiement de missions de collecte *in situ* et d'analyse *ex situ* (3) soutien des moyens SOL : astro-physique et chimie de laboratoire, grands télescopes (VLT, Alma...) et dispositifs de quarantaine

1.2. AVANCÉES PRINCIPALES PAR THÈME

1.2.1. LES SYSTÈMES EXOPLANÉTAIRES

La détection des exoplanètes initiée il y a près de 30 ans se poursuit aujourd'hui par la découverte d'environ 200 exoplanètes par an et la caractérisation de la taille et la masse, et le sondage des atmosphères d'une partie d'entre elles. Ce travail s'effectue en exploitant la complémentarité des observations depuis le sol et l'espace.

Dans ce cadre, le télescope de l'Esa **Cheops**, en opération depuis 2020, poursuit sa tâche spécifique d'observations précises de transits de systèmes d'exoplanètes connues en complément des observations sol en spectroscopie haute résolution. Ses observations ont permis de préciser le rayon de plusieurs dizaines d'exoplanètes, d'affiner l'architecture des systèmes d'exoplanètes observés, et récemment d'effectuer la détection d'une planète hors norme : LTT9779b. Surnommée la « Neptune ultra-chaude », elle se distingue par une température de surface de 2000 °C et la présence de nuages métalliques contribuant à la réflexion de 80 % de la lumière provenant de l'étoile. La mission a été étendue jusqu'en 2026 au moins.

Mais la révolution récente dans l'observation spatiale des exoplanètes a été obtenue grâce au **JWST**. Le télescope a fini sa phase de déploiement en 2022, avec à son bord une suite d'instruments incluant Miri, dont l'imageur et son mode coronographique, conçus par une équipe française, montrent des performances en vol dépassant les prévisions. Miri permet également l'observation d'exoplanètes en photométrie et en basse résolution spectrale, particulièrement adaptée à l'étude des transits. Les premiers résultats publiés cette dernière année sont spectaculaires. En coronographie, l'observation du système HR8799 dans le domaine IR moyen a permis les premières détections des quatre planètes géantes en formation, et d'imager pour la première fois le disque interne de poussières (Fig. 3).

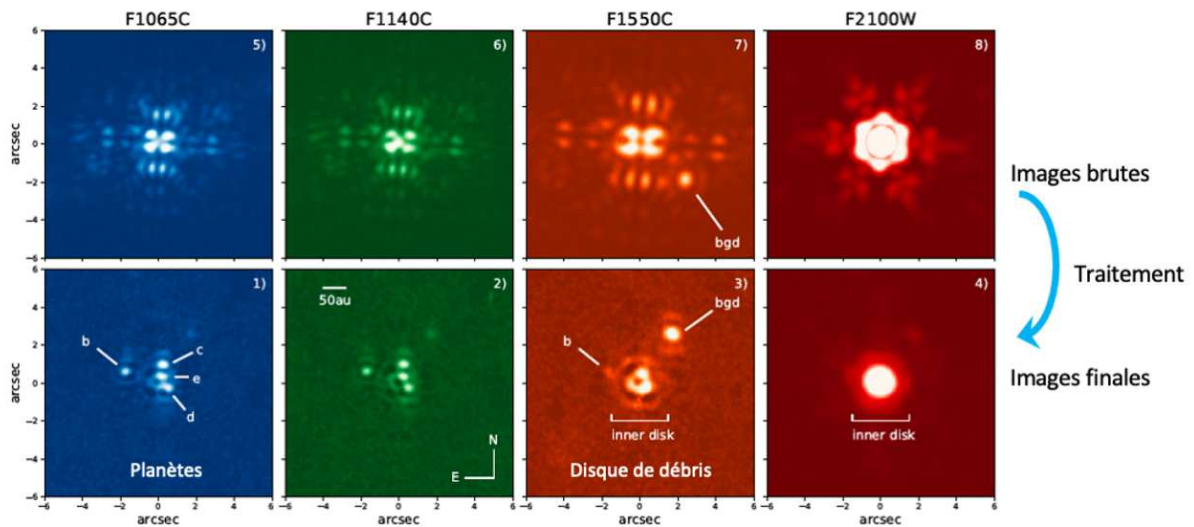


Fig. 3. Observation par l'instrument Miri en mode coronagraphie du système HR8799 montrant 4 planètes et le disque interne de poussières.

Quant aux observations du Jupiter chaud WASP-39b en transit, elles marquent réellement l'entrée dans une nouvelle ère d'étude des exoplanètes, avec la première détection nette de CO_2 dans son atmosphère, et la mise en évidence de SO_2 créé par photochimie. De manière similaire, l'observation de l'exoplanète WASP-107b révèle la présence de vapeur d'eau, de silicates et de SO_2 photochimique dans l'atmosphère de cette planète chaude (Fig. 4).

