

**Texte de la 190<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 8 juillet 2000.**

## **Les planètes et leur exploration par Philippe MASSON**

### **Introduction**

Les satellites artificiels et les sondes spatiales ont été les véritables explorateurs du système solaire. Cette exploration a suivi une progression logique. La Terre fut survolée pour la première fois en 1957 par Spoutnik 1, puis vint le tour de la Lune en 1959 (Lunik 1 à 3) et celui des planètes terrestres à partir de 1962 : Vénus (Mariner 2, 1962), Mars (Mariner 4, 1965) et Mercure (Mariner 10, 1974). Les planètes externes (à l'exception de Pluton) ont été à leur tour explorées par les sondes américaines Pioneer 10 (1973) et 11 (1973), premiers engins à franchir la ceinture des astéroïdes, et Voyager 1 et 2 (1977).

Les premiers, et pendant longtemps les seuls, acteurs de cette exploration furent les Soviétiques et les Américains, auxquels se joignirent de plus en plus fréquemment quelques équipes internationales, notamment européennes. Ce n'est qu'en 1985 que les européens et les japonais se lancèrent à leur tour dans l'aventure spatiale avec les sondes Giotto (ESA) et Sakigake et Suisei (ISAS) qui survolèrent la comète de Halley.

L'exploration planétaire a suivi une démarche logique : survol à distance (phase de reconnaissance), mise en orbite (phase d'observation), atterrissage, retour d'échantillons vers la Terre et vols habités (phase d'exploration *in situ*). C'est la stratégie qui a été suivie pour l'exploration lunaire et qui s'est concrétisée par les premiers pas de l'Homme sur la Lune, le 21 juillet 1969. C'est sans doute cette stratégie qui sera suivie pour l'exploration de la planète Mars.

### **L'exploration lunaire**

Du fait de sa proximité de la Terre (384 400 km), la Lune a été l'un des premiers objectifs des Soviétiques et des Américains dès le début de l'exploration spatiale. De 1959 à 1976, les Soviétiques ont lancé 29 missions vers la Lune, réalisant une série de « premières », notamment la découverte du vent solaire (Lunik 1, 1959), le premier survol de la face cachée (Luna 3, 1959), le premier atterrissage en douceur (Luna 9, 1966), la dépose un véhicule télécommandé (Lunakhod 1, 1970) qui va explorer une dizaine de kilomètres de la surface pendant plus de 10 mois, et trois retours d'échantillons sur la Terre (Luna 16, 1970; Luna 20, 1972; Luna 24, 1976).

De leur côté, les Américains avec 22 missions, dont les 6 missions Apollo et plus récemment les missions Clementine (1993) et Lunar Prospector (1998), ne furent pas en reste. Après une série d'échecs, ils menèrent à bien le programme Apollo qui se traduisit par 6 vols habités de 1969 à 1972 et le retour sur Terre d'environ 380 kg d'échantillons.

L'analyse de ces échantillons a montré que la Lune est contemporaine de la Terre (4,555 milliards d'années). À l'origine, elle a eu un champ magnétique dont ne restent aujourd'hui que des traces fossiles. Après sa formation, la Lune a subi un bombardement météoritique catastrophique dont l'intensité a fortement décliné il y a environ 3,8 milliards d'années, époque à partir de laquelle d'importantes coulées volcaniques (basaltes) se sont répandues à sa surface pendant environ 600 millions d'années, donnant naissance aux Mers lunaires. Globalement, 40 % de la masse sont constitués d'oxygène, 20 % de silicium, 8 % de calcium, 7 % d'aluminium, 5 % de magnésium et 4 % de titane. Son sol contient aussi une importante quantité d'hélium 3 (13 mg par tonne) produit par les éruptions solaires.

Par contre, l'origine de la Lune demeure encore une énigme. Aujourd'hui, l'hypothèse la plus couramment admise est celle de l'accrétion de débris résultant de la collision de la

proto-Terre par un corps de la taille de Mars. Résoudre cette énigme est d'autant plus important qu'il a été démontré que la Lune joue un rôle stabilisateur sur l'axe de rotation terrestre, qui autrement s'orienterait de manière désordonnée, ce qui ne serait pas sans conséquences sur le climat et par conséquent sur la vie sur notre planète.

