



Le périple de Galileo dans le système jovien

PHILIPPE JAMET

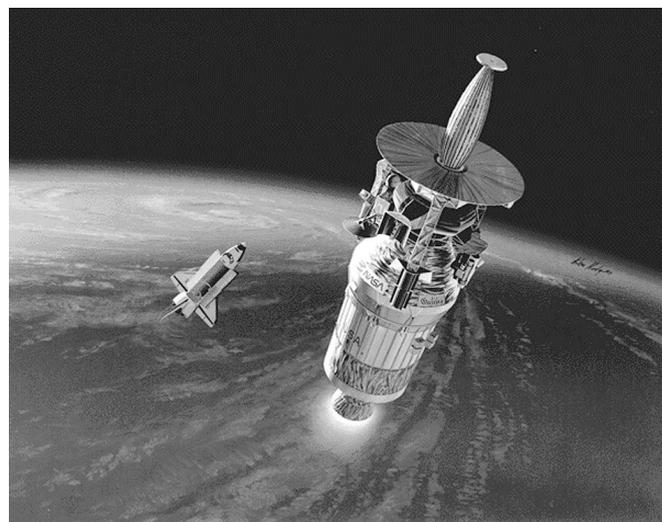
La sonde américaine jupitérienne Galileo, à forte participation allemande, marque une étape essentielle de l'histoire des connaissances planétaires. Rarement techniques sophistiquées ont donné des résultats aussi fabuleux. On peut regretter que, contrairement aux Etats-Unis, elle fasse l'objet depuis son lancement d'un glacial et immense silence médiatique en France. En effet, exceptés le regretté Albert Ducrocq (dans ce qui était sa rubrique hebdomadaire pour Air et Cosmos) et Ciel et Espace (qui a publié, depuis 1989, un certain nombre d'articles sur le sujet et entretient régulièrement ses lecteurs sur Galileo dans sa rubrique « actualités »), la presse française est restée quasi muette. En écrivant cet article, nous espérons contribuer modestement à réparer une injustice, en soulignant tout ce que nous a apporté cette mission qui va prendre fin en septembre 2003 par la plongée de la sonde dans l'atmosphère de Jupiter.

La gestation du programme Galileo a été laborieuse et les débuts de la mise sur les rails de la mission remontent en fait à 1973, à une époque où les sondes Voyager 1 et 2 n'avaient pas encore été lancées pour un périple qui allait, entre autre, les amener à survoler Jupiter en mars et juillet 1979. La mission Galileo a dû faire face à de nombreux aléas ; il fut même question de la lancer en 1982, en bénéficiant de l'assistance gravitationnelle de Mars, puis en 1986. Finalement, le lancement effectif, après modification des techniques destinées à amener la sonde sur une orbite jovienne, fut assuré à partir de la navette spatiale Atlantis le 18 octobre 1989. Ces aléas et ces modifications ont surtout concerné l'étage supérieur, chargé d'assurer la mise en orbite de transfert du vaisseau vers Jupiter. Pas moins de six configurations ont été examinées par les experts de la NASA ! Parmi celles-ci, le fameux moteur cryotechnique Centaur, dont la conception doit beaucoup à Krafft Ehrlicke, aurait offert les meilleures possibilités pour envoyer une sonde aussi lourde et complexe en direction de la planète géante du système solaire. La solution du Centaur comme étage supérieur aurait permis d'accélérer directement le vaisseau spatial jusqu'à son orbite jovienne sans passer par les détours qui ont caractérisé la mission.

Hélas, la solution du Centaur fut écartée par la NASA pour des raisons de sécurité, du fait que ce lourd moteur cryotechnique devait être emporté dans la soute de la navette au cours d'un vol habité. Le syndrome Challenger a laissé des tra-

ces au niveau des options choisies par l'Agence spatiale américaine et la conséquence en a été qu'un bon nombre de projets ambitieux ont été condamnés à de longs délais, et Galileo ne fut pas épargné. En écartant l'étage supérieur Centaur et lui préférant l'IUS (Inertial Upper Stage), la sonde, lourde de plus de 3 t avec son orbiter et son module atmosphérique jovien, ne disposait pas d'un moteur assez puissant pour aller vers Jupiter par le biais de la trajectoire apparemment la plus logique. Alors que Jupiter est située à une distance moyenne de 800 millions de kilomètres du Soleil, la sonde, au cours de son périple vers la planète géante, a effectué un trajet de 3,8 milliards de kilomètres (soit 25 fois la distance Terre-Soleil) et est arrivée au voisinage de Jupiter dans la nuit du 7 au 8 décembre 1995, plus de six ans après son lancement en octobre 1989 à partir de la navette Atlantis.

