

Synthèse des réflexions du Groupe de Travail Système Solaire (GTSS) du CNES :

Y. Benilan (LISA), D. Delcourt (LPP), A. Doressoundiram (LESIA), T. Fouchet (LESIA), O. Grasset (LPGN), T. Guillot (OCA), S. Maurice (IRAP, président), P. Michel (OCA), F. Montmessin (LATMOS), F. Poulet (IAS), V. Sautter (MNHN), M. Toplis (IRAP), M. Wieczorek (IPGP),

Thématicien CNES : F. Rocard

Les messages importants du GTSS sont soulignés, les recommandations encadrées.

1. Contexte.

1.1. Grandes questions

Pour cette synthèse des grandes questions en planétologie, nous partons des visions de la NASA (Decadal Survey, mars 2011), de l'ESA (Cosmic Vision, 2005) et dans une moindre mesure de l'Union Européenne (Astronet, 2007, révision fév. 2013). L'étude du Système Solaire s'organise autour de 3 grandes thématiques :

➤ Origine du Système Solaire & Matière Primitive

C'est la « dimension astrophysique » qu'on explore ici, celle de la formation des objets du Système Solaire il y a 4,56 milliards d'années à partir d'une nébuleuse gazeuse contenant des restes d'étoiles des générations précédentes : quels étaient les premières étapes, les conditions et les processus à l'œuvre lors de la formation du Système Solaire et quelle était la nature de la matière interstellaire incorporée (Q1.1) ? De ce nuage de matière interstellaire, naissent deux types de planètes de part et d'autre de la « ligne des glaces ». A l'intérieur, les planètes telluriques : quels sont les mécanismes qui ont joué dans les processus d'accrétion, les processus chimiques et la différenciation des planètes internes et l'évolution de leur atmosphère (Q1.2) ? A l'extérieur de la ligne des glaces, les planètes géantes et glacées : comment se sont-elles agrégées, et surtout, comment leurs satellites se sont-ils formés (Q1.3) ? Les modèles dynamiques les plus récents (modèle de Nice, Grand Tack scenario) et les observations d'exoplanètes de type Jupiter-chaud aussi près de leur étoile que Mercure du Soleil montrent que les géantes peuvent migrer : a-t-on des preuves que les planètes géantes de notre système Solaire aient modifié leur position orbitale (Q1.4) ? Le bombardement tardif (Late Heavy Bombardment – LHB) il y a 3,9 milliards d'années, s'il a bien existé, est-il une des conséquences de ces mouvements migratoires ? Pour toutes ces planètes, et plus particulièrement la Terre, nous devons nous poser la question de l'origine de l'eau : résulte-t-elle du dégazage primordial de la planète ou fut-elle apportée ultérieurement par impacts successifs (Q1.5) ?

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

➤ Propriétés et évolution des planètes

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

à l'œuvre dans les atmosphères planétaires, ainsi que les interactions surface-atmosphère, peuvent-elles permettre une meilleure compréhension de l'évolution du climat de la Terre (Q2.3) ?

La vision globale du système de Saturne, les études très détaillées de Vénus, Mercure et surtout Mars ont énormément fait progresser cette thématique. Surfaces et atmosphères sont très bien caractérisées ; néanmoins les structures internes sont encore difficiles d'accès.

De plus en plus de spécialistes des géosciences font de la planétologie et apportent leur savoir-faire. En retour, l'étude des planètes fait progresser la compréhension de l'origine et de l'évolution de la Terre.

➤ Habitabilité des planètes

L'étude de « la vie et de ses origines » est désormais une thématique à part entière de la planétologie. Dans un premier temps on s'intéresse, très légitimement, à la chimie organique qui est à la base de tous les êtres vivants sur Terre : quelles sont les premières sources de matière organique ? Où se perpétue aujourd'hui la synthèse organique (Q3.1) ? Quant aux conditions favorables à l'apparition de la vie, on parle d'habitabilité, la question est plutôt au passé pour les voisines de la Terre : les planètes Mars et Vénus ont-elles connu autrefois des environnements propices à la vie ? Existe-t-il des preuves que la vie soit apparue sur ces planètes (Q3.2) ? Mais on ne néglige pas pour autant la recherche d'une vie extraterrestre aujourd'hui : existe-t-il actuellement des habitats dans le Système Solaire qui réunissent les conditions nécessaires - matière organique, eau, énergie, substance nutritive - pour que la vie apparaisse et se maintienne ? Existe-t-il actuellement des organismes vivants dans certaines niches écologiques sur Mars, Europe ou Encelade (Q3.3) ?

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

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

1.2. Contexte national et international

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

Le Decadal Survey de la NASA (mars 2011) structure la programmation américaine de l'exploration du Système Solaire, autour de 3 programmes et leurs priorités : les missions lourdes, dites « *Flagship* » avec comme priorité : 1/ la préparation du retour d'échantillons martiens, 2/ Jupiter-Europe, 3/ Orbiteur et sonde vers Uranus ; les missions moyennes dites « *New Frontiers* » dont les priorités sont : 1/ Retour d'échantillons cométaires, 2/ Retour d'échantillons du bassin Aitken de la Lune, 3/ Sonde dans Saturne, 4/ Astéroïdes troyens, 5/ Exploration *in situ* de Vénus ; les petites missions du programme « *Discovery* » (pas de priorités). Notons qu'il n'y a plus à proprement parler de programme dédié à l'exploration de Mars, même si cette planète conserve un attrait spécifique aux US.