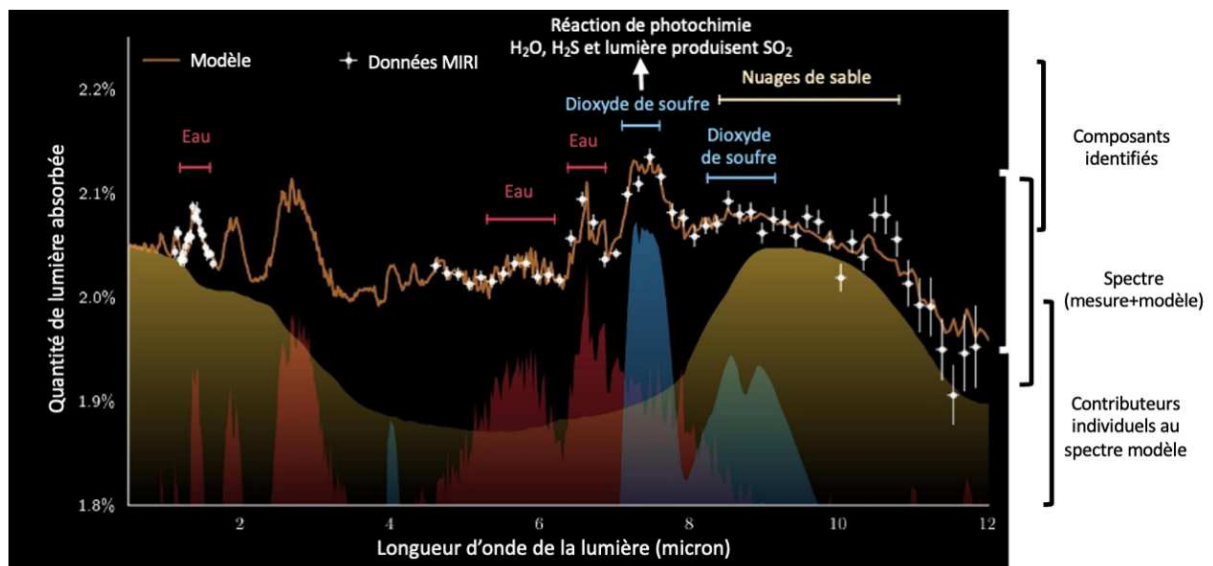


Fig. 4. Spectre infrarouge reconstitué de l'atmosphère de l'exoplanète WASP-107b (Neptune chaude) à partir de mesures faites par l'instrument Miri du télescope spatial James Webb. Outre la mise en évidence de nuages de sable (silicates) produits dans l'atmosphère, cette observation met pour la première fois en évidence l'existence d'une photochimie par la détection de dioxyde de soufre (SO_2).

Au-delà, plusieurs missions fondamentales (télescopes spatiaux) dans lesquelles la communauté française est impliquée, notamment pour la fourniture de parties d'instruments avec l'appui du Cnes, sont en cours de développement : i. **Plato** pour améliorer le niveau de détection de petites planètes autour des étoiles de types solaires et la mesure des masses et rayons, ii. **Ariel** pour étudier de façon cohérente, du domaine visible à l'IR moyen, les atmosphères d'une population de planètes géantes et sous-géantes, chaudes à tempérées, mini-Neptunes et les super-Terres chaudes et iii. **Roman-ST** pour améliorer la statistique des

planètes rocheuses en abaissant le seuil de détection à des exoplanètes de la masse de Mars sur des orbites de 0,5 UA de rayon.

1.2.2. EXPLORATION DE MARS POUR L'EXOBILOGIE

Mars reste aujourd'hui l'objet du système solaire d'intérêt majeur pour l'exobiologie car c'est la seule planète du système solaire ayant connu des conditions de surface semblables à celles de la Terre à une période où la vie terrestre existait déjà.

En complément des observations en orbite menées par le Trace Gas Orbiter (TGO), le rover Curiosity de la mission **MSL**, explore le cratère Gale à la surface de Mars depuis 2012. Ces dernières années, il a poursuivi son ascension du mont Sharp en traversant notamment la vallée « Glen Torridon » riche en minéraux hydratés et en argiles déjà détectées en aval et depuis l'orbite, puis plus récemment en franchissant la limite stratigraphique entre les terrains argileux et ceux riches en sulfates. Les analyses effectuées, notamment par l'instrument franco-américain ChemCam montrent que cette limite est représentative d'un changement climatique majeur dans l'histoire de Mars avec une transition progressive d'un climat humide à aride. En effet, la morphologie des dépôts observés indique une progression cyclique, voire saisonnière, avec des successions de périodes humides et de périodes sèches (Fig. 5). Cette alternance pourrait être favorable à une chimie prébiotique et au développement de formes de vie et atteste de l'habitabilité passée du cratère Gale. De plus, la présence de matière organique mature (ayant évolué avec le temps) et de faibles quantités de molécules organiques soufrées détectées dans ces terrains par l'instrument SAM (qui inclut un chromatographe français), indiquent l'existence passée de composés chimiques élémentaires transformés dans les conditions drastiques régnant à la surface de Mars depuis 3 Gans.