Grâce aux forces gravitationnelles qui caractérisent les planètes, on peut faire arriver un vaisseau spatial vers les parties externes du système solaire sans faire appel à un vol direct. Le choix effectué pour transférer Galileo vers Jupiter est assez surprenant car la trajectoire a été extraordinairement complexe, en faisant appel à une technique bien connue en astronautique – la technique du levier gravitationnel. Il s'agit, pour accélérer une sonde, d'utiliser le tremplin de la réaction de gravitation d'un corps planétaire dès lors que ce corps est survolé à une distance bien précise et dans certaines conditions de vitesse et de position. Le corps planétaire



L'IUS (Inertial Upper Stage). Pour une trajectoire plus logique, il aurait fallu opter pour la solution Centaur.

peut alors communiquer un supplément d'énergie cinétique à la sonde spatiale, la dévier et surtout lui donner un supplément de vitesse. Cette technique, déjà utilisée dans le cas de la sonde Voyager 2 lors de ses survols successifs de Jupiter, Saturne et Uranus, s'est traduite pour Galileo par une succession de manœuvres correctrices. Dans un premier temps, la sonde a été dirigée vers Vénus auprès de laquelle elle est passée en février 1990 et fut accélérée à nouveau vers la Terre, à proximité de laquelle elle fut déviée à une vitesse à nouveau accrue vers l'extérieur du système solaire. Cette trajectoire a été dénommée VEEGA (Venus-Earth-Earth Gravity Assist).

Après son premier passage à proximité de la Terre, la sonde a survolé l'astéroïde Gaspra en octobre 1991, revint vers la Terre en décembre 1992 où elle fut de nouveau accélérée vers la ceinture d'astéroïdes. Elle passa alors près de l'astéroïde Ida (août 1993), avant d'atteindre Jupiter autour de laquelle elle se mit en orbite en décembre 1995 et largua une sonde atmosphérique jovienne pénétrant les couches nuageuses de la planète géante. Une des conséquences de la trajectoire imposée à la sonde par des contraintes techniques, outre l'étude de deux astéroïdes, a été une accumulation de données sur Vénus et sur la Lune lors du survol de ces deux astres. Pour ce qui concerne le survol de Gaspra, ce fut une grande première en astronautique car jamais auparavant un véhicule spatial de conception humaine n'avait survolé un astéroïde : la sonde passa à 1 600 km de l'astéroïde, éloigné de 330 millions de kilomètres de la Terre. La trajectoire de survol avait été optimisée pour dévier légèrement l'orbite de Galileo par une correction de manœuvre effectuée le 2 juillet 1991. Les instruments de la sonde confirmèrent que la dimension maximale de Gaspra dans son plus grand axe est de 12,8 km et son albédo (proportion de la lumière solaire réfléchiée par un corps) est de 0,22, ce qui dénote une forte absorption.

Quant à Vénus, Galileo joua un rôle inattendu de recueil de données complémentaire à la sonde radar Magellan, lancée également en 1989 vers la planète voisine de la Terre. La planète est caractérisée par

une atmosphère extrêmement épaisse responsable d'un effet de serre massif (entraînant une température moyenne de 450°C) et d'une pression de 94 bars, équivalente à la pression de l'eau dans les océans terrestres à une profondeur de 900 m.

La composition chimique de l'atmosphère est de 96,5 % de gaz carbonique avec des nuages composés entre autres d'acide sulfurique (sous forme de fines gouttelettes et dû à l'action du Soleil sur le gaz carbonique), de composés sulfureux (dus certainement au volcanisme intense qui régnait par le passé sur la planète) et de vapeur d'eau. Cette dernière pourrait être en partie une composante restante de l'atmosphère originelle de la planète, laquelle était sans doute très différente de ce qu'elle est aujourd'hui. On pense aussi qu'elle pourrait être issue de l'évaporation d'un océan qui aurait été présent le premier milliard d'années d'existence de la planète Vénus.

Du fait de cette trajectoire « en ciseaux », Galileo a également survolé la face cachée de la Lune ainsi que son pôle Sud et a établi, pour ces régions survolées, une cartographie des terrains en fer et en titane. C'était la première fois depuis la mission Apollo 17, en 1972, que notre satellite était survolé par une sonde terrestre. Grâce au système de caméra CCD de Galileo (plus performant que les caméras Vidicon des sondes Voyager), on a obtenu des images ambiguës du pôle survolé. Certains scientifiques, très inspirés par les théories de Von Braun, Gold et Pichler, espéraient y détecter des glaces éternelles apportées par les comètes. Les photographies prises n'ont pas directement permis de mettre en évidence la présence de glaces mais leur réinterprétation, à la lumière des données obtenues par Clementine et Lunar Prospector, prouva que, sur le plan technique, il leur manquait juste un petit quelque chose pour aboutir à des résultats positifs dans ce sens.

