

GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE SYSTEME SOLAIRE

Sébastien Charnoz, Thierry Fouchet, Olivier Gasnault, Olivier Groussin, Benoit Langlais, Ronan Modolo, Olivier Mousis, Cathy Quantin-Nataf, Violaine Sautter, Michael Toplis, Matthieu Vincendon, Francis Rocard (Thématicien), Franck Montmessin (Président)

1. Les grandes questions scientifiques en planétologie

Les grandes questions traitées en sciences planétaires s'appuient sur les travaux de prospective de la Nasa (Decadal Survey, 2011) et de l'Esa (Cosmic Vision, 2005 puis 2015). A ce titre, l'étude du Système solaire s'organise autour de trois grandes questions :



QI. Quelle est l'origine du Système solaire & de la matière primitive ? Ce sont les 100 premiers millions d'années du Système solaire dont il est question ici, depuis la formation des objets du Système solaire, il y a 4,56 milliards d'années, à partir de la nébuleuse primitive jusqu'aux premières étapes qui ont vu nombre de processus à l'œuvre pour poser les bases de l'architecture du Système solaire et où s'est incorporée de la matière interstellaire dont la nature reste à élucider. Ces processus ont fait naître deux types de planètes de part et d'autre

de la « ligne des glaces » : à l'intérieur, les planètes telluriques et à l'extérieur, les planètes Géantes. Pour les telluriques, se pose la question des mécanismes physico-chimiques qui ont présidé à leur accréation, puis leur différenciation et enfin à la formation de leur atmosphère. Pour les Géantes, on s'intéresse aux conditions de leur agrégation, et à la formation de leurs anneaux et de leurs satellites. Les résidus de cette période d'accréation sont les petits corps rocheux et glacés qui peuplent tout le système solaire.



QII. Quelle a été l'évolution et quelles sont les propriétés actuelles des planètes ? Il s'agit ici de retracer les principales étapes de l'évolution du Système solaire après sa formation qui l'ont amené progressivement au cours du premier milliard d'années à sa configuration actuelle. C'est dans cette période que le Système solaire a sans doute connu ses événements les plus perturbateurs (migration des Géantes gazeuses, bombardement tardif...ou pas) qui ont

fait probablement interagir les deux familles de corps planétaires et où les scénarios de l'évolution dynamique se confrontent (modèle de Nice, *Grand Tack*). C'est aussi ici que l'on peut introduire le principe de planétologie comparée, car c'est au cours de cette période que se sont dessinés les chemins d'évolution, distincts pour chaque corps, qui ont créé les disparités de caractéristiques physico-chimiques entre les planètes au sein même des deux grandes familles. L'une des questions centrales pour les telluriques concerne les raisons qui ont fait aboutir à la restriction de la zone habitée du Système solaire au tracé de l'orbite terrestre, faisant de Mars un désert glacé et de Vénus une fournaise infernale. Pour les Géantes, la question de leurs interactions (planètes – satellites – anneaux – magnétosphères) reste la plus prégnante en ce qu'elle pourrait servir de laboratoire pour comprendre les processus dynamiques à l'œuvre dans le Système solaire et dans les systèmes planétaires lointains.



QIII. Où se trouvent les environnements habitables et comment le sont-ils devenus ? Autant la question de la formation du Système solaire nous amène aux frontières de l'astrophysique, autant la problématique de l'habitabilité amène la planétologie aux frontières de l'exo-biologie. Si le biologiste caractérise le vivant, son émergence et sa subsistance ; le planétologue lui se consacre d'abord à identifier les conditions et les processus environnementaux présidant à

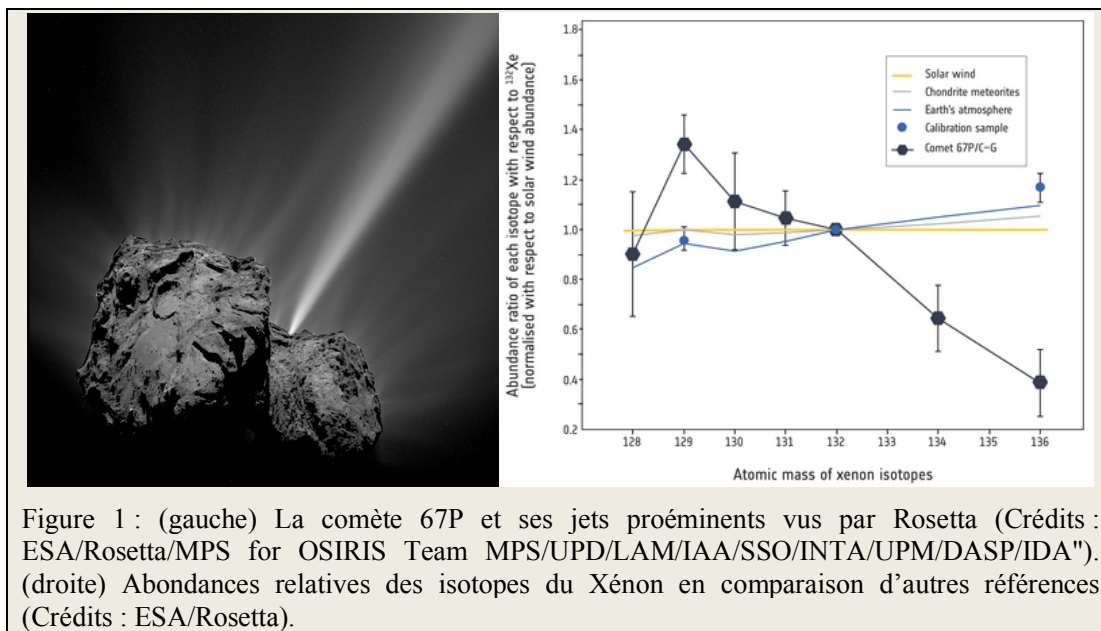
l'émergence et à la préservation de la vie. En premier lieu, se pose la question du matériau primitif, et donc des sources primordiales et contemporaines de la matière organique. Ensuite vient la question des environnements géochimiques et climatiques fournissant les ingrédients nécessaires pour que la vie puisse prendre racine, impliquant de s'intéresser à l'origine de l'eau et aux éventuels mécanismes de transfert de matière (eau et matière organique) au sein du Système solaire. Les processus d'évolution traités en **QII** trouvent ici leur extension la plus importante car elles conçoivent le berceau originel à partir duquel une activité biologique pourra s'établir. Pour les planètes telluriques, seules Mars et Vénus semblent pertinentes pour tenter de répondre à ces questions car si leur destin a divergé de celui de la Terre, la possibilité que ces corps aient un jour abrité la vie reste ouverte. Pour les Géantes, ce sont plutôt les satellites auxquels on est amenés à s'intéresser car rien n'interdirait à certains, tels Europe ou Encelade, d'avoir créé et/ou d'abriter des niches écologiques en leur sein et de trouver sous leur épaisse couche de glace, d'éventuels organismes évoluant dans ces mondes océans.

2. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

Le bilan ci-dessous est structuré en sous-thèmes qui reprennent les principaux éléments de la taxonomie des sciences planétaires ; à savoir les différents corps telluriques, les géantes et les petits-corps. Ces derniers ont été choisis pour débiter cette synthèse des résultats en raison de leur intense actualité.

2.1. Petits Corps (astéroïdes, comètes, troyens, centaures, et objets trans-neptuniens)

La période 2014 – 2019 constitue un âge d'or pour les petits corps : cinq missions spatiales ont exploré les géocroiseurs Ryugu et Bennu, les planètes naines Cérés et Pluton, et bien sûr la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, alors que GAIA a dans le même temps identifié 14 000 nouveaux petits objets. Au sein de ces missions, la communauté française affiche un bilan scientifique et une visibilité remarquables, consolidant sa deuxième place au plan mondial.



2.1.1. Rosetta

La sonde Rosetta et son atterrisseur Philae ont constitué le point d'orgue du dernier quinquennal, mobilisant l'ensemble de la communauté française des petits corps. L'exploration *in situ* de 67P, pendant 2 ans, a permis de faire des avancées majeures dans notre compréhension des comètes.

S'agissant de la composition de la comète, Rosetta a identifié une grande variété de volatiles, ajoutant plusieurs dizaines de molécules (surtout organiques) à la liste des composés connus. La forte abondance relevée pour O₂ (~4%) est surprenante, vu sa forte réactivité et sa faible abondance interstellaire, tout comme la détection inexplicable du phosphore atomique. La découverte de la glycine, le plus simple des acides aminés, étaye l'idée que les comètes ont pu fournir à la Terre des molécules impliquées dans l'émergence du vivant.

Pour la surface du noyau, Rosetta a mis en évidence à une couverture globale potentiellement constituée de sels organiques d'ammoniums associés à des acides carboxyliques, alors que le faible albédo serait dû à des poly-aromatiques sombres combinés à des minéraux opaques (FeS).

La composante réfractaire a pu être étudiée grâce à l'analyse des particules de poussière venant du noyau. Constituées pour moitié de matière organique macromoléculaire, elles pourraient avoir une origine commune de celle de la matière organique insoluble des chondrites carbonées. La matière cométaire se présente sous forme de grains multi-échelles issus d'une accréation hiérarchique.

L'apparence bilobée du noyau semble le résultat de l'accréation de 2 planétésimaux et sa faible densité (530 kg/m³) implique une porosité de l'ordre de 70-80 %. L'activité du noyau se caractérise par un dégazage continu qui engendre une coma diffuse, permanente et marquée par des jets visibles des heures durant et émis par des régions riches en givre de CO₂ ou d'H₂O (*cf.* Fig. 1-gauche). Ce dégazage entraîne une érosion progressive trahie par l'effondrement de falaises, l'apparition de ridules dans les zones lisses, etc.. Ces processus restent superficiels car l'intérieur du noyau est isolé du chauffage solaire par sa faible inertie thermique.

Compte tenu de l'orbite de 67P et de notre connaissance des rapports D/H pour d'autres comètes, un rapport D/H proche de celle des océans terrestres (1.5x10⁻⁴) était attendu, mais Rosetta a révélé la valeur la plus forte pour une comète (~5.4x10⁻⁴). La statistique reste trop faible pour conclure sur l'apport cométaire de

l'eau terrestre mais les mesures isotopiques du xénon offrent des contraintes fortes : l'anomalie isotopique du xénon de l'atmosphère terrestre (le U-Xénon), au regard de celle de 67P, ne s'explique que si la composition de l'atmosphère terrestre primitive était à 20% cométaire et 80% chondritique. Les comètes de type 67P n'auraient donc que faiblement contribué à la formation de la Terre (cf. Fig. 1-droite).

Même si l'origine de 67P reste débattue, la comète pourrait s'avérer être un objet primordial peu altéré. L'hypothèse sur la collision entre 2 gros objets (>100 km) de la ceinture de Kuiper est maintenant écartée.

2.1.2. New Horizons

New Horizons a survolé Pluton, Charon et ses quatre autres petits satellites le 14 juillet 2015 puis a survolé en 2019 un objet étonnant : Ultima Thulé. Elle a révolutionné notre compréhension de Pluton, ouvrant des perspectives pour tous les objets trans-neptuniens. Les équipes françaises impliquées ont contribué à la caractérisation des glaces en surface ainsi qu'à l'étude théorique du climat de Pluton.