Depuis 2005, l'ESA structure sa programmation autour du programme scientifique obligatoire *Cosmic Vision*. Il prend la suite des programmes *Horizon 2000* (1984) et *Horizon 2000 Plus* (1994-

1995) à l'origine des missions scientifiques lancées entre 1990 et 2014. Les premières missions du programme *Cosmic Vision* ont été décidées : L1, M1, M2, M3. Les opportunités L2/L3 sont d'ores et déjà préemptées (Univers chaud, Univers gravitationnel). L'opportunité M4 est encore à pourvoir, ainsi que le créneau L4. Le programme *Cosmic Vision* est la colonne vertébrale du programme d'exploration spatiale en Europe. Il existe depuis 2012 dans ce programme, un volet petites missions (S-class). La mission S1 (CHEOPS, transit exoplanètes, lancement 2017) est engagée en partenariat avec la Suisse.

Le second pilier de la programmation ESA est le programme optionnel d'exploration robotique qui vise à voir se concrétiser, à moyen terme, une mission de retour d'échantillons de Mars (*Mars Sample Return* ou MSR). La première mission de ce programme est ExoMars (composantes 2016 et 2018). Par la suite, plusieurs missions seront engagées pour valider les technologies nécessaires à l'objectif principal ; il s'agit de contribuer aux missions russes Luna Resurs orbiter et lander (2018 & 2019) et LPSR (2020/22), puis des missions dites intermédiaires (PHOOTPRINT ou/et MPL/SR ou/et INSPIRE) avant la mission MSR autour de 2030.

Note : La Commission Européenne s'inscrit maintenant comme un partenaire durable de la recherche spatiale. Dans le programme FP7, le CNRS a été PI de l'infrastructure de recherche *Europlanet* qui a permis d'intégrer à l'échelle européenne la communauté des sciences planétaires. Dans le cadre de *Horizon 2020*, la communauté souhaite continuer la structuration des sciences planétaires avec un nouveau projet *Europlanet*. En concertation avec l'ESA, la commission européenne a également lancé des appels d'offre ciblés sur l'exploitation scientifique de la mission Rosetta, la préparation de l'exploration martienne et lunaire, et le financement d'une *curation facility*. Ces programmes participent activement à la structuration de la communauté, mais ne sont en aucun cas proposant de nouvelles opportunités spatiales.

1.3. Etat de la programmation en planétologie

La figure 1 fait état de la programmation décidée aujourd'hui en planétologie. Les missions en cours décidées par les agences spatiales (ESA, NASA, JAXA, Roscosmos) couvrent les 3 thématiques scientifiques définies en 1.1.

2. Bilan depuis Biarritz

2.1. Résultats scientifiques

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

Petits corps. Les comètes et les astéroïdes ont conservé la mémoire de la composition initiale de notre Système Solaire et de l'environnement dans lequel nos planètes se sont formées. C'est pourquoi les missions spatiales et les observations depuis la Terre se concentrent sur l'analyse de leur composition et de leur structure. Ces observations ont mis en évidence la grande variété de leurs propriétés physiques et de leurs compositions. Les images à très haute résolution ont aussi permis de comprendre qu'un régolithe couvre souvent leurs surfaces, ce qui complique l'analyse de leur composition globale. Plusieurs missions ont permis de caractériser récemment certains objets de près (Figure 2a): Dawn autour de Vesta en 2011 (Cérès en 2015), Rosetta survolant Lutetia en 2010. L'actualité fut aussi marquée par le retour d'un millier de micrograins (< 10 microns) de l'astéroïde Itokawa en 2010 par la mission Hayabusa. Cet objectif de retour d'échantillons primordiaux à fins d'analyses poussées dans les laboratoires motive clairement les missions à venir, Hayabusa-2/JAXA et OSIRIS-Rex/NASA. A très court terme, la communauté scientifique attend la mise en orbite de Rosetta autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko en mai 2014 et l'atterrissage du lander Philae en novembre.

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

Mercure. Mercure se caractérise par une surface très vieille, une atmosphère extrêmement ténue formée de particules issues du vent solaire ou éjectées de la surface, et un champ magnétique intrinsèque trop faible pour la protéger du vent solaire en permanence. Depuis sa mise en orbite en 2011, la mission Messenger a changé notre connaissance de cette planète grâce à une exploration détaillée focalisée sur quatre objectifs majeurs : histoire géologique (via une couverture complète de la surface du visible à l'infrarouge à moyenne et haute résolution) ; étude de la dynamo interne (via une caractérisation du champ magnétique intrinsèque) ; caractérisation du noyau et identification de la zone fondue (via l'étude des champs gravitationnels) ; composition des régions polaires protégées du Soleil (dont la confirmation de glaces d'eau par spectroscopie neutron). En parallèle, un programme d'observations télescopiques se poursuit (ex. Figure 2c). L'exploration de Mercure n'en est qu'à ses débuts et va se poursuivre avec les deux sondes de la mission BepiColombo MPO et MMO (décollage 2016 / arrivée 2024). Celles-ci fourniront un vaste ensemble d'observations de la planète et de son environnement qui sont attendues autant par les géologues et géophysiciens que par la communauté des plasmas.