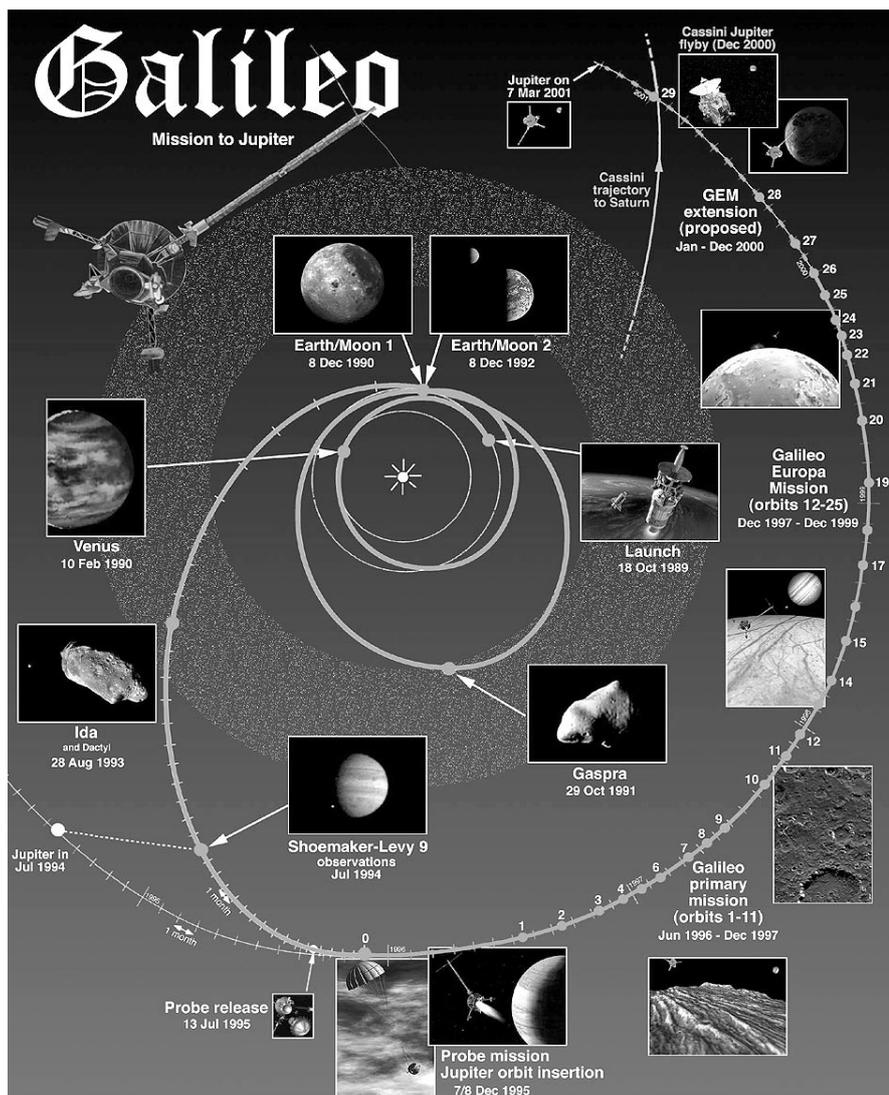
Galileo : une mission ambitieuse

La mission Galileo revient de loin. En effet, on sait que son antenne à

grand gain ne s'est pas débloquée complètement au sortir du périple vénusien et que les baleines de celle-ci ne se sont débloquentes que sur une portion de 30°. Il a donc fallu faire appel aux antennes secondaires omnidirectionnelles pour transmettre les informations à un débit réduit, et cela pendant toutes les années de la trajectoire de la mission et lors de son périple dans le système jovien. Une solution plus intéressante avait été envisagée par la NASA, à savoir transférer un satellite de type Comsat en orbite jovienne par une fusée Titan pour servir de relais à Galileo. Toutefois, cette solution ne fut pas adoptée pour des raisons financières. Du fait de cet incident survenu en 1991, les autorités compétentes n'étaient pas très optimistes sur les capacités de transmission de Galileo, mais la sonde jovienne a démenti tous les pronostics et assuré un retour scientifique exceptionnel.