De son côté, le rover Perseverance documente le contexte géologique des sites de prélèvement et les dépôts échantillonnés. Ainsi, la caractérisation géomorphologique et géochimique de la butte de Kodiak et des reliefs par l'instrument franco-américain SuperCam a mis en évidence une alternance de couches sédimentaires caractéristiques d'un type de système deltaïque lacustre (Gilbert). Les mesures géochimiques ont, quant à elles, mis en évidence des roches essentiellement ignées (roches magmatiques) très peu altérées dans le fond du cratère. En revanche, sur le front du delta et au cours de sa traversée vers la « Marginal Unit », Perseverance a rencontré et collecté des roches composées d'argiles riches en sels ou parfois associés à des carbonates ou des phosphates. Toutes ces mesures, dont un grand nombre ont été réalisées par l'instrument SuperCam, attestent du caractère habitable passé du cratère Jezero.

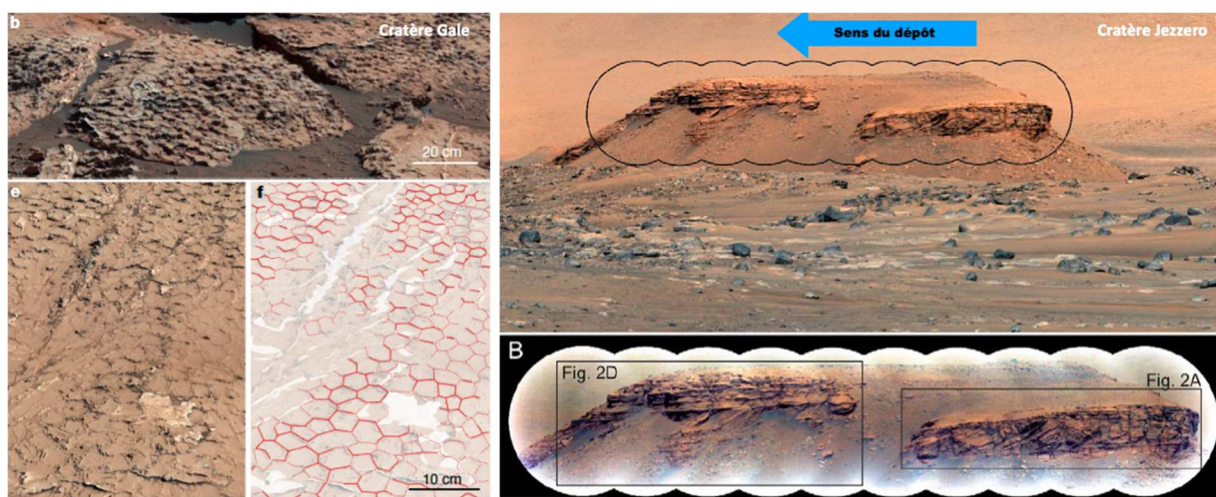


Fig. 5. Images d'environnements des cratères Gale (à gauche) et Jezero (à droite) mettant en évidence des structures polygonales formées par une alternance de périodes humides et sèches et la structure sédimentaire de la butte Kodiak caractéristique de deltas lacustres (Gilbert).

Enfin, l'intégration et les tests du rover « Rosalind Franklin » de la mission **Exomars** et de ses instruments avec fortes contributions françaises ont été achevés en 2021. Toutefois, en 2022, le contexte géopolitique a conduit à l'arrêt de la collaboration entre l'Esa et Roscosmos qui était en charge du lancement, de deux instruments du rover et de la plateforme d'atterrissage. Une reconfiguration de la mission en partenariat avec la Nasa visant à déposer le rover sur Mars dans la région d'*Oxia Planum* début 2031 a été acceptée lors de la conférence ministérielle de l'Esa de 2022. En dépit de ces changements, l'intérêt scientifique du rover a été réaffirmé, notamment en raison de sa capacité à sonder la subsurface pour y rechercher des traces de vie et des biosignatures non altérées. Les contributions instrumentales françaises restent capitales pour décrire le site de collecte (Wisdom, Clupi) et déterminer *in situ* la composition chimique et minéralogique d'échantillons « frais » prélevés en profondeur (Micromega, Moma et RLS).

1.2.3. MONDES OCÉAN : LES NOUVEAUX MONDES HABITABLES ?

La découverte récente sur des lunes de Saturne ou Jupiter, comme Encelade ou Europe, de l'existence probable d'océans d'eau liquide profonds, d'une chimie organique et de sources d'énergie thermique générées par les forces de marée, positionne des zones habitables dans le système solaire externe. Ces objets de taille modeste sont devenus des cibles prioritaires pour l'étude des milieux habitables du système solaire et la recherche de vie. Mis en avant lors du dernier SPS du Cnes, les cinq dernières années ont vu la mise en place des premières missions qui leur sont spécifiquement dédiées.