Le grand nombre de questions sans réponses justifie la poursuite de l'exploration de notre satellite. On peut les classer en trois grandes catégories :

1) Les sciences de la Lune : depuis trois milliards d'années, la Lune est restée un corps sans activité interne; elle permet donc d'étudier les principales étapes de l'évolution des planètes telluriques (différentiation, évolution chimique et cratérisation).

2) Les sciences à partir de la Lune : en raison de la stabilité de son sol, de l'absence d'atmosphère et de son faible champ de gravité, la Lune pourrait être utilisée pour l'observation astronomique, en particulier pour l'interférométrie, malgré certains inconvénients (bombardement permanent par des micrométéorites, importantes variations de températures).

3) Les sciences sur la Lune : en raison de sa proximité de la Terre, la Lune pourrait servir de base d'expérimentation pour les futures missions habitées vers la planète Mars.

Dans le courant de cette décennie, plusieurs missions spatiales vont poursuivre l'étude de notre satellite naturel : Smart-1 (ESA, 2002), Lunar-A (ISAS, 2003) et Selene (ISAS-NASDA, 2005). Elles ne prétendent pas atteindre les objectifs ambitieux des sciences à partir de et sur la Lune, mais elles apporteront leur contribution à une meilleure connaissance de sa composition et de sa structure interne.

## **L'exploration des planètes terrestres**

Il serait fastidieux de passer ici en revue toutes les missions spatiales qui furent consacrées aux planètes terrestres. Les Soviétiques ont en effet consacré 18 missions à la planète Vénus de 1961 à 1984, réussissant à 8 reprises la performance de faire atterrir et fonctionner des sondes automatiques à la surface de cette planète malgré son environnement particulièrement hostile. Les Américains ont pour leur part envoyé 5 sondes pour explorer Vénus entre 1962 et 1990, la dernière d'entre elles (Magellan) réalisant la couverture radar quasi complète de la surface. De 1962 à nos jours, 24 sondes (11 sondes soviétiques, 13 sondes américaines) entreprirent l'exploration de Mars avec des succès divers et quelques réussites spectaculaires, comme les atterrissages des deux sondes Viking Landers (1976) et celui de la sonde Mars Pathfinder (1997) avec à son bord le robot Sojourner. Ce sont incontestablement les observations de la mission Viking, complétées de nos jours par celle de la mission Mars Global Surveyor, qui permettent d'avoir une vision générale de l'histoire de cette planète. Mercure est le parent pauvre de l'exploration planétaire. Une seule mission américaine (Mariner 10, 1974) lui a été consacrée, incomplètement de surcroît. De ce fait, cette planète est la plus mal connue des quatre planètes du système solaire interne. Afin de combler cette lacune, la NASA et l'ESA ont décidé d'entreprendre les missions Messenger en 2004 (NASA) et Bepi-Colombo en 2009 (ESA).

Vénus, que l'on a coutume de considérer comme la planète « sœur » de la Terre en raison de sa taille, possède une atmosphère très dense et nuageuse (pression au sol = 90 fois la pression atmosphérique terrestre; température au sol = environ 450° C; composition de la basse atmosphère = 95 % de CO<sub>2</sub>) qui cache complètement et en permanence la surface. Il a fallu attendre les images radar des missions soviétiques Venera 15 et 16 (1983) et de la mission américaine Magellan (1990) pour découvrir que plus de 75 % de la surface sont recouverts par des plaines volcaniques relativement jeunes, faiblement cratérisées, parsemées de très nombreux édifices volcaniques et sillonnées par des failles de grandes dimensions. Le reste de la surface est occupé par deux hauts plateaux qui ont des tailles comparables à celles de continents terrestres, tels que l'Afrique et l'Australie. Ces hauts plateaux semblent être la

conséquence d'importants mouvements tectoniques. Après sa formation, il y a 4,5 milliards d'années environ, cette planète a probablement subi un important bombardement météoritique. Mais les traces de ce bombardement ne sont plus visibles de nos jours, car les phénomènes géologiques, tels que le volcanisme, les ont fait disparaître et ont "rajeuni" la surface vénusienne. Contrairement à la Terre, sur Vénus l'activité géologique (volcanisme et tectonique) semble avoir cessé environ 600 millions d'années avant nos jours, et depuis cette époque la surface vénusienne n'a pas subi de profondes modifications. Connaître les causes (composition, structure interne) de ces différences d'évolution serait très instructif, notamment pour comprendre certains aspects de l'histoire de notre propre planète. Pour cela, il faudrait pouvoir rapporter sur Terre des échantillons de roches afin de les analyser et de les dater, et réaliser des mesures géophysiques *in situ*. De telles opérations seraient envisageables, mais difficiles à réaliser du fait de l'environnement vénusien. C'est pourquoi aucune nouvelle mission spatiale destinée à la planète Vénus n'est envisagée dans un avenir proche, les agences spatiales américaine (NASA), européennes (ESA, CNES, etc.) et japonaise (ISAS) consacrant une grande partie de leurs efforts et leurs moyens à la planète Mars.