Au départ, il était prévu que la mission dure deux ans (1995-1997) et ne comporte que dix trajectoires dans le système jovien, en effectuant un survol progressif des quatre satellites galiléens sans toutefois laisser de côté les autres petits satellites de Jupiter dont certains orbitent à plus de 20 millions de kilomètres de la planète, ce qui explique la durée très longue de ces trajectoires. Les trajectoires choisies ont été soit distantes soit rasantes ou excentrées, avec cependant pour conclusion l'éternel retour vers Jupiter. Devant le succès inespéré des deux premières années de la mission, les principaux responsables de la mission – W. O'Neill, E.E. Theilig, D.L. Bindschadler et N. Vandermey – ont décidé de la prolonger jusqu'en 1999 dans un premier temps, puis jusqu'en 2001 et enfin 2003, qui marquera la fin de la mission avec le « suicide » de l'orbiter dans les couches nuageuses de Jupiter. Toutes ces extensions expliquent pourquoi la mission Galileo, dans sa partie jovienne, est segmentée en plusieurs phases successives :

- La première phase de la mission entre 1995 et 1997, telle qu'elle a été définie à l'origine, avec le « ratage » délibérément voulu de Io. Alors que la sonde avait survolé le premier satellite galiléen, la NASA a décidé de concentrer les moyens disponibles sur la sonde de rentrée atmosphérique jovienne. De ce fait, lors de



Les différentes phases de la mission Galileo jusqu'en 2001. Elle a encore été prolongée et se terminera en 2003.

ce premier survol de Io, les instruments d'observation planétaire de l'orbiter furent mis en veilleuse. De nombreux scientifiques se plaindront de la décision de la NASA.

- La deuxième phase entre 1998 et 1999, baptisée GEM (Galileo Europa Mission), pendant laquelle le mystérieux satellite Europa, avec sa carapace de glace et son océan, a été observé sous toutes ses coutures.

- La mission GMM (Galileo Millennium Mission) qui s'est achevée en 2001 et qui a fait l'objet d'une présentation au Congrès IAF 2001 de Toulouse.

- La quatrième phase qui a consisté à survoler le pôle Sud de Io (16 octobre 2001) à une altitude de 181 km, survoler à nouveau Io à une altitude de 100 km (17 janvier 2002) et Amalthee du 5 novembre 2002

jusqu'à la fin janvier 2003.

L'année 2003 permettra encore quelques observations mais sera surtout consacrée à la transmission de données engrangées mais non encore envoyées vers la Terre avant que la sonde ne fasse le grand plongeon le 21 septembre 2003.

Un fait important à noter est que la sonde a bien su résister aux passages répétés à travers les ceintures de radiations de Jupiter, plus intenses que ne le laissent prévoir les résultats des missions Voyager. Galileo, en dépit de quelques défaillances de ses instruments, résista en effet à un niveau de radiations cumulé 3,5 fois supérieur à ce qui avait été toléré lors de sa conception.

La qualité des données obtenues par le véhicule spatial et les performances des instruments dans un en-

vironnement aussi difficile, est plein d'enseignements pour les concepteurs de futures missions vers Jupiter et ses lunes. De plus, la phase GMM a marqué une grande première dans la façon d'aborder les études joviennes. En effet, en décembre 2000, Galileo, opérant conjointement avec la sonde Cassini qui traversait le domaine jovien pour se diriger vers Saturne, a inauguré la première collaboration jamais effectuée entre deux missions étudiant simultanément une planète extérieure et de son environnement. L'opportunité unique d'avoir en même temps deux sondes scientifiques de haut niveau pour obtenir des informations complémentaires, a permis une nouvelle vision des interactions entre le vent solaire et la magnétosphère jovienne, de la dynamique atmosphérique de Jupiter, des anneaux et des atmosphères ténues de Ganymède et de Io lors de la trajectoire dite « Ganymède 29 ». Au total, la sonde aura effectué 34 trajectoires avant sa destruction – la dernière étant Amalthee 34 –, chaque numéro étant accolé à un nom de satellite galiléen. Cela ne signifie pas que la sonde a uniquement concentré ses investigations sur le satellite en question mais que celui-ci a été prioritaire. Un des objets les plus spectaculaires du système jovien – le satellite Io à forte activité volcanique – a été délibérément négligé lors des premiers survols mais retrouva une certaine forme de priorité à partir de 1999, puis fut l'objet d'intenses études avec les trajectoires Io 31, Io 32 et Io 33 qui nous montrèrent que le volcanisme de cet extraordinaire satellite dépassait de loin tout ce que nous connaissions en ce domaine sur Terre.