Grâce à ses instruments, New Horizons a révélé un monde actif et complexe entouré d'une atmosphère composée d'azote (99.5%, 1 Pa) avec un peu de CH₄ (0.5%) et du CO (0.05%). Ces composés sont en équilibre de phases solide-gaz, formant des glaciers et des givres de N₂, CH₄, CO en surface. Cette atmosphère est le siège d'une photochimie complexe qui conduit à la formation de brumes de polymères organiques s'organisant en couches à des altitudes variées et s'accumulant en surface. A l'équateur, le bassin Sputnik Planitia, large de 1000 km, est recouvert de glace d'azote d'où émergent des « icebergs ». Ailleurs, de vastes régions sont couvertes d'épais glaciers de CH₄, tandis qu'un givre de CH₄ recouvre les moyennes/hauts latitudes (Fig. 2).



Figure 2 : Pluton vue par New Horizons (crédits NASA).

2.1.3. Dawn

Dawn a exploré la planète naine Cérès, le plus gros objet de la ceinture principale d'astéroïdes, mélange de glace et de roche. Sa surface est fortement cratérisée et présente des singularités comme les taches brillantes du cratère d'Occator ainsi qu'une montagne haute de 4 km, Ahuna Mons. On retient l'omniprésence d'argiles riches en magnésium et en azote sous forme d'ammoniac, qui atteste d'un fort degré d'altération chimique de la surface et d'une contribution notable de matière du Système solaire externe. Les données géophysiques révèlent un «noyau» rocheux plus dense que la croûte externe, que l'on suppose plus riche en eau. La minéralogie d'Occator et des flancs d'Ahuna Mons est dominée par du carbonate de soude, résultat probable de l'évaporation d'une saumure. La détection de chaîne de carbones aliphatiques en surface suggère que le carbone a été protégé de l'érosion spatiale, impliquant que celui-ci soit aussi présent à l'intérieur et donc déjà présent lors de sa formation, et fut altéré ensuite par la circulation d'eau. La couverture de poussière fine de pyroxène découverte avec le télescope aéroporté Sofia de la Nasa conjuguée aux argiles riches en ammoniac identifiés par Dawn feraient de Cérès un objet issu du Système solaire externe ayant migré par la suite.

2.1.4. Hayabusa 2, OSIRIS-Rex et GAIA

Hayabusa 2 s'est positionnée autour de l'astéroïde Ryugu en août 2018, et son atterrisseur franco-germanique Mascot s'est posé à la surface en octobre 2018. Ryugu s'avère être un astéroïde possédant un bourrelet équatorial. Il est recouvert de nombreux rochers et présente un terrain consolidé. Ryugu possède une ressemblance frappante avec l'astéroïde Bennu, que la mission Osiris-Rex vient juste d'observer.

Depuis 2014, la mission GAIA observe le ciel pour mesurer la position et faire la spectrophotométrie des corps célestes, incluant petits corps. En 2018, 14 000 petits corps ont été ainsi identifiés, la plupart des astéroïdes, fournissant leur orbite précise (<1 mas) et permettant leur classification ainsi que l'étude de leur évolution dynamique.

2.2. Mars

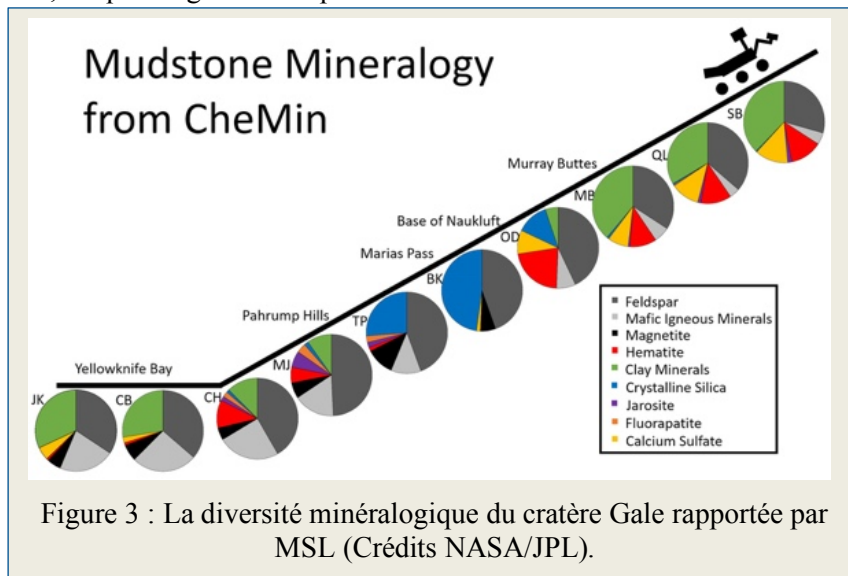
Mars reste le corps le plus visité du Système solaire avec 7 missions sur la période 2014-2019. La France est la deuxième communauté mondiale pour l'exploration de Mars, participant activement à la moisson remarquable de données fournies par les missions Mars Express, MRO, Curiosity, Maven, TGO et maintenant InSight. Ce rayonnement est le résultat de l'implication de notre communauté dans l'exploitation et le développement d'instrumentations de pointe. Le dernier quinquennal a permis de progresser sur plusieurs

questions posées lors de la dernière prospective : structure interne, habitabilité, histoire climatique, composition de l'atmosphère et de la surface ainsi que l'origine de son satellite Phobos.