Mars. Mars demeure l'objet planétaire sur lequel se concentrent le plus d'efforts en termes d'exploration, suivant divers objectifs scientifiques (géophysique, géologie, climatologie et exobiologie). Depuis 2000, 4 orbiteurs ont fonctionné avec succès, ainsi que 3 rovers et 1 atterrisseur. Les faits les plus marquants et les plus récents concernent les résultats du rover Curiosity. On savait depuis longtemps que de l'eau liquide a circulé en surface (traces d'activité fluviale, localement lacustre, présence de minéraux d'altération comme les argiles découvertes par Mars Express). Curiosity apporte de nouvelles contraintes sur l'habitabilité passée de Mars par la découverte et la caractérisation de sédiments fluviaux et lacustres : présence conjointe de phyllosilicates, de magnétite et de sulfates dans des sédiments très fins déposés dans l'eau (Figure 2d). Les analyses ont aussi révélé une grande diversité chimique du sol martien, et surtout le fait que le sol le plus fin contient beaucoup d'hydrogène, dû à l'eau à la fois adsorbée et constituante de minéraux du sol, ce qui pourrait constituer une partie importante du réservoir d'eau présent à la surface de Mars. L'origine de ce réservoir est l'une des clés de la compréhension de l'évolution du climat martien récent. Curiosity a aussi permis les mesures les plus précises jamais faites de la composition atmosphérique (incluant l'absence de méthane) et plus spécifiquement des isotopes de l'argon, de l'hydrogène et du carbone dans l'atmosphère martienne. Celles-ci apportent des très fortes contraintes sur les modalités de la perte de l'atmosphère de la planète. Dans le cadre des précédentes prospectives, il était clairement envisagé une mission de retour d'échantillons à l'horizon 2020. Ce calendrier n'est plus d'actualité, mais l'effort continue : Mars2020 (NASA) prévoit une collecte d'échantillons pour un retour ultérieur sur Terre ; la mission ExoMars est en cours de développement. Notons aussi deux missions plus focalisées, sur l'échappement atmosphérique de Mars (MAVEN, 2013) et la structure interne (InSight, 2016).

Vénus. De par ses similarités comme ses disparités avec la Terre, l'exploration de Vénus est un axe fort de la planétologie moderne. L'un des enjeux les plus importants de son étude est de retracer son histoire climatique, couplée à celle de son intérieur. Venus Express est l'unique mission à apporter de nouvelles données sur cette planète depuis 2006 (arrêt prévu en 2014). Venus Express a apporté une connaissance détaillée de la haute atmosphère et de la composition de l'atmosphère sous les nuages.

Parmi les faits marquants, il convient de noter la détection du dioxyde de soufre au sommet de nuages qui pourrait suggérer que certains volcans de Vénus sont encore actifs (Figure 2e), la mise en évidence de la très forte accélération des vents sur six ans qui reste à ce jour inexplicite, ainsi qu'un possible ralentissement de la rotation de la planète sur elle-même. De nombreux projets ont été soumis à l'ESA et à la NASA pour définir les missions futures. Aucune n'a été sélectionnée à ce jour.

Les satellites des planètes géantes. Les satellites des planètes géantes possèdent très probablement des réservoirs liquides sous les glaces, exception faite d'Io. Pour Europa et Encelade, il est admis qu'ils constituent des environnements habitables car l'eau peut être en contact direct avec les roches sous-jacentes. Pour Ganymède, Callisto et Titan, les réservoirs liquides sont piégés entre deux couches de glaces ce qui empêche peut-être les échanges chimiques et énergétiques entre les silicates et l'océan, échanges jugés nécessaires à l'habitabilité de ces environnements. Mentionnons aussi le caractère unique de Ganymède qui est le seul corps du Système Solaire où interagissent trois champs magnétiques (champ jovien, champ intrinsèque et champ induit par l'océan profond), l'extraordinaire activité au niveau des pôles d'Encelade et d'Europa et l'extrême complexité de la géologie des petites lunes qui nous aide à mieux comprendre les processus de formation des systèmes planétaires, ou encore la forte activité de Io à l'origine du magnétodisque jovien. Les nombreuses découvertes de ces dernières années, en particulier sur Titan (96^{ème} survol en 2013 - variations saisonnières de la dynamique atmosphérique (ex. Figure 2f) et du niveau des lacs, contraintes sur la structure interne, découvertes de nouveaux composés complexes comme le propylène, ...) et Encelade (18^{ème} survol en 2012 - caractérisation des volatils dans les geysers, analyse de la structure 3D et de la variabilité des plumes) laissent présager d'une activité toujours intense sur les 4 années à venir (arrêt programmé de Cassini en 2017). Il faudra ensuite attendre 2030 avec l'arrivée de JUICE dans le système de Jupiter pour de nouvelles données, sauf si la NASA engage finalement Europa Clipper, une mission dédiée à l'étude de la lune Europa. A noter que Juno ne fera pas de mesures concernant les satellites.

Les planètes géantes. Saturne est la seule planète pour laquelle des informations de premier ordre ont été obtenues récemment. L'observation multi-instruments régulière à haute résolution par Cassini sur bientôt dix ans a mis en évidence de nombreux phénomènes météorologiques inattendus qui sont autant d'indications de la complexité de la dynamique interne et des couplages existant entre les différentes couches de l'atmosphère : ouragan du pôle Nord (Figure 2h), observation d'une tempête globale en 2011, absence d'évolution saisonnière des courants-jets sauf à l'équateur, etc. Il faut y ajouter l'étude très détaillée des anneaux et celle de la structure et de la dynamique de la magnétosphère. Pour Jupiter, la sonde américaine Juno (arrivée prévue en 2016) devrait apporter des informations sur sa structure interne, son champ magnétique et la dynamique atmosphérique dans les régions polaires. Il faudra aussi compter sur la mission JUICE (Cosmic vision L1, 2023-2030) qui fera un suivi temporel sur presque 3 ans de la haute atmosphère jusqu'à la troposphère (5 bars). En parallèle, la découverte indépendante d'oscillations propres de Jupiter (observations sol) et de Saturne (Cassini) permet d'envisager une nouvelle manière d'étudier l'intérieur de ces planètes qui doit être prise en compte dans le cadre de missions futures. Enfin, notre connaissance des planètes géantes glacées Uranus et Neptune reste très parcellaire, même si des observations de télescopes sol et espace ont permis de mettre en lumière des changements survenus dans leur atmosphère cette dernière décennie et si de nouvelles équations d'état de la matière à très hautes pressions ont conduit à de nouveaux modèles de leur intérieur.