En premier lieu, la mission **Juice** a été lancée en 2023 pour une insertion en orbite de Jupiter en 2031. Les équipes françaises apportent une contribution significative aux instruments de la sonde, notamment sur le spectro-imageur Majis sous responsabilité française. **Juice** vise à étudier l'habitabilité de satellites joviens (Ganymède, Europe et Callisto) en cartographiant les propriétés physiques et la composition chimique de la surface/sous-surface des satellites et en suivant leur évolution au cours de la mission. **Europa Clipper**, mission « Flagship » de la Nasa, sera lancée fin 2024 pour une insertion en orbite de Jupiter en 2030. Des équipes françaises sont impliquées scientifiquement dans trois instruments qui serviront à caractériser les échanges de matière depuis l'océan profond jusqu'à l'exosphère d'Europe, et de connaître le potentiel exobiologique des mondes océan ; des informations très utiles pour la définition de futures missions d'exploration *in situ* de leur surface et sub-surface.

De plus, pour préparer l'exploration de la surface de Titan par la mission **Dragonfly** en 2034, des équipes françaises étudient à différentes échelles l'albédo de surface, les changements saisonniers atmosphériques et les processus de synthèse organique associés. Ces équipes sont également impliquées dans le développement de deux instruments clés de cette mission : Drams pour l'étude de la composition et de la chimie de la surface dont le chromatographe est développé par une équipe française, et DragMet pour l'étude de la météorologie et la géophysique de Titan.

Enfin, ces missions spatiales vers les satellites Galiléens sont soutenues par des observations au sol avec les grands télescopes, la modélisation des processus de formation et d'évolution et la synthèse et l'étude en laboratoire de matériaux analogues. Ces approches restent essentielles pour préparer, compléter et soutenir l'interprétation des observations à venir.

1.2.4. RETOURS D'ÉCHANTILLONS D'ASTÉROÏDES

Les missions **Hayabusa 2** en 2020 (Jaxa) et **Osiris-Rex** (Nasa) en 2023 ont ramené sur Terre plusieurs grammes d'échantillons des astéroïdes carbonés Ryugu et Bennu. De tels échantillons primitifs et « non altérés » sont essentiels pour les cosmo- ou géo-chimistes français qui ne disposaient jusqu'à présent que de fragments de météorites carbonées, reliques d'astéroïdes ayant été remaniés lors de leur passage dans l'atmosphère terrestre et

leur séjour au sol. Les premières investigations récentes, auxquelles ont participé des équipes françaises impliquées dans la curation avec l'instrument Micromega et dans les groupes d'analyse, prouvent le caractère unique des échantillons de Ryugu, notamment par la mise en évidence d'un cortège de molécules organiques témoignant d'une chimie non-orientée et d'une origine abiotique, sans évidence de contamination terrestre. La préservation de cette matière organique à la surface de Ryugu, malgré une exposition prolongée aux conditions du milieu interplanétaire, laisse supposer que ces composés prébiotiques sont omniprésents dans le Système Solaire. Ces investigations se poursuivent et les premiers résultats concernant Bennu sont attendus avec impatience.

1.2.5. EXPÉRIENCES EN ORBITE TERRESTRE

Le spectre ultraviolet du Soleil étant difficile à reproduire en laboratoire sur une large gamme de longueurs d'ondes, les expériences d'exposition en orbite terrestre sont essentielles pour produire des données photochimiques robustes sur des matériaux d'intérêt. Afin d'améliorer le retour scientifique de ce type d'expériences et de corriger certains biais identifiés, la plateforme **IR-Coaster** a été développée et réalisée ces dernières années par une équipe française dans le but d'exposer au flux solaire des échantillons gazeux ou condensés, et de pouvoir suivre en temps réel leurs transformations chimiques par spectroscopie IR. **IR-Coaster** sera prochainement installée sur la plateforme Bartolomeo de l'ISS et les premiers résultats sont attendus fin 2024 .

En parallèle, le Cnes a soutenu des collaborations scientifiques internationales pour des expériences d'exposition sur l'ISS, d'une part, sur la plateforme japonaise **Tanpopo** pour la collecte de poussières extraterrestres afin d'y rechercher des molécules prébiotiques, d'autre part, sur la plateforme allemande **ExoCube** de l'ISS pour l'exposition de bactéries halophiles enrobées dans des cristaux de sels respectivement. Enfin, une série d'expériences **Matiss** sont menées à bord de l'ISS afin de tester de nouveaux matériaux visant à limiter la fixation et la colonisation des parois internes de la station par des bactéries autochtones pouvant être nocives pour les astronautes.