Mars est deux fois plus petite que la Terre et possède une très faible atmosphère de CO<sub>2</sub> (pression = 6,1 mbar). Sa surface est caractérisée par une dissymétrie morphologique entre l'hémisphère sud constitué par des terrains anciens caractérisés par la présence de nombreux cratères de météorites, et l'hémisphère nord qui est occupé par des plaines relativement lisses, peu cratérisées et donc plus jeunes. Ces dernières se situent en contre-bas des terrains les plus anciens de l'hémisphère sud. Par ailleurs, la surface martienne présente certaines ressemblances avec notre planète : volcans, canyons, réseaux fluviaux, champs de dunes, glissements de terrain, etc. Mais ces reliefs ont en général des dimensions gigantesques. Ainsi, le volcan Olympus Mons culmine à 27 km d'altitude et a un diamètre de 600 km à la base. De même, le canyon équatorial Valles Marineris s'étend sur 5 000 km de longueur et est constitué par plusieurs vallées qui peuvent atteindre 6 km de profondeur et 150 km de largeur et dont les versants sont profondément entaillés par l'érosion. De quelle érosion s'agit-il ? La gravité est sans doute responsable des glissements de terrain que l'on observe sur les pentes des canyons, mais l'eau à l'état liquide a probablement joué un rôle majeur dans l'érosion de la surface martienne. En effet, on y observe d'importants réseaux fluviaux qui présentent de grandes similitudes avec les fleuves terrestres (réseaux hiérarchisés avec de nombreux affluents et confluents, méandres et îlots, etc.). Ces réseaux, qui sont aujourd'hui asséchés, sont situés dans l'hémisphère sud et se sont écoulés vers l'hémisphère nord où ils se seraient déversés dans un « océan » peu profond (600 m environ). Mais l'eau a complètement disparu de la surface de Mars, peut-être en raison de changements climatiques importants et de la raréfaction de son atmosphère : la faible pression atmosphérique contemporaine (6,1 mbar) ne permettrait pas à l'eau d'exister à l'état liquide. Mais l'eau n'a peut-être pas complètement disparu de la planète Mars. Certains indices morphologiques, semblables à ceux que l'on observe dans les régions périglaciaires terrestres, laissent à penser qu'il pourrait encore en subsister dans le sous-sol martien sous forme de glace ou de sol gelé en permanence, le « pergélisol ». La question de l'eau sur Mars représente une des grandes énigmes de cette planète, non seulement pour comprendre son évolution, mais aussi parce qu'elle aurait pu permettre l'existence d'une forme de « vie ». L'exploration future de cette planète aura entre autres objectifs de déterminer s'il existe encore de l'eau dans le sous-sol, les causes de sa disparition de la surface et à quand remonte cette disparition. Les toutes dernières découvertes de la sonde Mars Global Surveyor conduisent à penser que cette disparition aurait pu se produire assez récemment (un ou quelques millions d'années avant nos jours), remettant ainsi en cause l'histoire climatique de la planète.

Au cours de cette décennie, plusieurs sondes spatiales tenteront de répondre aux nombreuses questions que se posent les scientifiques au sujet de Mars. La NASA lancera en 2001 une sonde orbitale (Mars Odyssey 2001) pour cartographier en détail la surface, et en 2003 deux robots mobiles destinés à explorer la surface et à en analyser la composition. Ces missions seront le prélude à des projets plus ambitieux ayant pour objectif de ramener sur Terre des échantillons de la planète rouge pour en analyser la composition, en mesurer les âges et rechercher les traces d'une éventuelle activité organique. De son côté, l'ESA lancera en 2003 la sonde orbitale Mars Express qui aura non seulement pour objectif de cartographier la surface mais aussi de détecter la présence du « pergélisol », et qui déposera une station de mesures géophysiques à la surface (Beagle 2). La sonde japonaise Nozomi se placera en orbite martienne en 2003 pour étudier l'atmosphère de la planète. D'autres projets verront également le jour, tels que la mission franco-européenne Netlander qui consistera à mettre en place un réseau de stations géophysiques à la surface de Mars pour en étudier en particulier la structure interne.