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

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

Recommandation Biarritz (2009)		Situation en 2014
Missions décidées	<ul style="list-style-type: none"> • BepiColombo • ExoMars 	<ul style="list-style-type: none"> - BepiColombo est en développement. Quelques retards mais lancement 2016. - ExoMars-2018 est en difficulté technique et financière. Le programme continue.
Missions présélectionnées CV (ESA)	<ul style="list-style-type: none"> - Mission M / MarcoPolo-R - Mission L / EJSM - Mission Vénus (EVE) 	<ul style="list-style-type: none"> - MarcoPolo-R et EVE non sélectionnées. - EJSM devient JUICE, sélectionnée en L1.
Sismologie martienne et lunaire	<ul style="list-style-type: none"> • VBB pour post-ExoMars • Selene-2 • ILN 	<ul style="list-style-type: none"> - Le VBB est sélectionné sur la mission InSight du programme Discovery de la NASA. - ILN est abandonné. - Selene-2 est toujours en cours de définition.
Programme d'exploration (ESA)	<ul style="list-style-type: none"> • MSR avec/sans américains • Long terme: déploiement d'un réseau géophysique et climatique martien 	<ul style="list-style-type: none"> - Le programme d'exploration de l'ESA est bloqué sur sa première mission, ExoMars. - La NASA s'engage sur le retour d'échantillons avec Mars2020 (caching).
Actions de R&T	<ul style="list-style-type: none"> • Datation • Analyse <i>in situ</i> et miniaturisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Plusieurs actions R&T, dont la faisabilité de la datation <i>in situ</i>.
Communication scientifique	<ul style="list-style-type: none"> • Insuffisance 	<ul style="list-style-type: none"> - Des progrès.

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

2.3. Bilan programmatique depuis Biarritz

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

Nouvelles missions	JUICE, InSight, Hayabusa-2_MASCOT
Poursuite des Opérations	Cassini, Mars Express, Venus Express, Mars Odyssey, Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Exploration Rovers
Lancements	Lunar Reconnaissance Orbiter (2009), JUNO (2011), Mars Science Laboratory (2011), GRAIL (2011), MAVEN (2013)
Nouveaux retours scientifiques (= nouvelles missions)	2010 : Rosetta survole Lutetia 2011 : MESSENGER étudie Mercure 2011-2012 : DAWN en orbite autour de VESTA 2012 : GRAIL mesure précise du champ de gravité lunaire 2012 : CURIOSITY en opération : important retour scientifique
Reports	BepiColombo + 2 ans ExoMars + 2 ans pour Pasteur Selene-2 + 5 ans minimum
Echecs / Annulations	Echec Phobos-Grunt Echec de la coopération ESA-NASA sur ExoMars ILN annulé

3. Perspectives 2014⁺

3.1. Feuille de route

Plusieurs ateliers de travail ont conduit à préparer cette prospective. Sur la base des questions explicitées en 1.1, ils ont permis d'identifier des profils de missions qui répondent aux attentes scientifiques à moyen et long terme. Cette liste est ambitieuse (Figure 3); elle reflète la richesse des approches possibles et l'apport des différents objets à chaque question scientifique. Pour chacune des entrées, nous avons cherché si des opportunités programmatiques étaient identifiées à l'ESA, à la NASA, ou chez d'autres partenaires, sans être complètement exhaustifs. Sans surprise, dans la plupart des cas, il existe de telles missions pour les priorités scientifiques que nous nous donnons. Dans la majorité des cas, il serait prématuré, voire dangereux de mettre en avant telle ou telle mission pour répondre à une question ou un corpus de questions, dans un contexte programmatique que nous ne contrôlons pas.

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

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

On constate à la lecture de la feuille de route que la référence aux exoplanètes est transverse aux 3 thématiques de la planétologie (voir 1.1), ce qui n'était pas le cas il y a une décennie. La découverte des exoplanètes a changé notre vision de l'origine et de l'évolution du Système Solaire. Plus la caractérisation des exoplanètes, et notamment leur atmosphère progressera, plus les planétologues s'impliqueront.

Recommandation d'une mission pluridisciplinaire de caractérisation des atmosphères des exoplanètes.