Revenons aux divers aspects de la mission conjointe Galileo-Cassini. Tandis que Galileo faisait des observations de télédétection à haute résolution durant sa rencontre « 29 » avec Ganymède, Cassini acquérait une vue globale à large échelle du système jovien et de ses interactions. Les deux sondes étudièrent l'onde de choc magnétosphérique provoquée par l'arrivée du vent solaire sur la magnétosphère jovienne ainsi que la haute vitesse des torrents de poussières et de plasma éjectés vers l'espace par Io. Suite à sa rencontre avec Io fin 1999, la mission Galileo a été reconfigurée en ce qui concerne ses orbites afin de réduire les risques dus

aux radiations des ceintures de Jupiter, de nombreuses fois traversées par la sonde, de telle sorte que celle-ci reste totalement opérationnelle lorsque Cassini allait poursuivre sa route vers Saturne. Suite à Ganymède 29, l'objectif de la mission fut un retour sur Io après une opération de gravi-assistance de Callisto vers Io, qui permit de déterminer par des observations incontestables la géométrie du champ magnétique de ce satellite. Lors de Ganymède 29, on s'est aussi aperçu que le champ magnétique de Ganymède, découvert par Galileo, interférait avec celui de Jupiter, ce qui n'est pas étonnant étant donné le volume du champ magnétique jovien. Celui-ci s'étend au-delà de 850 000 km et, comme la distance moyenne de Ganymède par rapport à Jupiter est de 1 070 000 km, la rencontre des deux champs magnétiques s'effectue quand la distance des deux astres est au plus

près. Du fait de son champ magnétique induit (c'est-à-dire généré lorsqu'un matériau conducteur est placé dans un champ magnétique) découvert lors de cette mission, on est presque certain que ce satellite possède un océan d'eau salée sous sa surface, lequel jouerait un rôle de conducteur pour le champ magnétique. Cet océan se trouverait à une profondeur de 150 à 200 km sous la surface.

La mission conjointe Cassini-Galileo devait durer une longue période de quatre mois et ses objectifs principaux étaient les suivants :

- Etude des interactions avec le vent solaire affectant la dynamique et la structure de la magnétosphère de Jupiter, en incluant les régions aurorales joviennes.

- Etude des phénomènes significatifs affectant la dynamique de l'atmosphère de Jupiter et, en particulier, ses régions actives où se

produisent des orages.

- Observation de Io tandis que celui-ci subissait un phénomène d'éclipse dû à Jupiter pour étudier les phénomènes incandescents et surveiller les activités éruptives.

- Etude de la dynamique des torrents de poussières et mesures simultanées rapprochées des particularités de ces poussières.

En addition à ces défis communs, de nombreuses opportunités ont été offertes à Galileo durant sa phase opératoire en obtenant de nombreuses mesures de télédétection en visible et en infrarouge, des mesures polarimétriques, et cela grâce aux six instruments de mesures de champs et particules (DDS, EPD, HIC, MAG, PLS et PWS). Après Ganymède 28, Galileo commença sa plus longue période de croisière qui allait l'amener à s'éloigner de la planète Jupiter jusqu'à 290 rayons (apojove de 20,7 millions de kilomètres) puis à revenir, après

La complexité du système jovien

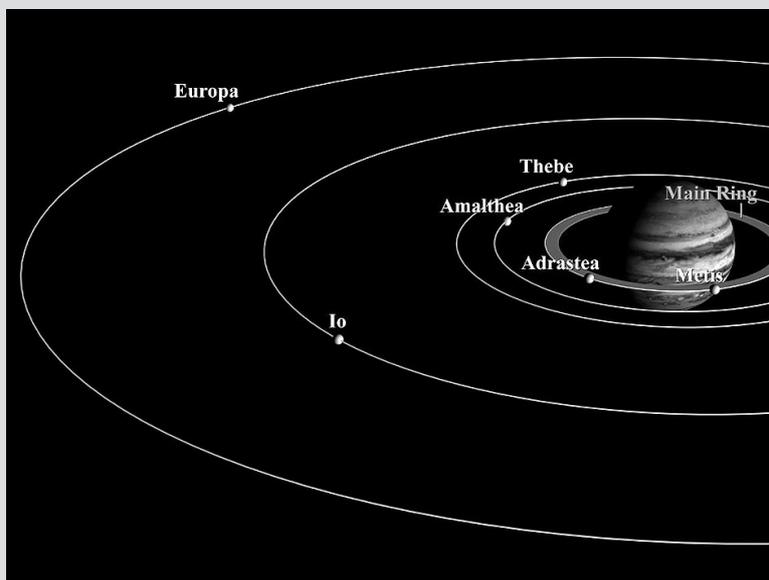
Le type de système solaire miniature que constituent Jupiter et ses satellites est sans aucun doute un monde étrange, fascinant et merveilleux. Par sa complexité, il suscite de nombreuses interrogations mais aussi apporte un certain nombre de réponses aux hypothèses relatives à la formation du système solaire. Dès les années 1973-1974, les sondes Pioneer Jupiter 1 et 2 passées respectivement à 131 000 et 26 000 km de la planète géante, ont confirmé l'hypothèse de l'astronome amateur français Walbaüm selon laquelle Jupiter serait une « étoile ratée ». En effet, les réactions thermonucléaires amorcées n'y ont pas été assez puissantes pour faire de cette géante gazeuse la mini-étoile dont sa composition primitive aurait pu la destiner. Corroborée par les deux sondes Voyager, cette hypothèse fait aujourd'hui l'unanimité chez les astrophysiciens.