### **L'exploration des planètes externes**

L'exploration des planètes du système solaire externe (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton) est une entreprise de longue haleine en raison des distances que les sondes spatiales doivent parcourir. Par exemple, la mission Cassini-Huygens (NASA-ESA), lancée de Cape Canaveral en 1997 en direction de Saturne, n'atteindra cette planète qu'en 2004 après avoir parcouru 3,5 milliards de kilomètres ! En effet, les trajectoires des sondes spatiales lancées en direction des planètes externes doivent prendre en compte les lois de la mécanique céleste, et par conséquent des positions relatives de la Terre et des planètes visées afin de minimiser la durée de la phase de croisière. Mais cela ne suffit pas, et il faut accélérer les sondes en les faisant passer à une ou plusieurs reprises à proximité de planètes (flyby) comme la Terre ou Vénus pour bénéficier de leur assistance gravitationnelle. Ces trajectoires allongent bien évidemment les distances parcourues, mais elles raccourcissent très significativement la durée de la croisière. Par exemple, la mission Galileo (NASA), lancée en octobre 1989 pour atteindre Jupiter en décembre 1995, effectua un survol de Vénus en février 1990 (accélération = 2 km/sec) et deux survols de la Terre en décembre 1990 (accélération = 5,2 km/sec) et en décembre 1992 (accélération = 3,7 km/sec).

Jusqu'au lancement de la mission Cassini-Huygens (NASA-ESA) en 1997, l'exploration des planètes externes n'avait été réalisée que par des missions américaines [Pioneer 10 et 11 (lancées en 1973), Voyager 1 et 2 (lancées en 1977) et Galileo (lancée en 1989)] auxquelles participaient des chercheurs ou des équipes scientifiques européens. Les sondes Pioneer 10 et 11 avaient pour mission d'étudier le milieu interplanétaire et l'environnement (en particulier la magnétosphère) des planètes Jupiter et Saturne, avant de se diriger vers les confins du système solaire. Ce programme représentait la phase de reconnaissance précédant l'exploration plus systématique de ces planètes par les sondes Voyager 1 et 2, et ultérieurement par les sondes Galileo (Jupiter) et Cassini-Huygens (Saturne-Titan). Initialement prévue pour l'étude des planètes Jupiter et Saturne et de leurs satellites qui furent survolés respectivement en 1979 et en 1980 - 1981, la mission Voyager fut prolongée de 8 ans pour permettre à la sonde Voyager 2 d'aller survoler les planètes Uranus (1986) et Neptune (1989). Cette mission est une bonne illustration de l'utilisation de l'assistance gravitationnelle pour infléchir la trajectoire d'une sonde spatiale et pour l'accélérer. C'est ainsi que la durée du vol de Voyager 2 vers Neptune fut réduite de 30 à 12 ans.

Contrairement aux missions Pioneer et Voyager qui ne firent que survoler rapidement les planètes Jupiter et Saturne, les missions Galileo et Cassini-Huygens sont chacune dédiées à l'une de ces deux planètes géantes. Galileo se plaça en orbite autour de Jupiter en 1995 et

envoya une petite sonde dans sa haute atmosphère pour en étudier la composition et la dynamique. La petite sonde fonctionna pendant 59 minutes (soit une descente de 200 km) avant d'être détruite. Le reste de la mission, qui se termine actuellement, fût consacrée à l'étude de la planète et de ses quatre gros satellites galiléens, Io, Europe, Callisto et Ganymède. La sonde américaine Cassini ne se placera en orbite autour de Saturne qu'en 2004. Elle emporte à son bord la petite sonde européenne, Huygens, qui descendra dans l'atmosphère de Titan, le plus gros des satellites de Saturne et de tout le système solaire. Grâce aux mesures effectuées tout au long de la descente de Huygens vers la surface de Titan, les scientifiques espèrent percer les mystères de son atmosphère, siège de processus photochimiques qui pourraient ressembler à ceux qui précédèrent l'apparition de la vie sur la Terre.