3.2. Filières instrumentales

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

Spectro-imagerie : ISM (Phobos88), OMEGA (Mars96 et MEX), VIMS (Cassini), DISR (Huygens), Virtis (VEX et Rosetta). **FUTUR** : Symbio-Sys (BepiColombo), MAJIS (Juice)

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

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

Chimie *in situ* : Malachite (Venera), ACP-GCMS (ACP & GC sur Huygens), COSAC (Philae), GAP (GC & TDlas sur Phobos Grunt), SAM (GC sur MSL). **FUTUR** : Orbitrap (R&T)

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

Radars : Ballon martien (Mars-98), CONSERT (Rosetta). **FUTUR** : WISDOM (ExoMars Pasteur)

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

3.3. Priorités programmatiques

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

Cosmic Vision. Grande priorité des SPS précédents, le programme scientifique obligatoire de l'ESA a été, depuis sa mise en place, le moteur du développement de la planétologie en France. Rappelons le retour scientifique remarquable des missions Cassini-Huygens (Saturne-Titan), Mars Express (Orbiteur de Mars), Venus Express (orbiteur de Vénus), qui sont encore en activité. Nous attendons beaucoup des missions en cours de réalisation : Rosetta (noyau cométaire, arrivée mai 2014, atterrissage en novembre) et BepiColombo (Mercure, lancement juillet 2016, arrivée 2024). La dynamique se poursuivra dans la décennie à venir : JUICE (L1/ Jupiter, lunes glacées, lancement juin 2022, arrivée à Jupiter 2030), Solar Orbiter (M1/ Soleil, mission SHM & SSEWG, lancement juillet 2017), PLATO (M3, lancement début 2024). La continuation du programme *Cosmic Vision* doit rester la priorité de la communauté.

Le groupe prend connaissance d'excellentes propositions pour M4, qui couvrent l'ensemble des champs thématiques de la discipline. Il ne connaît pas tous les projets et, en conséquence, n'est pas en mesure de donner de priorité. MarcoPolo-R, si une nouvelle cible peut être trouvée, a montré sa valeur scientifique et technologique lors de la compétition M3.

Les systèmes de Neptune et Uranus sont encore méconnus. Au-delà de l'intérêt intrinsèque de ces systèmes planétaires pour notre compréhension de notre Système Solaire, leur exploration apporterait un éclairage sur une famille importante d'exoplanètes. Un tel projet correspond à la taille d'une mission L (projet placé par le SPC de l'ESA comme priorité suite aux missions L2 et L3).

Recommandation : Priorité à la continuité du programme CV

- Sécurisation de BepiColombo et JUICE
- Engagement ambitieux sur M4
- Une exploration des géantes glacées correspond à l'ambition d'une L4

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

Missions nationales. Depuis les tentatives Mars Premier et NetLander, il n'y a plus de programme français en planétologie. Plusieurs consultations de la communauté ont montré que les plateformes nationales micro/mini-satellites ne conviennent pas à nos besoins. Les spécificités, les coûts et la complexité des missions planétaires ne permettent pas d'envisager une mission nationale en planétologie.

Ballons. La communauté française souhaite contribuer à deux projets d'exploration de Vénus et Titan, qui requièrent des études (Phase 0/A) de la division ballon du CNES. Ces missions n'ont pas de contexte programmatique bien défini : M4 à l'ESA, New Frontiers ou Discovery à la NASA, projets russes. Le CST a fait savoir qu'un seul de ces projets de ballons planétaires – au maximum – pourrait être étudié. Rappelons que seuls la NASA et le CNES ont une expertise dans le domaine des ballons planétaires, à l'inverse de l'ESA. Par ailleurs, les ballons dans l'atmosphère terrestre offrent d'intéressantes opportunités de vol pour la planétologie, particulièrement pour des validations technologiques (ex. orbitrap) afin d'augmenter leur niveau de TRL. Si la communauté internationale fait émerger des missions d'exploration de Titan ou Vénus utilisant un ballon, nous souhaitons que le CNES y participe.

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

- *Les petites expériences scientifiques*, ou collaborations scientifiques sans fourniture instrumentale (financement COSI), permettent de maintenir des activités scientifiques et des collaborations internationales de haut niveau ; elles sont toujours d'un excellent rapport qualité/prix. Citons dans les dernières années, voire en cours de réalisation : Genesis (Soleil), Stardust, Dawn, OSIRIS-Rex (petits corps), Juno, New Horizons (Jupiter, Pluton), Lunar Prospector, Grail, Selene, Chandrayaan (Lune), Messenger (Mercure), Odyssey, MERs, MRO (Mars), en partenariat avec la NASA, l'ISRO et la JAXA. Ces missions ont permis d'alimenter notre communauté en données variées et de grande qualité, parfois également des échantillons auxquels nos laboratoires ont eu accès (Genesis, Stardust). Notre participation aux programmes NASA/Discovery & New Frontiers, aux programmes indiens et japonais, chinois et russes dans une moindre mesure, permettent à très faible coût des collaborations scientifiques remarquables. Nous recommandons vivement ces collaborations, sans donner de priorité, vue la diversité des projets possibles et les très faibles coûts engagés.
- *Les petites contributions instrumentales* sont typiquement de 3-5 M€ à l'exemple de fournitures sur Phobos-Grunt (3 M€ Mars, Russie – échec), MAVEN (1,5 M€ Mars, NASA) et Hayabusa-2/MASCOT (4,5 M€y compris la part CNES/CST, petit corps, JAXA). Pour ces réalisations, les calendriers sont parfois tendus, ce qui n'est pas toujours compatible avec des développements technologiques impliquant une prise de risques importante. Les petites contributions instrumentales permettent un excellent retour scientifique, sur la base du savoir-faire des laboratoires (spatiaux). Pour un coût modéré, des contributions instrumentales sur les programmes NASA/Discovery & New Frontiers, les programmes indiens et japonais, permettent un grand retour scientifique et la pérennisation des compétences dans les laboratoires.
- *Les grosses opportunités instrumentales* représentent une situation assez nouvelle, à l'exemple des contributions françaises sur MSL (instruments ChemCam et SAM, en opération depuis août 2012) et de la fourniture du sismomètre pour la mission InSight (lancement 2016), toutes deux pour l'exploration de Mars en partenariat avec la NASA. De tels engagements (10-20 M€) requièrent une totale confiance dans le partenaire et le management de son projet. Ils n'ont de sens que s'ils correspondent à une priorité forte de la thématique qui profitera à une communauté étendue de chercheurs, que si une telle fourniture est un élément central de la mission, offrant à la communauté un retour scientifique prometteur et une exceptionnelle visibilité du CNES et ses