Autre hypothèse confirmée par ces sondes, la présence d'un champ magnétique intense soupçonné depuis que l'on a détecté, depuis la

Terre, de puissantes émissions radio au cœur même de la planète. Les spécialistes pensent que ce champ magnétique est dû à un noyau d'hydrogène en rotation rapide et engendrant un effet dynamo. Les sondes passées à proximité de Jupiter, et bien sûr Galileo, ont révélé que ce champ magnétique était bien plus élevé que celui de la Terre et qu'il s'étendait jusqu'à plus de 800 000 km, avec des variations importantes dans le temps, faisant penser à un système de pulsations venues du cœur de la planète.

Autre fait intrigant, on a découvert dans l'atmosphère

jovienne des courants de convection d'une violence extrême auprès desquels nos cyclones et nos ouragans ne sont que de petites brises. On sait aujourd'hui qu'ils sont dus à la libération de quantités considérables d'énergie dans le cœur de la planète, en raison de phénomènes de concentration de masses. Alors que, dans les couches extérieures de l'atmosphère,



survol à basse altitude de Ganymède, vers la planète géante en décembre 2000, au moment où Cassini arrivait, en cours de route vers Saturne, en traversant le système jovien et s'approchant relativement près de Jupiter.

Les principaux défis pour Galileo opérant scientifiquement en solitaire consistaient, d'une part, à étudier la dynamique de la partie crépusculaire largement inexplorée de la magnétosphère de Jupiter et, d'autre part, analyser les caractéristiques à très haute résolution pour comprendre la relative importance de la tectonique et du volcanisme dans la formation de la surface de Ganymède. Galileo survola Ganymède le 28 décembre 2000 à une altitude de 2 337 km, à un moment où ce satellite était éclipsé par Jupiter. La séquence de rencontre fut un peu plus longue qu'habituellement car le vaisseau avait été ralenti pour se consacrer

également, en collaboration avec Cassini, à la surveillance de la queue magnétosphérique. La séquence d'observation de Ganymède commença le 26 décembre 2000 pour se poursuivre jusqu'au 5 février 2001. On mit en œuvre un planning d'observations extrêmement longues pour cette rencontre.

Les instruments de télédétection furent mis en œuvre pour observer les quatre satellites galiléens, la zone aurorale jovienne et les anneaux de la planète. Les instruments de mesure de champs et particules ont apporté des données sur la magnétosphère de Ganymède et celle de Jupiter. On effectua aussi des mesures sur le tore de plasma et de poussières de Io. Les résultats mirent particulièrement en évidence les interactions entre le champ magnétique de Jupiter et la magnétosphère de Ganymède. En collaboration avec l'instrument CDA embarqué sur Cassini, l'instru-

ment DDS de Galileo enregistra des données sur le flux de particules originaires de Io qui encercle complètement Jupiter, en ayant des interactions avec le champ magnétique de la planète géante.

Les observations de l'instrument PPR commencèrent durant la phase d'approche de Ganymède. Profitant de l'avantage offert par la période d'éclipse pour un certain nombre d'investigations, le PPR collecta des données sur la baisse de température à la surface de Ganymède ainsi que sur son réchauffement, après la fin de l'éclipse, en ce qui concerne divers types de terrains. Durant plusieurs jours, le PPR obtint une importante série d'observations atmosphériques et examina avec un haut pouvoir de résolution la grande tache rouge de Jupiter et sa ceinture équatoriale Nord. Les observations effectuées par le PPR et l'instrument CIRS de Cassini furent parfaitement

des vents glaciaux souffent à des vitesses de 100 m/s et que la température ne dépasse pas -100°C , l'énergie émise au niveau des couches les plus basses dépasse largement celle reçue des couches périphériques du Soleil – la température s'y situe au-delà des 10 000°C.