2.2.1. Intérieur et surface de Mars

Le rayon du noyau est estimé entre 1300 et 1700 km. Il est suspecté être partiellement liquide mais n'engendre plus de dynamo. L'arrêt de celle-ci, entre 4,1 et 3,7 Ga, est à relier à un changement des conditions thermiques et/ou chimiques à l'interface noyau-manteau en interactions avec l'activité volcanique liée aux mouvements dans le manteau. Une nouvelle estimation de l'épaisseur de la croûte (<65 km) est sortie, plus cohérente avec les analyses du géoïde et les bilans géochimiques. La croûte primitive martienne serait ainsi proche des premiers continents terrestres, ce qu'InSight devrait pouvoir confirmer.

La combinaison des données orbitales et des analyses pétrographiques *in situ* donnent accès aux conditions de formation et révèle une grande diversité de processus physico-chimiques (différenciation des roches ignées, hydrothermalisme, évaporation, pédogénèse, etc.). MSL nous a ainsi fait découvrir la complexité pétrologique et minéralogique des roches mères comme leur mode d'altération qui varie sur une échelle allant de la centaine de mètres au kilomètre. Avant même d'arriver aux couches d'argiles du Mont Sharp vues depuis l'orbite, les sédiments au fond du cratère Gale renferment jusqu'à 28% d'argiles lardées de sulfates de calcium symptomatiques d'un environnement lacustre datant de 3,5 milliards d'années (Fig. 3).



S'il est acquis que de l'eau a coulé et subsisté en surface pendant le Noachien et l'Hespérien, la question d'une présence actuelle d'eau liquide a été ravivée par l'observation d'écoulements actifs, les *Recurring Slope Lineae* vers l'équateur, et par la découverte d'un lac souterrain sous le pôle Sud.

2.2.2. Chimie Organique

MSL a découvert dans l'argile sédimentaire de Gale les premières molécules organiques indigènes (de l'ordre du ppm). Cependant, ces molécules ont été transformées dans le circuit analytique de l'instrumentation du rover (chimie à chaud). Par conséquent, la nature des composés organiques natifs reste inconnue alors que la question de leur abondance, leur distribution spatiale et leur préservation est posée.

2.2.3. Atmosphère & cryosphère contemporaines

Mars Express, MRO et Maven ont approfondi l'étude climatique à l'échelle globale, avec une résolution spatiale de quelques kilomètres et temporelle de quelques jours, fournissant les paramètres essentiels : température en surface et dans la troposphère (< 40 km), composition et dynamique des constituants atmosphériques (gaz, rapports isotopiques, aérosols), condensats saisonniers en surface, cartographie des glaces en sous-surface et d'eau liquide dans les régions polaires. Avec TGO depuis avril 2018, une étape a été franchie pour la recherche des gaz traces (espèces hydrocarbonées & soufrées), relançant le débat sur l'existence du CH₄ martien avec une non-détection à un niveau 10 à 100 fois inférieur aux mesures de CH₄ faites par MSL dont l'un des pics a été corroboré par Mars Express.

En parallèle, la modélisation du climat martien, fleuron de la communauté française, fournit un outil incontournable pour la planification des missions et pour les projections paléo-climatiques du Noachien / Hespérien, période de l'histoire martienne a priori la plus « habitable ».

2.2.4. Magnétosphère/ionosphère

Sans dynamo, la magnétosphère de Mars est induite par l'interaction de la planète avec le vent solaire, avec des variations spatiales liées aux anomalies crustales pouvant localement être très intenses (> 12,000 nT à la surface). Les niveaux de radiations relevés par MSL montrent que la magnétosphère et l'atmosphère actuelles réduisent suffisamment les flux de particules pour être supportées par des formes de vie microbienne.

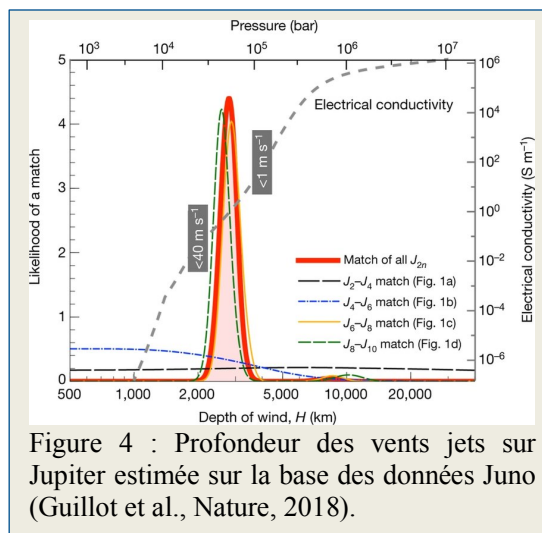
Mars Express et MAVEN ont permis d'estimer les taux d'échappement actuels de l'atmosphère martienne sous forme ionique et neutre. Ces processus ont pu contribuer significativement à l'évolution de l'atmosphère et du climat. L'extrapolation des mesures d'échappement actuel permet de remonter au réservoir atmosphérique primitif, puisque l'équivalent de près de 800 mbar de CO₂ se serait échappé au cours du temps, en conformité avec les projections paléo-climatiques optimistes pour l'habitabilité de Mars.

2.2.5. Phobos

L'étude de l'origine de Phobos et Deimos s'inscrit dans l'étude la dynamique du Système solaire précoce lors de l'accrétion planétaire, et pour laquelle Mars Express a majoritairement contribué. Capturées ou formées lors d'un impact ? Pour l'instant les données d'observation de sa surface ne permettent pas de trancher. Dans le deuxième cas, ces objets se révéleraient précieux pour comprendre l'histoire primitive de Mars. Néanmoins, le dernier quinquennal a vu un consensus émerger autour de l'hypothèse de l'impact dans un scénario identique à celui qui a donné naissance à la Lune.