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

Recommandation : Les missions d'opportunité

Le contexte programmatique nous incite à accorder une très grande priorité aux opportunités, qui reposent de fait sur les filières instrumentales de la communauté. Nos priorités thématiques pour ces opportunités sont:

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

Les opportunités de mission sont fréquentes en planétologie. Elles ont toutes en commun un démarrage rapide et difficilement prévisible. Elles répondent toujours à une demande de la part de nos partenaires. Ces nombreuses demandes témoignent de l'excellence de notre thématique. Dans la mesure où les missions d'opportunité se décident en peu de temps, le groupe recommande que le PMT du CNES prévoit chaque année une ligne budgétaire « ouverture de programme » d'un niveau important (~2 M€) pour les opportunités en planétologie.

3.4. Programme de R&T

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

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

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

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

Pour mémoire, en moyenne, depuis 2006, le budget R&T annuel en planétologie est de l'ordre de 400 k€(max. 562 k€ min. 246 k€). Il représente entre 13 et 19% du budget R&T en Sciences de l'Univers.

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

Recommandation : La R&T doit privilégier la conception d'instruments d'analyse *in situ*.

A Biarritz, il avait été proposé de développer un système de datation. Porté par l'IDES à Orsay, le projet de datation *in situ* sur Mars est très intéressant scientifiquement mais complexe à mettre en œuvre. Il repose sur la mesure du chronomètre $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$. La concentration en potassium est obtenue en LIBS (mesure analytique type ChemCam) et les isotopes de l'argon sont obtenus par spectrométrie de masse des espèces désorbées par le laser. Ce projet a été soutenu à travers plusieurs actions de R&T, ainsi qu'une thèse financée par le CNES qui a permis de mettre en place un banc expérimental au laboratoire, puis son exploitation et son optimisation. Les premiers résultats sont encourageants mais ne permettent pas encore d'envisager la réalisation d'une expérience spatiale. Nous réitérons l'intérêt de la communauté pour une expérience de datation. Les premières années de R&T n'ont pas confirmé la possibilité de la réalisation d'un démonstrateur et le travail de R&T doit donc se poursuivre.

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

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

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

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

3.5. Résumé des recommandations du GTSS

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

Recom-1 : Priorité à la continuité du programme CV

- Sécurisation de BepiColombo et JUICE
- Engagement ambitieux sur M4
- Une exploration des géantes glacées correspond à l'ambition d'une L4

Recom-2 : Retour d'échantillons

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

Recom-3 : Les missions d'opportunité

Le contexte programmatique nous incite à accorder une très grande priorité aux opportunités, qui reposent de fait sur les filières instrumentales de la communauté. Nos priorités thématiques pour ces opportunités sont (sans ordre de priorité):

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

Recom-4 : Exoplanètes

Recommandation à moyen terme d'une mission pluri-disciplinaire de caractérisation des atmosphères des exoplanètes.

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

Recom-1 : Analyse *in situ*

La R&T doit privilégier la conception d'instruments d'analyse *in situ*.