Entourée d'un anneau indiscernable depuis la Terre et débutant à environ 56 000 km au-dessus de la couche nuageuse, Jupiter est un astre d'une taille dix fois supérieure à la Terre, tandis que son diamètre est un dixième de celui du Soleil. Son atmosphère est composée à 90 % d'hydrogène moléculaire, 9 % d'hélium et le reste étant composé de traces d'ammoniac, de méthane et de vapeur d'eau. La sonde atmosphérique jovienne lancée à partir de Galileo en décembre 1995 n'a pas permis de confirmer la composition attendue des nuages de la haute atmosphère, à savoir, au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans celle-ci, une couche de cristaux d'ammoniac suivie d'une couche d'ammonium hydrosulfide et, enfin, d'une couche de cristaux de glace et d'eau. Certaines études ultérieures tendent toutefois à faire considérer ce modèle comme valable car on a découvert que l'atmosphère de Jupiter comportait des « trous » et que la sonde atmosphérique américaine était précisément passée par un de ces trous. Une autre des caractéristiques de Jupiter est de comporter des vortex atmosphériques permanents qui peuvent rester parfaitement structurés à l'identique pendant des siècles : c'est le cas de la fameuse grande tache rouge et de l'ovale blanc apparu plus récemment.

Toutefois, la caractéristique principale de Jupiter est de comporter une sorte de système solaire en réduction qui était estimé à seize satellites naturels à la fin des missions Voyager et que Galileo a porté à trente-neuf. Ces vingt-trois satellites supplémentaires ne sont en fait que de petits astéroïdes et de gros blocs de roches captés par la gravité intense de Jupiter mais pourraient être intéressants à exploiter dans une perspective d'expansion humaine dans le système solaire. Sur les seize satellites

véritablement admis par les astrophysiciens, il y a bien sûr les quatre satellites galiléens – Io, Europa, Ganymède et Callisto – dont trois sont plus gros que la Lune et dont les diamètres respectifs sont de 1 821 km (avec une orbite moyenne autour de Jupiter à 421 600 km décrite en 1,769 jour), 1 565 km (avec une orbite moyenne à 670 900 km décrite en 3,551 jours), 2 634 km (avec une orbite moyenne à 1 070 000 km décrite en 7,155 jours) et 2 403 km (avec une orbite moyenne à 1 883 000 km de Jupiter et décrite en 16,689 jours. Tous orbitent dans le plan équatorial de Jupiter.

En dessous de l'orbite de Io, il existe quatre satellites intérieurs – Metis, Adrasteé, Amalthée et Thébé. Le premier (158 km de diamètre) a été découvert en 1848 par l'astronome Graham ; Adrasteé l'a été dans le cadre du programme Voyager par David Jewitt ; Thébé a été découvert en 1980 par l'observateur Synnott. Amalthée, étudiée par Voyager 2, est connue depuis 1892 grâce à l'astronome Barnard et se présente comme un gros noyau de 131 x 73 x 67 km, avec une couleur rouge sombre. Amalthée a fait l'objet d'investigations sérieuses de la part de Galileo et elle aura été la dernière lune de Jupiter à avoir été survolée par la sonde avant son grand plongeon dans l'atmosphère jovienne en septembre 2003.

Il existe autour de Jupiter deux autres groupes de satellites :

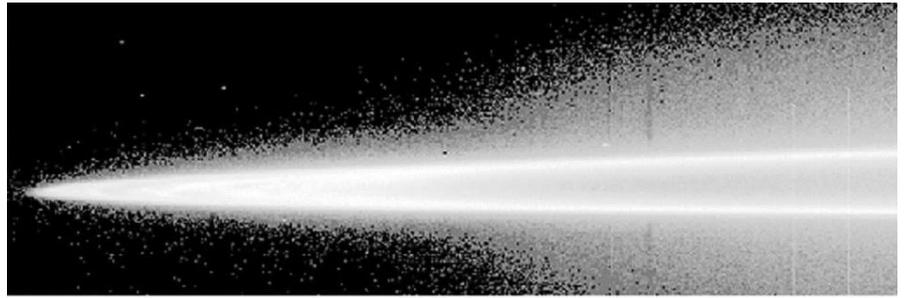
- Le premier orbite entre 11 et 12 millions de kilomètres de Jupiter sur des orbites circulaires inclinées entre 25° et 29° par rapport au plan équatorial jovien. C'est le cas de Leda (15 km de diamètre), Himalia (180 km), Lysithia (36 km) et Elara (80 km).

- Le second orbite entre 21 et 24 millions de kilomètres de Jupiter et se déplace sur des orbites à la fois rétrogrades et très inclinées par rapport au plan équatorial jovien. C'est le cas des objets Ananké, Carme, Pasiphaé et Sinope, dont la filiation avec les astéroïdes ne fait aucun doute.

complémentaires : tandis que le CIRS permettait une meilleure couverture spatiale sur une période de temps plus longue, le PPR fournissait de meilleures données sur les plus grandes longueurs d'onde, tout en améliorant la résolution spatiale. Le PPR continua ultérieurement sa campagne d'observations polarimétriques et obtint une couverture extraordinaire de Io et Europa.