Les missions Pioneer, Voyager et Galileo ont révélé ou découvert les caractéristiques surprenantes des atmosphères, des magnétosphères, des anneaux et des nombreux satellites des planètes géantes. Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune sont des planètes gazeuses constituées essentiellement par de l'hydrogène et de l'hélium, avec de faibles quantités de méthane, d'ammoniac et de vapeur d'eau, et un noyau rocheux et de glace. L'atmosphère de ces planètes est très turbulente, animée par une circulation très rapide qui a pour conséquence des cyclones géants tels que la grande tache rouge de Jupiter, bien connue des astronomes, ou la grande tache bleue de Neptune, découverte par Voyager 2. La mission Galileo a découvert que Jupiter connaissait une impressionnante activité orageuse due à la circulation verticale de l'eau dans les couches nuageuses supérieures de l'atmosphère.

Ces planètes géantes possèdent toutes des anneaux. Ceux de Saturne étaient connus depuis longtemps, mais les sondes spatiales permirent non seulement d'en étudier la structure « de près », mais aussi de découvrir ou de confirmer l'existence des anneaux de Jupiter, Uranus et Neptune dont certains sont invisibles ou difficilement observables depuis la Terre. Ainsi, Jupiter possède un anneau très fin qui s'étend jusqu'à 129 000 kilomètres du centre la planète. Cet anneau serait constitué par des grains très fins provenant de la surface des satellites les plus proches sous l'effet des impacts de météorites. Les anneaux de Saturne qui s'étendent sur environ 300 000 kilomètres, ont probablement la même origine, mais les éléments qui les constituent sont plus grossiers. Les anneaux les plus externes sont déformés par les effets gravitationnels induits par de petits satellites situés à proximité. Cette particularité fût également observée au niveau des anneaux d'Uranus.

Chacune de ces planètes possède un très fort champ magnétique. Par exemple, celui de Jupiter serait deux mille fois supérieur à celui de la Terre, mais la densité du vent solaire étant vingt cinq fois plus faible en raison de la distance séparant la planète géante du Soleil, la magnétosphère jovienne est cent fois plus étendue que la magnétosphère terrestre. Une autre différence importante entre ces deux magnétosphères est la présence d'une source « locale » de particules chargées qui proviennent du satellite Io et de son tore de plasma. L'activité volcanique de ce satellite éjecte dans son atmosphère une grande quantité de gaz et de poussières qui sont ionisés par le rayonnement ultraviolet du Soleil, puis se répartissent en un énorme tore de plasma entourant tout Jupiter au niveau de l'orbite de Io. Le champ magnétique de Saturne est celui d'un dipôle dont le moment est 550 fois plus grand que celui du dipôle terrestre, mais 10 fois plus petit que celui du dipôle jovien. Comme dans le cas de Jupiter, le champ dipolaire de Saturne est déformé par l'action du vent solaire, comprimé dans la direction du Soleil et s'étendant en une longue queue dans la direction opposée. Uranus, dont l'axe de rotation a basculé sans doute sous l'effet d'une collision avec une autre planète, possède aussi un champ magnétique comparable en intensité à celui de la Terre. Mais l'axe du champ est incliné d'environ 60° par rapport à l'axe de rotation de la planète, et la queue de la magnétosphère est fortement déformée par sa rotation. À l'instar de celui d'Uranus, l'axe du champ magnétique de Neptune est fortement incliné (47°) et décalé par rapport au centre de la planète.