2.3. Planètes Géantes

Cassini-Huygens et Juno ont apporté des résultats majeurs sur la physico-chimie des atmosphères des géantes gazeuses, telle que la profondeur sur laquelle s'étendent les courants-jets vus en surface (3000 km pour Jupiter, 8000 km pour Saturne) grâce à la mesure du champ de gravité à des ordres élevés (Fig. 4). Dans l'atmosphère superficielle, Cassini a pu caractériser le transfert saisonnier d'énergie et de matière entre les deux hémisphères et a mis en évidence un apport de matière depuis le système externe dans la haute atmosphère. Lors de l'ultime phase de la mission Cassini, le *Grand Finale*, les mesures *in situ* de radiosondage et du magnétomètre ont permis d'identifier la source d'émission radio auroral de Saturne ; à savoir l'instabilité Maser cyclotron également à l'œuvre dans les environnements terrestre et jovien.



2.3.1. Le Grand Finale et les Anneaux

Le *Grand Finale* a permis la première exploration de la région « entre » les anneaux et l'atmosphère (à l'intérieur de l'anneau D). Une série de mesures très attendues a abouti à la masse totale des anneaux, environ 10¹⁹ kg (soit un quart de celle de la lune Mimas), et dont la majorité est stockée dans l'anneau B, confirmant des estimations datant de Voyager. De plus, le radar a livré la première mesure de contenu en silicates des anneaux (entre 0,5% et 5%) impliquant une faible pollution météoritique. Toutes ces mesures suggèrent que les anneaux devraient être jeunes ((O)10⁷ d'années) mais les incertitudes sur les modèles restent fortes. En sus, le « Grand Finale » a confirmé la présence de poussières chargées orbitant le long des lignes de champ depuis l'anneau D vers l'atmosphère. Cette « pluie » de particules, confinée autour de l'équateur, devrait créer une couronne d'hydrogène. Ces grains, d'origine inconnue, sont très riches en organiques (~50% en masse). Il apparaît en synthèse que les anneaux ont fortement évolué depuis leur formation, mais le mécanisme à leur origine reste abondamment débattu.

2.3.2. Satellites

Les grands satellites des planètes géantes font l'objet d'un engouement très particulier car ils possèdent des réservoirs liquides sous une croûte de glace, exception faite de Io qui ne possède pas d'eau. Encelade et Europe sont par ailleurs suspectés d'abriter des océans en contact avec des surfaces silicatées. Les nombreuses découvertes de Cassini ces dernières années, en particulier sur Titan (variations saisonnières de la dynamique atmosphérique et du niveau des lacs, contraintes sur la structure interne, découvertes de nouveaux composés complexes comme le propylène, ...) et Encelade (caractérisation des volatils dans les geysers, analyse de la structure 3D et de la variabilité des plumes), ont vu émerger de nombreux projets sur l'habitabilité de ces lunes océans. La formidable activité au niveau du pôle Sud d'Encelade a été intensément étudiée par la sonde Cassini. Il faudra toutefois attendre au moins 2028 avec Europa Clipper et 2030 dédiée à Europe avec Juice dédiée au système jovien pour avoir de nouvelles données issues de l'exploration spatiale sur les lunes de Jupiter.

2.3.3. Uranus et Neptune

Au cours des dernières années, seules les observations depuis la Terre à diverses longueurs d'ondes ont permis d'apporter des contraintes sur la composition chimique et isotopique des atmosphères d'Uranus et

de Neptune, produisant en particulier des rapports D/H quasi-analogues pour le méthane de ces deux planètes et suggérant que leur formation est issue d'un même réservoir de planétésimaux. Cependant, aucune mission n'est venue explorer ces deux corps qui sont restés vierges de toute mesure *in situ* sur la période.

2.4. Vénus

Seules deux missions ont étudié Vénus depuis 2014 : Venus Express qui a pris fin en décembre 2014 et l'orbiteur japonais Akatsuki qui, depuis 2016, orbite autour de l'équateur pour observer l'atmosphère avec des objectifs similaires à Venus Express. Cette dernière a mis en évidence la très forte variabilité de la haute atmosphère et a mieux caractérisé sa composition sous les nuages. Parmi les faits marquants, on retiendra (i) la variation décennale du SO₂, peut-être liée à une activité volcanique contemporaine, (ii) l'accélération inexplicable des vents sur six ans, et (iii) le possible ralentissement de la rotation de la planète.

2.5. Mercure

Mercure se caractérise par une surface vieille et cratérisée, une atmosphère ténue formée de particules issues du vent solaire ou éjectées de la surface de la planète, et un champ magnétique intrinsèque trop faible pour la protéger efficacement du vent solaire. Mercure a connu un regain d'intérêt grâce à la mission Messenger entre 2011 et 2015 qui s'est focalisé sur quatre objectifs majeurs : (i) l'histoire géologique, (ii) l'étude de la dynamo interne, (iii) la caractérisation du noyau et l'identification de la zone fondue, et (iv) la composition des volatiles des zones polaires. La communauté française s'est investie sur les trois premiers objectifs, i.e. la géomorphologie liée à la sublimation de volatiles en sous-sol, ou la modélisation des champs magnétiques statiques internes et périodiques d'origine externe, qui ont permis de caractériser la taille du noyau métallique. L'exploration de Mercure se poursuit avec le décollage des deux sondes de la mission BepiColombo MPO et MMO en octobre 2018 pour une arrivée fin 2025.