Recom-2 : Orbitrap

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

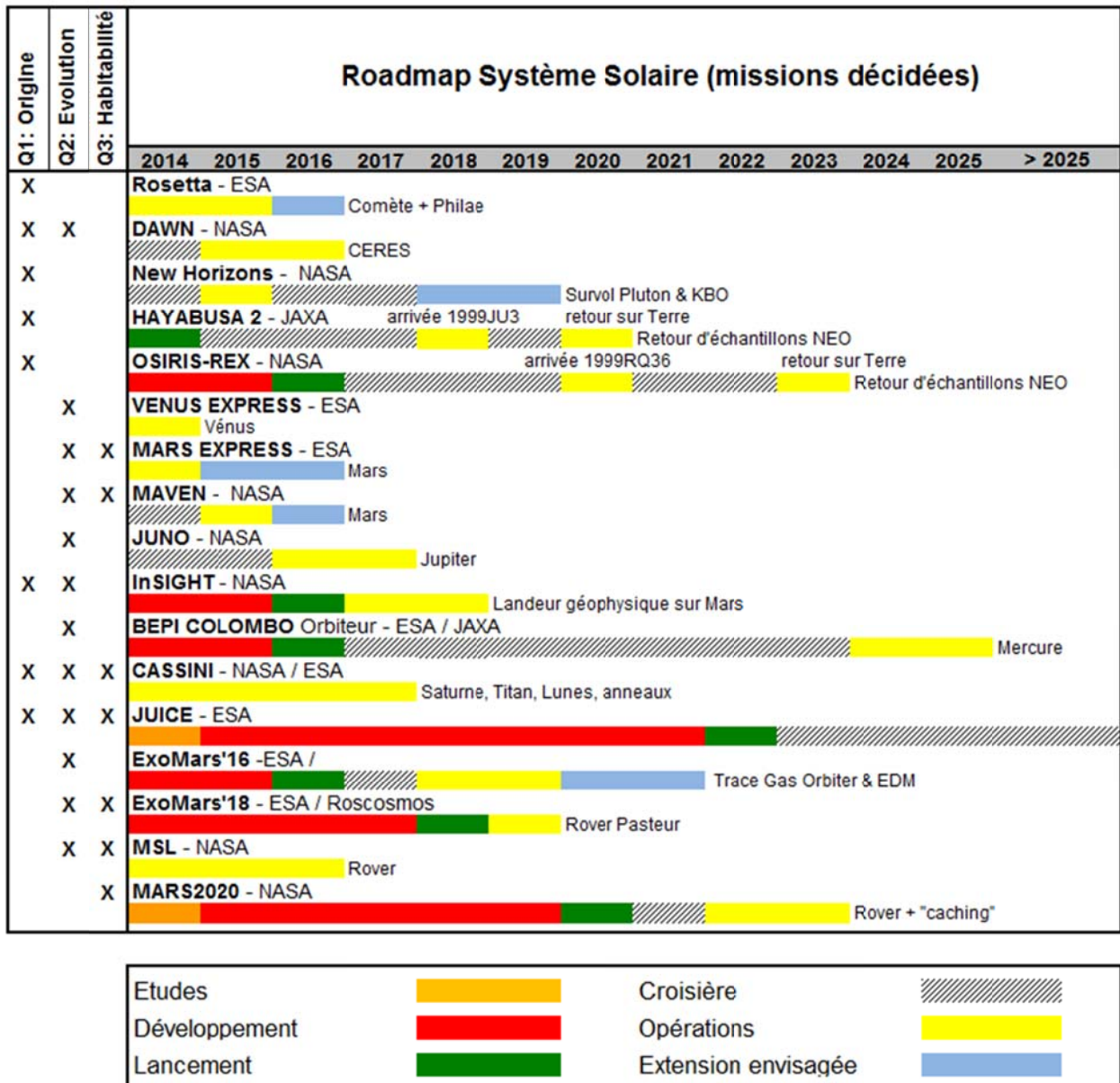


Figure 1 : Etat de la programmation en février 2014 (mission décidées).

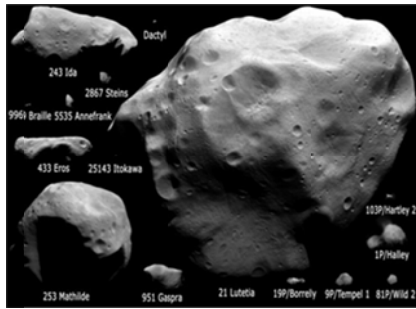


Figure 2a : Quelques petits corps visités ou survolés, montrant une grande variété de morphologies, tailles et structures. Le plus gros sur cette figure, Lutetia (survol Rosetta en 2010), a un diamètre de ~100 km.

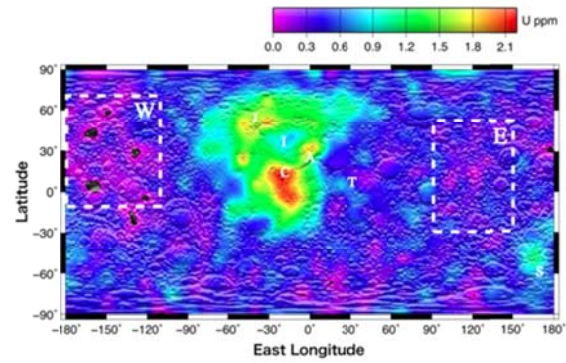


Figure 2b : Abondance d'uranium lunaire mesurée par le spectromètre gamma de Kaguya, comme traceur de la formation de la croûte. Les continents les plus anciens ne sont pas aussi uniformes en composition qu'on a pu le croire (zones W et E).

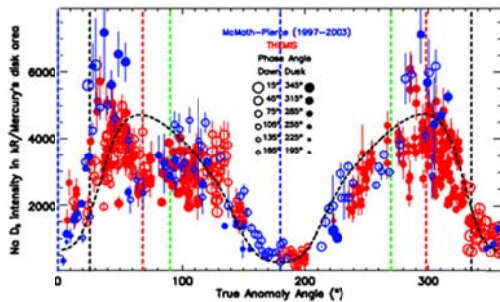


Figure 2c : Sept années d'observations de Mercure avec le télescope THEMIS. Variation de l'émission intégrée du sodium exosphérique en fonction de la position de Mercure sur son orbite. soleil.

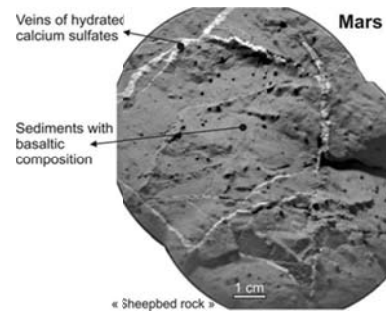


Figure 2d : Veines de sulfate de calcium identifiées et analysées par le laser de ChemCam à bord de Curiosity, dans le cratère Gale.

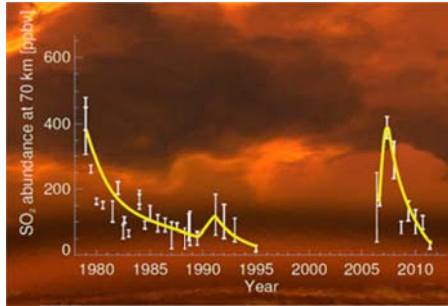


Figure 2e : Compilation de mesures du SO₂ vénusien au-dessus de la couche de nuages. Les mesures récentes (SPICAV sur Venus Express > 2005) confirment la variabilité pluri-annuelle encore inexpliquée de ce composé.