1.2.6. PROTECTION PLANÉTAIRE

Depuis plusieurs années, la communauté française est mobilisée dans les missions de retour d'échantillons de corps célestes (astéroïdes, Lune, etc.) et prépare tout particulièrement le retour d'échantillons de Mars (**MSR, MMX...**). La France tient un rôle de premier plan dans la définition des catégories et des régulations internationales de protection planétaire en siégeant et en présidant le « Planetary Protection Panel » du Cospar. La position française s'affirme grâce à la définition d'infrastructures et d'équipements de réception, de curation et d'analyse d'échantillons extraterrestres. Ainsi le projet de CNME implanté au Museum National d'Histoire Naturelle (MNHN) deviendra la référence nationale voire européenne en matière de conservation d'échantillons extraterrestres et l'un des rares centres internationaux de ce niveau. Le Cnes participera au financement des équipements mi-lourds qui y seront installés.

Dans l'optique de retour d'échantillons extraterrestres sur Terre, le Cnes pilote l'action technique **Marcus** au sein du PEPR Origins piloté par le CNRS. Récemment initié, ce projet vise à fournir à court terme des équipements clés pour les analyses ou diagnostics préliminaires d'échantillons inconnus (extraterrestres ou non), et la détection agnostique de traces infimes d'activités énergétiques ou métaboliques de systèmes vivants dans ces échantillons.

2. Recommandations

2.1. Exosystèmes planétaires

Dans les années à venir, les télescopes spatiaux opérationnels (**JWST**) et en cours de développement (**Plato**, **Roman-ST**, **Ariel**) seront au cœur d'avancées majeures dans la détection de nouvelles exoplanètes et la détermination de leurs principales caractéristiques (masse, atmosphère, etc.), et de celles de planètes déjà connues. Néanmoins, elles ne permettront pas de détecter des planètes telluriques analogues à la Terre, ni de sonder leur atmosphère afin d'identifier des marqueurs d'habitabilité.

La conception et le développement de missions ayant les capacités requises pour ces observations sont donc aujourd'hui la première priorité. Cet objectif s'inscrit dans le cadre des missions Habitable World Observatory (**HWO**, prochaine mission Flagship Nasa à l'horizon 2040) et Large Interferometer For Exoplanets (**Life**, identifié comme thème scientifique de Voyage 2050 par l'Esa). La Nasa a mis en place en 2024 plusieurs groupes de travail scientifiques et techniques pour la mission **HWO**, qui doivent aboutir sur le court terme à une « Design Reference Mission ». **HWO** sera équipé en priorité d'un instrument coronographique pour la détection et la caractérisation d'exoTerres utilisant des techniques de correction de front d'onde sur lesquelles la communauté française est fortement investie depuis plusieurs années et reconnue mondialement. Le soutien engagé par le Cnes en R&D doit donc se poursuivre et s'intensifier pour maîtriser les techniques de contrôle de front d'onde et de vol en formation aux niveaux requis, que ce soit pour **HWO** ou **Life**. L'expérimentation de laboratoire est également indispensable pour préparer l'interprétation des données aux longueurs d'ondes et résolutions spectrales considérées.

En synergie avec les spectrographes haute résolution au sol (CFHT...) plusieurs concepts de missions proposées présentent un intérêt pour la communauté française comme l'amélioration de la précision de mesures de vitesses radiales avec un satellite fournissant une référence de vitesse mondiale (**nuAncestor**, projet mené par la Suisse) pour lequel une étude de faisabilité serait souhaitable. Différentes voies doivent être explorées pour détecter et caractériser les petites planètes incluant des analogues terrestres dans le voisinage terrestre. Dans ce contexte, et pour préparer les futures grandes missions il est intéressant d'explorer l'intérêt des nanosatellites (mission de transit par exemple), et les avantages de l'astrométrie micro-arcseconde pour la détection d'exoTerres (comme **Theia** proposée pour la mission Esa M7). Enfin la possibilité de précurseurs technologiques à la mission **Life**, avec un objectif scientifique fort qui porterait sur les conditions de formation des exoplanètes, est également une opportunité à prendre en compte.

2.2. EXPLORATION MARTIENNE

L'exploration actuelle *in situ* de la surface de Mars dans le cadre des missions **MSL** et **Mars2020** vise à contraindre les conditions d'habitabilité passée et présente de terrains d'intérêt pour l'exobiologie. A partir de 2031, le rover Rosalind Franklin de la mission **Exomars** ira rechercher en profondeur dans le sol martien des biomarqueurs protégés des conditions de surface. Ces missions sont très complémentaires à la fois par les contextes géologiques et l'âge des terrains étudiés, et par leurs modes d'échantillonnage et d'analyse variés.

La campagne **MSR** qui ramènera une partie des échantillons collectés par le rover Perseverance de la mission **Mars2020** à l'horizon des années 2030, reste la priorité de la communauté. L'accès à de tels échantillons produira des informations uniques et précises par l'utilisation de méthodes analytiques sensibles de laboratoire. Ces informations, complémentaires à celles acquises *in situ*, sont déterminantes pour dater les échantillons, et pour caractériser finement les processus géologiques, climatiques et biochimiques auxquels ils ont été liés. Dans ce cadre, il sera nécessaire de soutenir le développement de moyens de confinement et de curation d'échantillons (voir 2.5.), ainsi que d'instrumentations de laboratoire performantes pour le traitement et l'analyse.