2.6. Lune

Si la science de la Lune n'était pas apparue à La Rochelle comme prioritaire, les missions se sont néanmoins succédées depuis. Entre 2009 et 2019, la Lune a été explorée presque chaque année par une nouvelle mission (LRO et LCROSS en 2009 ; Chang'e-2 en 2010-2011 ; Grail en 2012 ; puis Ladee 2013-2014 et Chang'e 3 en 2013, enfin Chang'e 4 en 2018). L'implication française sur ces missions s'est limitée à une coopération scientifique sur Grail. Au cours de ces missions, la Lune a été cartographiée quasi-totalement à très haute résolution, son exosphère analysée en détail, les volatils des régions polaires identifiés, et son champ gravitationnel caractérisé, notamment autour des fortes anomalies des grands cratères d'impact.

3. Recommandations du groupe

3.1. Panorama programmatique

Le contexte programmatique se caractérise par : (1) L'arrêt des grandes missions de télédétection telles que Cassini (Grand Finale sept. 2017) et Rosetta (arrêt sept. 2016) où la communauté française était très présente (60 à 80 Co-Is). La prochaine mission de ce type (JUICE) n'arrivera à Jupiter que dans une décennie. (2) Des perspectives lointaines pour des contributions au programme Cosmic Vision. Seule EnVision en M5 est en compétition pour un lancement en 2032. (3) La perspective d'une mission vers une géante glacée vers 2030 pour une arrivée en 2040. (4) Le démarrage de MSR avec le lancement de Mars2020 en 2020 et le retour des échantillons d'ici une décennie au mieux. (5) La montée en puissance de nouveaux acteurs qui vont offrir de multiples opportunités à court et moyen terme : la Chine avec son programme lunaire ambitieux mais qui prévoit aussi des missions vers Mars, les petits corps — ZhengHe — et Jupiter ; ainsi que l'Inde qui prévoit des missions vers Vénus, Mars et la Lune. Les coopérations avec ces acteurs devront prendre en compte les risques au regard du retour scientifique attendu. (6) La mise en œuvre de contributions complexes et ambitieuses tant pour le développement que pour les opérations, comme InSight mais également Curiosity et Mars2020.

3.2. Petits Corps (astéroïdes, comètes, troyens, centaures, et objets trans-neptuniens)

Les petits corps peuplent tout le système solaire, depuis les régions internes jusqu'aux régions externes. Les missions passées et récentes ont révélé l'extraordinaire diversité de ces objets, que ce soit pour leurs propriétés physiques, géophysiques, géologiques, dynamiques, ou dans leurs compositions. Malgré des avancées significatives ces cinq dernières années, des questions importantes restent ouvertes sur le contexte astrophysique de leur formation, leur évolution, ainsi que leur rôle dans l'histoire de la Terre et l'apparition de la vie. Pour avancer sur ces questions, les cibles prioritaires sont : les astéroïdes non représentés dans les collections de météorites, les comètes, et les troyens de Jupiter.

A cette fin, il est primordial pour le CNES : i) de poursuivre le soutien à la conception et à la réalisation des instruments spatiaux dans les laboratoires, ce qui englobe les efforts R&D pour l'analyse *in situ* et la miniaturisation des instruments afin d'en récolter les fruits (*i.e.* en faisant voler *CosmOrbitrap*), ii) de soutenir les expériences et les analyses de laboratoire sur la matière extraterrestre.

Pour la période 2019 – 2024, les efforts devront se concentrer, sans ordre de priorité sur : i) les opportunités offertes par les nouveaux acteurs comme le Japon et la Chine, vu l'assèchement programmatique en Europe sur la thématique des petits corps, (ii) une contribution instrumentale à une mission F de l'Esa, (iii) une participation de la France au programme Space Safety / Planetary Defense de l'Esa, et en particulier une contribution instrumentale à la mission Hera, seule mission Esa dédiée aux petits corps, et (iv) la mission MMX à laquelle la France se doit de contribuer à la charge utile scientifique du *rover*.

A plus long terme (cadre Esa *Voyage 2035-2050*), la France devra soutenir une mission très ambitieuse (type Esa classe L, ou Nasa Flagship) vers un corps primitif, combinant mesures à distance, analyses *in situ* et retour d'échantillon.

3.3. Mars

La planète Mars demeure une cible privilégiée de l'exploration, de par ses ressemblances passées avec la Terre et son potentiel exo-biologique unique. Malgré les grandes avancées réalisées au cours du dernier quinquennal, certains observables clés sont manquantes. Ils concernent Mars primitive et la recherche de preuves de vie passées (conditions d'altération, analyse de la matière organique virgine, datation des roches, contraintes sur l'hydrothermalisme en surface/sous-sol), mais aussi Mars contemporaine et son climat (vent, écoulements). Par ailleurs, une autre approche spatio-temporelle de l'échantillonnage de la mesure est nécessaire pour effectuer des avancées significatives sur les grands paramètres géophysiques : le multi-points en sismologie, météorologie et pour la magnétosphère (rôle des nano-satellites) ; ou encore le sondage de la surface à une échelle intermédiaire entre orbiteur et atterrisseur.

Deux nouvelles missions robotisées en surface impliquant la France seront lancées en 2020 (*ExoMars* et *Mars2020*) à la recherche de la matière organique biogénique. Le *rover* de *Mars2020* tentera en plus de sélectionner et d'encapsuler des échantillons (20 tubes de 15gr) susceptibles d'être ramenés sur Terre, comme le prévoit le programme Mars Sample Return (MSR) que la Nasa et l'Esa élaborent actuellement. En parallèle, la mission JAXA MMX, à laquelle la France est associée, est censée rapporter sur Terre en 2029 des échantillons de Phobos, que l'on estime contenir du matériau martien en quantité significative.