Depuis longtemps, les observations terrestres avaient permis de découvrir que les planètes géantes possédaient des satellites. Pour ne citer que quelques exemples, en 1610, Galilée avait observé les quatre gros satellites de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto); en 1655, Christiaan Huygen avait découvert Titan, le plus gros satellite de Saturne et du système solaire; en 1787, William Herschel observait les deux plus gros satellites d'Uranus (Titania et Obéron), suivi en 1851 par William Lassell (Ariel et Umbriel) et par Gerard Kuiper en 1948 (Miranda). Aujourd'hui, grâce aux observations récentes et surtout aux découvertes de la mission Voyager, la liste des satellites des planètes géantes s'est considérablement allongée. À ce jour, Jupiter possède 28 satellites (dont 12 découverts par Voyager 2), Saturne 18 (plus 12 découverts par Voyager 2 mais non confirmés), Uranus 21 (dont 9 découverts par Voyager 2) et Neptune 8 (dont 6 découverts par Voyager 2). Les satellites découverts sont de petites tailles (entre 13 et 77 kilomètres de rayon pour les satellites d'Uranus) ce qui explique qu'ils n'aient pu être observés depuis la Terre. Certains d'entre eux, comme Amalthée (satellite de Jupiter), auraient une composition semblable à celle d'astéroïdes. Mais pour la plupart, les satellites des planètes géantes sont constitués de glace avec probablement un noyau rocheux, avec cependant une exception, Io. Ce satellite semble être constitué de roches silicatées, et sa surface est recouverte de coulées volcaniques riches en soufre produites par des éruptions. L'observation de plusieurs éruptions volcaniques atteignant 250 à 300 kilomètres d'altitude a été l'une des découvertes les plus spectaculaires de la mission Voyager. La mission Galileo a confirmé que Io était sans doute l'un des corps les plus géologiquement actifs dans le système solaire. Cette activité aurait son origine dans les déformations de ce satellite (par effets de marées) provoquées par les interactions de Io, Europe, Ganymède et Jupiter. Les satellites de glace ont aussi réservés beaucoup de surprises. Certains, comme Callisto, présentent des surfaces « vieilles » criblées de cratères d'impacts de météorites, d'autres au contraire, comme Europe ou Ganymède, montrent une surface relativement « jeune » sillonnée de craquelures isolant des morceaux de « banquise » qui se seraient déplacés les uns par rapport aux autres, peut-être à la surface d'un océan d'eau salée. Cette dernière hypothèse incite la NASA à étudier la possibilité d'une mission spécialement dédiée à l'étude du satellite Europe (mission Europa Ocean Explorer) et plus particulièrement à celle de sa structure interne. Cette mission pourrait être lancée en 2004 pour atteindre le système jovien en 2007.

Que deviennent les sondes Pioneer et Voyager ? Après avoir atteint leurs objectifs, ces sondes se dirigent vers la « sortie » du système solaire, c'est-à-dire la limite de l'héliopause au delà de laquelle les effets du champ magnétique et du vent solaire ne sont plus perceptibles. La sonde Pioneer 10 a franchi cette limite le 31 avril 1997, et se dirige vers la Constellation du Taureau tout en continuant à transmettre des informations. Par contre, la sonde Pioneer 11 a cessé de fonctionner le 30 septembre 1995, mais continue à se diriger vers la Constellation de l'Aigle. Les deux sondes Voyager ne sont pas encore sorties du système solaire; elles ne sont encore qu'à 12 milliards de kilomètres (Voyager 1) et 9,3 milliards de kilomètres (Voyager 2) de la Terre dont elles s'éloignent à 43 km/seconde tout en continuant à transmettre de nombreuses informations sur le milieu interplanétaire. Les ingénieurs de la NASA estiment que ces deux sondes devraient continuer à fonctionner au moins jusqu'en 2020.

Pluton est la seule planète externe qui n'ait pas encore été visitée, en raison de son éloignement et de sa position orbitale lors de la mission Voyager. C'est pourquoi la NASA étudie un projet (Pluto - Kuiper Express) destiné à combler cette lacune. Cette mission pourrait être lancée en 2004 pour atteindre Pluton en 2012 ou 2016. Sur le plan financier, ce projet est en compétition avec le projet Europa Ocean Explorer et un projet de sonde solaire; la NASA devra donc faire un choix. Quel que soit ce choix, l'année 2004 devrait être une année faste pour l'exploration du système solaire avec l'arrivée à Saturne de la mission Cassini-Huygens (NASA-ESA).

## **Conclusion**

En résumé, au cours de la nouvelle décennie, l'exploration des planètes sera riche en événements dans lesquels l'Europe, et en particulier la France, prendra une part active : 1) l'exploration lunaire par la sonde européenne SMART-1 (2002) et les sondes japonaises Lunar-A (2003) et Selene (2005); 2) l'exploration de la planète Mars par les sondes américaines Mars Odyssey 2001 et Mars Surveyor 2003, la sonde européenne Mars Express (2003) et la sonde japonaise Nozomi (2003); 3) l'exploration de Mercure par la sonde américaine Messenger (2004) et la sonde européenne Bepi-Colombo (2009); 4) l'exploration de Saturne et de son satellite Titan par la sonde américano-européenne Cassini-Huygens (2004). Nul doute que toutes ces missions apporteront leur lot de découvertes spectaculaires qui permettront à la communauté scientifique internationale de progresser dans la connaissance de notre système solaire.