En dépit de ce programme dense d'exploration de Mars, il demeure un fort intérêt à étudier des environnements favorables à la préservation de traces de vie et inexplorés jusqu'à présent. C'est le cas de l'atterrisseur Mars Life Explorer (**MLE**) recommandé dans le dernier decadal survey de la Nasa pour être la prochaine mission d'exploration *in situ* visant à rechercher dans des terrains glacés à haute latitude des biosignatures dans des échantillons prélevés à 2 m de profondeur.

2.3. Mondes glacés et océan : de l'habitabilité de satellites glacés à la contribution des comètes à l'apparition de la vie

Bien qu'aujourd'hui des satellites glacés de Jupiter et Saturne, e.g. Europe, Encelade et Titan, semblent satisfaire aux principaux critères d'habitabilité, il demeure indispensable de le confirmer et de déterminer si ces mondes océans sont ou ont été habités. Leur observation à distance (**JWST**) et leur exploration depuis l'orbite (**Juice**, **Europa Clipper**) ou *in situ* (**Dragonfly**) amélioreront considérablement nos connaissances sur la géophysique de ces habitats potentiels. Néanmoins, la chimie des matériaux exhumés des océans sous-glaciaires est essentielle pour y rechercher des biosignatures ou modéliser les échanges de matière et d'énergie entre l'océan interne, la surface et l'ensemble du système planète-lune. Encelade est aujourd'hui la cible à explorer prioritairement par les agences spatiales (L4 Esa et Flagship Nasa pour la décennie 2040, possible New Frontier (NF) 5 Nasa à l'horizon 2030) en raison de son attrait scientifique, de sa nouveauté et de critères techniques plus favorables à son exploration. L'enjeu majeur de l'exploration d'Encelade pour l'exobiologie est de caractériser les processus (bio-)géochimiques se déroulant dans l'océan interne et leur déterminants, grâce à un inventaire exhaustif des espèces produites. Pour cela, des analyses devraient être réalisées sur des matériaux collectés dans les panaches des geysers connus, ou directement à la surface dans les zones où sont présentes les retombées des panaches. Les mesures moléculaires, isotopiques et chirales envisagées nécessiteront une adaptation des instruments aux conditions des mondes glacés, notamment pour la caractérisation de composés chimiques complexes.

Bien que n'étant pas glacé, Cérès est aujourd'hui considéré comme un monde océan potentiel depuis son exploration intense depuis l'orbite par la mission **Dawn** qui a révélé la présence d'une grande proportion d'eau dans la planète naine, ainsi que des régions enrichies en sels et en matière organique non identifiée à sa surface. L'exploration de Cérès présente donc un intérêt substantiel pour caractériser son habitabilité et y rechercher des biomarqueurs, et elle pourrait être menée par analyse *in situ* et/ou par l'analyse d'échantillons ramenés sur Terre.

Enfin, dans le futur, l'un des objectifs sera de préciser la nature et la quantité de matière apportée par les petits corps (astéroïdes et comètes) sur la Terre primitive afin d'évaluer leur impact sur la chimie prébiotique et l'apparition du vivant sur Terre. Si ce travail est bien engagé pour les astéroïdes avec l'étude des échantillons de Ryugu et Bennu, la composition chimique des noyaux cométaires n'a été qu'effleurée jusqu'à aujourd'hui. Il faut donc envisager un retour d'échantillon et/ou une étude *in situ* d'un noyau cométaire, envisageable dans les années 2030 au travers de la mission NF5 de la Nasa, afin de caractériser finement sa composition moléculaire et élémentaire pour répondre à cette question.

2.4. De l'orbite terrestre à la Lune

Jusqu'à présent l'orbite basse (LEO) était le seul endroit accessible pour étudier des échantillons d'intérêt soumis à des conditions environnementales (e.g. pesanteur, rayonnement) plus représentatives du milieu interplanétaire, ou de la surface d'objets du système solaire actuellement inaccessibles ou non explorés, que celles simulées en laboratoire. Néanmoins, les expériences implantées jusqu'à présent sur l'ISS doivent composer avec un environnement radiatif atténué par les ceintures magnétosphériques terrestres et les multiples révolutions et rotations journalières de la station. Il y a donc un franc intérêt à mener des expériences d'exobiologie au-delà de l'orbite basse, sur des modules de

la Lunar Gateway ou à la surface de la Lune, afin de s'approcher des conditions de rayonnement du milieu interplanétaire. Ceci nécessite le développement de plateformes spécifiques accompagnées d'instrumentation *in situ* pour un suivi en temps réel sur des temps longs.