La participation de la France à ces missions et à l'analyse des échantillons sur Terre (ce qui inclut la participation à l'infrastructure pour la mise en quarantaine des échantillons) doit être soutenue au plus haut niveau de priorité par le CNES. Derrière celle-ci, le Groupe soutient toute opportunité de missions sol, de mesure multi-points ou de missions orbitales/aéroportées répondant à la problématique d'échantillonnage. Une analyse détaillée de l'engagement français dans l'exploration martienne est présentée en Annexe.

3.4. Planètes Géantes

Le maintien d'un soutien CNES à la mission Nasa Juno (opérationnelle jusqu'en 2021) est nécessaire dans la perspective de la mesure attendue de l'abondance profonde de l'eau dans Jupiter, laquelle aidera les modèles de formation de la planète. La France est très impliquée dans JUICE, qui sera lancée en 2022 vers le système jovien et qui, outre la caractérisation précise de l'atmosphère de Jupiter, explorera les lunes Ganymède et Callisto. En parallèle, des laboratoires Français participent à Europa-Clipper, mission Nasa lancée d'ici 2023 qui explorera la lune Europe. Ces deux missions concomitantes offrent une opportunité unique pour l'exploration du système jovien. Il est impératif de soutenir leur préparation, tant sur le plan des mesures de laboratoires, que celui de la modélisation numérique utile à l'interprétation des données. La Chine envisage aussi une mission vers Jupiter pour 2030 et à laquelle la France devrait s'intéresser.

Enfin, l'Esa et la Nasa devraient décider d'une mission conjointe vers les géantes glacées pour 2030, période qui offre une configuration planétaire optimale pour leur exploration. Pour l'Esa, deux options sont envisagées (i) un orbiteur autour d'Uranus, ou (ii) une sonde de rentrée atmosphérique. Alors qu'Uranus et Neptune restent les grandes « oubliées » de l'exploration du Système solaire des dernières décennies, l'implication de la France sur cette mission revêt une importance stratégique. L'inventaire des exoplanètes réalisé par la mission Kepler a révélé la dominance d'objets de tailles intermédiaires entre la Terre et Neptune, faisant de cette dernière un archétype de grande valeur pour la compréhension des systèmes exo-planétaires.

3.5. Vénus

Côté Nasa, Vénus est restée vierge de toute exploration depuis la fin en 1994 de Magellan qui avait réalisé le premier relevé topographique global d'un corps autre que la Terre. La période 2014 – 2019 a été

marquée par l'arrêt de Venus Express et la non-sélection par la Nasa et l'EsA de plusieurs projets pour l'exploration vénusienne dont la première mesure atmosphérique des gaz rares (DaVinci) ainsi que le premier relevé minéralogique *in situ* de la surface (Vici), et plusieurs projets de cartographie orbitale par radar.

Des pans entiers de la recherche vénusienne restent inexplorés. Cependant, Vénus offre un cadre exploratoire étroit, de par son épaisse couche de nuages qui empêche la caractérisation en orbite de sa surface sur une large part du spectre électromagnétique, et de par son atmosphère acide et brûlante qui limite la durée de vie des missions en surface à quelques heures.

Pour cette raison, le groupe recommande de soutenir fortement les deux concepts principaux à l'étude à même de répondre aux grands questionnements : (i) depuis l'orbite, une mission de reconnaissance du terrain vénusien et de ses mouvements qui pourraient attester d'une activité tectonique actuelle (type EnVision ou Vox, et dans une moindre mesure Veritas), et (ii) dans son atmosphère jusqu'à la surface, une sonde *in situ* réalisant les mesures infaisables depuis l'orbite pour réaliser un relevé précis de la composition atmosphérique (gaz rares et gouttelettes) et de la surface (pétrologie et minéralogie). Derrière ces priorités fortes, il convient d'ajouter des tentatives astucieuses de mesure de la sismologie vénusienne par détection d'ondes de surface depuis l'orbite via l'*airglow* ou dans l'atmosphère via les ondes acoustiques.

La contribution française à la mission multi-disciplinaire EnVision, en lice pour Cosmic Vision M5, constitue la priorité du groupe car elle concerne un vaste périmètre de la communauté avec des observations fondamentales aussi bien pour la surface, l'atmosphère que les échanges entre les deux.

3.6. Lune

On observe aujourd'hui un fort regain d'intérêt pour notre satellite naturel que ce soit via la Lunar Orbital Platform Gateway (LOPG) de la NASA qui se concrétisera dès 2023, l'ambition de l'ESA de s'associer pleinement à ce projet, la poursuite du programme lunaire chinois avec Chang'e 6, 7, 8, les missions indiennes et l'émergence probable de missions « commerciales » d'un format nouveau. En 2014, les priorités scientifiques portaient sur l'installation d'un réseau géophysique pour sonder la structure interne et le retour d'échantillons issus de régions inexplorées *in situ* (face cachée, Bassin Aitken, hautes latitudes, pôles, ...). En 2019, ces objectifs n'ont toujours pas trouvé de réponses programmatiques et restent donc les axes forts de la prospective 2019 — 2024.

Mais au-delà de ces objectifs premiers, les problèmes posés par l'origine et l'évolution du satellite, le couplage Terre-Lune, les interactions avec le vent solaire, et aussi par la méconnaissance du flux météoritique, fournissent un corollaire d'objectifs pertinents auxquels des missions d'opportunité seraient à même de contribuer. Le groupe recommande donc de prendre une part active à cette nouvelle dynamique programmatique pour la Lune et de soutenir à court/moyen terme la fourniture d'instruments à des missions *in situ* sur la base de concepts éprouvés facilement adaptables au contexte lunaire.