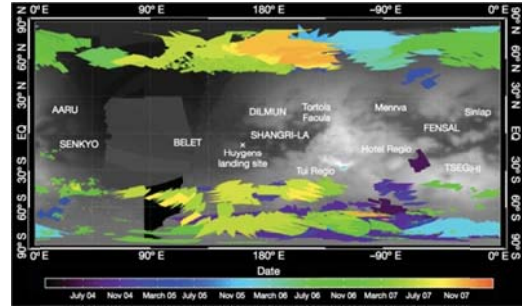


Figure 2f : Carte des nuages de Titan. De 2004 à 2007, plus de deux cent nuages ont été observés par Cassini-Huygens.

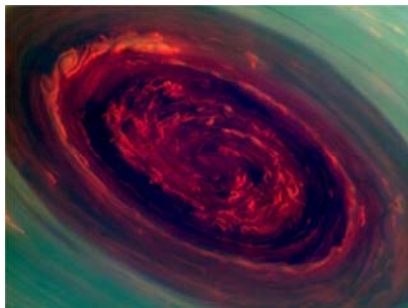


Figure 2h : Vortex permanent au pôle nord de Saturne : diamètre 2000 km, vents 150 m/sec. Images Cassini-Huygens 2012 en fausses couleurs : 728 nm (vert) et 752 nm (rouge).

Thèmes prioritaires			Type de mission pour réaliser les objectifs	Opportunités connues			
Objet	Objectifs scientifiques	Questions		NASA**	ESA CV	ESA Explo	Autres
Petits Corps	Géocroiseur primitif Objet transition comète-astéroïde	Q1.1 Q1.2 Q1.5	Analyse in situ & retour d'échantillons		MarcoPolo-R (M4?)		(1)
	Troyens / Ceinture principale / NEO	Q1.1 Q1.2	Survol In situ (surface +	NF (Troyens)			(2)
	Comète / Centaurs / TNO Composition, structure	Q1.1 Q1.2 Q1.5 Q3.1	Analyse in situ & retour d'échantillons	NF			(3)
Lune	Contraire histoire impactisme Bombardement tardif (LHB) Évolution thermique	Q1.1 Q1.2 Q1.4 Q2.1	Retour d'échantillons	NF (South Pole Aitken)		Chine Change 5/6 (face visible)	
	Composition et structure interne (noyau, manteau, croûte)	Q1.1 Q1.2 Q2.1	Réseau sismique		Farside (M4)	Japon Selene-2	
	Polar regions Volatils	Q1.4 Q1.5	Analyse in situ et/ou Retour			LPSR, Lunar Resources (russes)	
	Etude de la face cachée Terrains anciens, Bassins d'impacts	Q1.4 Q2.1 Astro	Landers		Farside (M4)		
	Mercure	Structure interne	Q1.2 Q2.1	Landers			
Mars	Habitabilité de Mars	Q1.2 Q3.1	Analyse in situ.	MARS2020 (Flagship-1)		ExoMars	(5)
	Traces de vie	Q3.2 Q3.3	Préparation retour				(6)
	Histoire climatique Caractérisation atmosphère	Q2.3 Q3.2	Orbiteur Station sol?				(7)
	Composition et structure interne (noyau, manteau, croûte)	Q1.2 Q2.1	Réseau sismique			INSPIRE	(8)
Vénus	Sondage atmosphérique profond Evolution climatique Dynamique atmosphérique	Q2.3	Orbiteur & Ballon, sonde		EVE (M4)		(9)
	Evolution surface Couplage avec atmosphère	Q2.3 Q3.2	Radar orbital ou Lander	NF	EnVision (M4)		(10)
	EUROPE / ENCELADE Structure interne Habitabilité aujourd'hui	Q1.3 Q3.1 Q3.3	Orbiteur	Europa Clipper (Flagship-2)			(11)
Satellites	TITAN Cycle atmosphérique, aérosols Couplage avec surface	Q1.3 Q2.3 Q3.1 Q3.3	Ballon (Lander)		Titan Aerial Explorer (M4)		(12)
	PHOBOS Exploration surface, intérieur	Q1.1 Q1.4 Q3.2	Analyse in situ Retour d'échantillons			PHOOTPRINT	(13)
Planètes Géantes & Glacées	SATURNE Composition atmosphérique Origine des géantes	Q1.3 Q2.2	Orbiteur Sonde	NF	Saturn probe (M4)		(14)
	Système de URANUS / NEPTUNE Atmosphère, B, anneaux, satellites	Q1.3 Q2.2	Orbiteur Sonde	(Flagship-3)	Uranus Expl. (M4?, L4)		(15)
Exo-planètes	Caractérisation des atmosphères Formation planétaire	Q1.2 Q1.3 Q1.4 Q2.2 Q3.3	Télescope		EChO (M4?)		(16)

Figure 3 : Axes scientifiques prioritaires de l'exploration planétaire

** A l'exception des missions Discovery

- (1) Hayabusa-2 et OSIRIS-Rex sont des retours d'échantillons de NEO en cours de réalisation
- (2) Le CNES a engagé une Phase-0 sur la mission Apophis (2029) qui offre une opportunité de science des NEO.
- (3) Rosetta en cours
- (4) MESSENGER en cours. BepiColombo en préparation
- (5) ExoMars-18 en définition. Curiosity en cours
- (6) MAVEN en cours. Mars Express en cours.
- (7) InSight en cours
- (8) Venus Express en cours
- (9) Juice sélectionné en L1
- (10) Phobos-grunt échec
- (11) Juno en route vers Jupiter; Cassini en cours