On peut souligner également des convergences potentielles entre des problématiques de l'exobiologie et celles des sciences de la Vie notamment sur l'usage de régolithe dans des supports Vie ou sur l'impact des poussières lunaires sur la santé des astronautes. En particulier, l'étude des interactions régolithe-eau-microorganismes sont intéressantes pour définir des conditions d'habitabilité aux petites échelles et de résilience fonctionnelle ou de résistance dans des écosystèmes *de novo* sous l'effet de « stressseurs » lunaires ou spatiaux.

2.5. Retour d'échantillons et curation

Depuis plus d'une décennie, les missions de retour d'échantillons sont en plein essor, avec une prédilection pour l'environnement martien : la Jaxa propose un retour du régolithe de Phobos, une des lunes de Mars, à l'horizon 2030 ; la Nasa et la CNSA proposent des retours d'échantillons de roches et d'atmosphère en 2035 avec les programmes **MSR** et **Tianwen-3** respectivement. Au-delà de l'exploration martienne, les lunes glacées du système solaire externe (Europe, Ganymède, Encelade...) deviennent des cibles prioritaires d'exploration *in situ* pour les futures missions (e.g. NF5 et 6) avec l'espoir d'une détection *in situ* ou *ex situ* de traces de vie. Des concepts de missions de retour d'échantillon d'un noyau cométaire (**Hayabusa3/Jaxa**) sont également à l'étude.

Outre les analyses à distance et *in situ*, ces missions intègrent un volet « sol », incluant la réception, la conservation et les analyses préliminaires en centre de curation des échantillons, avant leur distribution aux équipes scientifiques internationales. Cette stratégie d'exploration tend à redéfinir les contours « end-to-end » d'une mission de retour d'échantillons ainsi que les rôles respectifs des communautés scientifiques et techniques impliquées dans les phases de curation et les études en laboratoire.

La communauté européenne, et en particulier française, très impliquée dans différentes missions de retour d'échantillons, vise désormais à développer à moyen terme ses propres installations de curation. Dans ce cadre la position française a évolué depuis le SPS 2019, notamment grâce à (i) l'instruction au Cnes depuis 2021 d'un projet d'infrastructure de haute sécurité pour la gestion d'échantillons extraterrestres et des technologies requises et (ii) au projet de construction du CNME au MNHN, validé en 2023 au niveau ministériel.

Aujourd'hui, le développement d'une infrastructure dédiée uniquement à la réception et la gestion d'échantillons martiens n'est pas soutenable. En revanche, il est nécessaire de disposer, en complément du CNME, d'une offre de services « hors curation » pour l'évaluation des risques biologiques associés à des échantillons inconnus, qu'ils soient d'origines terrestres ou extraterrestres. C'est un défi technique de haute importance pour les prochaines décennies et le bon positionnement de la communauté scientifique française dans les analyses préliminaires des échantillons. Développer cette offre de services est un moyen d'accélérer le passage en curation et la distribution des échantillons auprès de la communauté scientifique internationale et surtout française qui en fera la demande. La France a tous les atouts pour développer la curation d'échantillons sensibles et contribuer à la définition des procédures de manipulation et aux opérations d'évaluation des risques biologiques, notamment grâce au projet Marcus (Management and Analysis in Restricted Containment of Unknown Samples). Le Cnes doit en être l'un des moteurs.

Ainsi, la participation des équipes françaises aux analyses préliminaires, en confinement strict et sur des échantillons « libérés » en curation, demeure essentielle et doit être soutenue. Pour une forte valeur ajoutée, il faudrait veiller à faciliter/garantir l'accès des scientifiques aux outils analytiques de pointe (e.g. TGI) , à implémenter des méthodes de traitement de données innovantes et à structurer de nouvelles équipes interdisciplinaires, métissant les savoir-faire des curateurs, des instrumentalistes et des scientifiques.