3.7. R&T

Le prochain quinquennal devra permettre de franchir les dernières étapes de la maturation du concept Orbitrap et ouvrir une nouvelle ère pour l'analyse des molécules complexes que l'on trouve parmi les corps du Système solaire. La nécessité, pour Mars, de combler l'écart d'échelles entre les sondage *in situ* et orbital pourrait s'appuyer sur des moyens de mobilité adaptés (petits drones étudiés au CST) couplés à des imageurs hyper-spectraux miniaturisés. La spectro-polarimétrie serait très utile pour augmenter notre capacité diagnostique en minéralogie des surfaces par des méthodes passives dans le VIS-IR et contribuer à la mesure de la chiralité dans la matière organique.

3.8. Synthèse des recommandations

La prochaine décennie sera, pour l'exploration du Système solaire, celle du retour d'échantillons. La confirmation que Mars fut autrefois habitable fait du retour d'échantillons martiens la pierre angulaire de l'horizon programmatique. Avec MMX et MSR, la communauté française va s'engager pleinement dans cette dynamique qui permettrait de répondre à des questions fondamentales pour les sciences planétaires et au-delà. Les retours d'échantillons de la Lune et des petits corps devront aussi être soutenus dans un contexte programmatique potentiellement riche, en particulier pour la Lune, pour fournir à la cosmochimie les moyens d'étude nécessaires pour remonter aux conditions de formation du Système solaire.

En ligne avec les recommandations du CERES, le groupe apporte tout son soutien aux missions ESA à l'étude pour Vénus (EnVision) et pour la première exploration d'une géante glacée (M* *Ice Giants*). Le programme obligatoire reste un élément éminemment structurant pour la planétologie européenne qu'il convient de préserver. Mais alors que les deux seules missions en lice pour la planétologie concernent la décennie 2030, les contributions d'opportunité (par exemple aux programmes NASA, JAXA et ESA hors

programme obligatoire) revêtent un enjeu stratégique pour la décennie 2020. Le savoir-faire instrumental français vaut à notre communauté d'être régulièrement sollicitée pour participer à des projets devant apporter des réponses majeures aux principales questions du Système solaire. Ce succès français à l'international doit être encouragé et soutenu, notamment si les projets de contributions se basent sur des instruments issus des concepts R&T financés par le CNES (Orbitrap, mesure du vent, etc.).

Le contexte de la Lune tient une place à part sur la prochaine décennie : riche et hétéroclite, le programme lunaire à l'international incite à soutenir toute participation instrumentale si celle-ci repose sur un savoir-faire « sur étagère » à très faible risque programmatique.

Enfin, l'analyse des réponses de la communauté à l'appel à idées a mis en exergue l'intérêt que constituerait un nanosat dédié au sondage de la structure interne des petits corps ou des corps planétaires. Ces mêmes nanosats pourraient s'avérer la meilleure option pour améliorer le maillage des champs magnétique et gravitationnel grâce à des mesures multi-points.

Tableau 1 : Synthèse des priorités scientifiques

Type de mesure/d'observables	Thèmes scientifiques	Cadre de réalisation	Soutien
Retour d'échantillons : 1. Mars (MSR & MMX) 2. Lune & Petits Corps	(<i>QIII</i>) Vie extraterrestre ? (<i>QI</i>) Géochimie & Géochronologie des telluriques (<i>QIII</i>) Origines de la matière organique	MSR, MMX Chang'e 6	
(1 ^{ère}) Exploration <i>in situ</i> des géantes glacées	(<i>QI</i>) Formation du Système solaire	ESA M* NASA Flagship	+++
Topographie & Tectonique vénusiennes	(<i>QII</i>) Divergences climatiques des planètes de type « terrestre »	ESA M5	
Sondage <i>in situ</i> (si possible sur la base d'une R&T)	(<i>QI</i>) Formation / différenciation des corps (<i>QII</i>) Climat des planètes (<i>QIII</i>) Origines de la matière organique	NASA Discovery/NF JAXA, ESA	++
Structure interne et/ou magnétosphère d'un petit/grand corps par nanosat(s)	(<i>QI</i>) Formation des Système solaire/petits corps (<i>QI</i>) Dynamo/Magnétosphère de la Lune ou de Mars	NASA Discovery, ESA Plan. Defense, CNSA Zenghe	+
Opportunité d'instrument « sur étagère »	(<i>QI</i>) Stratigraphie & Structure interne (<i>QII</i>) Étude des volatiles et de la matière réfractaire	Contexte lunaire	

4. Conclusion

Si la période 2014 – 2019, sur la lancée du précédent quinquennal, a été marquée par une moisson scientifique exceptionnelle qui a notamment profité à la communauté des petites corps ; la période 2019 – 2024 devrait voir un retour au premier plan de l'exploration lunaire et surtout la poursuite des grands projets de retour d'échantillon entamés au cours du présent quinquennal. Pour son prochain mandat, le GT Système solaire aura à charge de distinguer les opportunités les plus prometteuses scientifiquement au sein d'un paysage programmatique appelé à se complexifier avec la recrudescence d'acteurs et du nombre de missions et subissant par ailleurs de profondes mutations (émergence du *new space* et des nanosatellites).

5. Annexe : Roadmap Mars

Lien vers la Roadmap Mars établie en 2017 par les groupes Système solaire, Exobiologie & Exoplanètes ainsi que Soleil-Héliosphère-Magnétosphère :

<https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/wgLmozY0d2lO8bD>