Objectifs scientifiques	Observations/Mesures	Cadre	Recommandations
Détecter et caractériser des ExoTerres et leur atmosphère	Observations depuis l'espace par imagerie à haut contraste et interférométrie	ESA - NASA	Soutien majeur à la définition et au développement de HWO (Nasa/2040) et Life (Esa/2045) en valorisant l'expertise française pour PLATO, Ariel et Roman-ST
Identifier les déterminants de l'habitabilité des mondes glacés et « océan »	Sondage depuis l'orbite et exploration <i>in situ</i> pour la recherche de biomarqueurs et de traces de vie	ESA - NASA	Soutien majeur aux futures missions dédiées de l'Esa (L4/2040) et de la Nasa (NF5/2035-Flagship/2045) vers Encelade
Étudier l'habitabilité de planètes naines et le rôle des comètes dans l'émergence de la vie	Exploration <i>in situ</i> pour caractériser les conditions d'habitabilité et/ou retour d'échantillon chimie prébiotique des comètes	ESA - NASA	Soutien substantiel à l'exploration de Cérés et aux missions d'analyse des noyaux cométaires
Améliorer nos connaissances sur les exoplanètes telluriques et les systèmes associés	Mesures précises depuis l'espace de propriétés d'étoiles (position, activité lumineuse) de systèmes exoplanétaires connus	Multilatéral ESA	Soutien substantiel à de petites missions complémentaires de Plato/Ariel et aux observatoires sol (CFHT, ELT...)
Développer des services de réception, de gestion des échantillons extraterrestres et de détection agnostique de risque biologique	Mesures robustes de contaminations moléculaires Analyses chimiques et biochimiques ultrasensibles (composition moléculaire, isotopique, volatiles...)	CNES SpaceShip.FR ESA - JAXA - NASA	Soutien substantiel à la participation française aux analyses préliminaires et processus de levée de quarantaine Favoriser les synergies avec les réseaux de TGI et de biosécurité (NRBC)
Déterminer les signatures organiques ou biologiques à rechercher à la surface d'objets du système solaire	Exposition de matériaux (molécules, bactéries) au rayonnement complexe interplanétaire et suivi <i>in situ</i>	ESA - NASA	Soutien substantiel au développement de nouvelles plateformes d'exposition et d'instrumentation adaptées (LunarGateway, CLPS, ...)
Rechercher des biosignatures à la surface de Mars	Caractérisation d'un environnement martien à hautes latitudes et recherche de biosignatures en profondeur	Multilatéral NASA	Soutien modéré à des missions <i>in situ</i> aux hautes latitudes de Mars
Étudier la formation des systèmes (exo)planétaires	Observation du carbone dans les disques protoplanétaires et de l'environnement de formation des exoplanètes telluriques	ESA	Soutien modéré à des missions précurseur de Life

2.6. Recherche & Technologie

Les recommandations en R&T du groupe portent sur l'identification des technologies instrumentales émergentes et les verrous technologiques en termes d'instrumentation pour :

- (i) l'imagerie directe à haut contraste des exoplanètes, *i.e.* optique adaptative ou non-linéaire et coronagraphie pour le développement d'instrumentation du futur grand observatoire HWO (Flagship Nasa) ou spectroscopie ;
- (ii) l'analyse de composés organiques dans des matrices glacées/salines par techniques chromatographiques et spectrales (Exploration des lunes glacées) ;
- (iii) de la spectrométrie d'absorption ou de réflexion, vibrationnelle dans l'infrarouge moyen ou rotationnelle pour des gaz ou aérosols à pression évanescente dans le domaine submillimétrique ;
- (iv) des dispositifs de collecte *in situ* supervisée, de transport monitoré et de conservation sécurisée d'échantillons sensibles ou présentant un risque biologique potentiel.

En particulier, compte tenu de l'importance incontestée d'une mission de retour d'échantillons de comètes et intérêt de la communauté pour l'exploration *in situ* des mondes « océans », il est recommandé de faire progresser les techniques de collecte, de concentration

et de stockage de matériaux glacés sensibles et de maîtriser les biais analytiques qu'elles induisent.

De manière générale, les moyens de transfert d'échantillons de l'installation de curation aux laboratoires (ou entre installations de curation) ou de préparation des échantillons seront à parfaire afin d'éviter toute exposition à l'environnement terrestre.

Ceci passe par l'acquisition de compétences nouvelles au sein du Cnes dans le domaine de réception/manipulation d'échantillons inconnus. Cette action pourrait bénéficier également de synergies et collaborations avec les spécialistes du risque nucléaire biologique et chimique NRBC (Institut Pasteur, Inserm, DGA et ArianeGroup).

Acronymes

Ariel : Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey

Cheops : CHaracterising ExOPlanet Satellite

Clupi : Cloe-Up Imager

CNME : Centre de curation National de Matières Extraterrestres

CNRS : Centre National de Recherche Scientifique

CSA : Canadian Space Agency

Esa : European Space Agency

HWO : Habitable Worlds Observatory

INC : Institut National de Chimie

INSB : Institut National des Sciences Biologiques

Jaxa : Japan Aerospace Exploration Agency

Juice : Jupiter Icy Moons Explorer

JWST : James Webb Space Telescope

IR : Infra Rouge

ISS : International Space Station

Life : Large Interferometer For Exoplanets

Marcus :

Miri : Mid-Infrared Instrument

MLE : Mars Life Explorer

MMX : Martian Moon eXploration

Moma : Mars organic Molecules Analyser

MSL : Mars Science Laboratory

MSR : Mars Sample Return

Nasa : National Aeronautic and Space Administration

NF : New Frontier

Plato : PLAnetary Transits and Oscillations

RLS : Raman Laser Spectrometer

Roman-ST : Roma Space Telescope

Sam : Sample Analysis at Mars

SPS : Séminaire de Prospective Scientifique

Tess : Transiting Exoplanet Survey Satellite

Theia : Telescope for Habitable Exoplanets and Interstellar/Intergalactic Astronomy

UA : Unité Astronomique