Les observations de l'instrument SSI durant Ganymède 29 incluaient divers d'objectifs parmi lesquels l'observation de la surface de Ganymède et de Io, du système d'anneaux jovien et de l'atmosphère de Jupiter. Les observations sur Ganymède montrèrent sans contestation possible une aurore alors que la lune jovienne subissait une éclipse. Ceci fut suivi par des images de diverses régions à fine échelle et d'une observation des régions situées à la limite des pôles.

Pour ce qui concerne Io, les observations incluaient une imagerie couleur à échelle globale, permettant une couverture continue du volcanisme, l'observation du panache du volcan Prometheus et une série d'images du satellite tandis qu'il était éclipsé par Jupiter. Grâce à d'autres observations de Io, on a obtenu des images saisissantes de panaches volcaniques inconnus auparavant ainsi que de dépôts de poussières et de dioxyde de soufre gelé dans la région Tvashhtar, connue



Les anneaux et le halo de Jupiter.

pour être un site d'extrême activité volcanique depuis 1999.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'instrument VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer) de Cassini, la campagne d'observations de l'instrument NIMS durant Ganymède 29 incluait également une phase extensive de recueil de données atmosphériques de Jupiter et une observation des quatre satellites galiléens. Les observations de NIMS commencèrent par des investigations par régions successives de Ganymède pour déterminer et analyser la composition de sa surface et pour établir une cartographie minéralogique globale. Pour ce qui concerne les observations de Io, le programme fut concentré sur la surveillance des taches chaudes ou autres changements apparaissant à la surface en vue de préparer les missions de survol Io 31, Io 32 et Io 33.

Les trajectoires Ganymède 29,

Callisto 30, Io 31, Io 32 et Io 33 furent scientifiquement les plus fructueuses car il fut possible de comparer les données obtenues à celles déjà engrangées lors de précédentes orbites. Cette comparaison a révélé, et il s'agit d'un des principaux enseignements de la mission Galileo, que les quatre grands satellites galiléens ont tous une *activité interne* intense contrairement à ce que laissent apparaître (excepté Io) les superbes carapaces glacées d'Europa, Ganymède et Callisto.

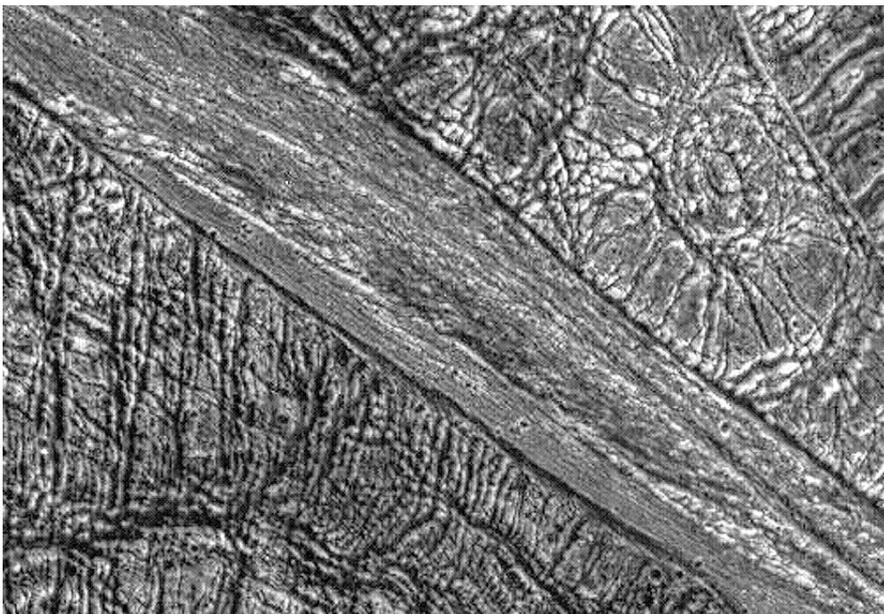
La trajectoire Callisto 30, succédant à Ganymède 29, commença par un survol de Callisto en faisant appel à sa gravité assistée pour effectuer des survols polaires et un survol équatorial de Io. Les principaux défis scientifiques de la phase Io étaient les suivants :

- Etudier les apparents écarts par rapport aux modèles sur les populations de cratères d'impact à diverses échelles sur Callisto et établir les implications du flux de cratères pour le système solaire extérieur ainsi que l'âge de la surface des satellites galiléens.

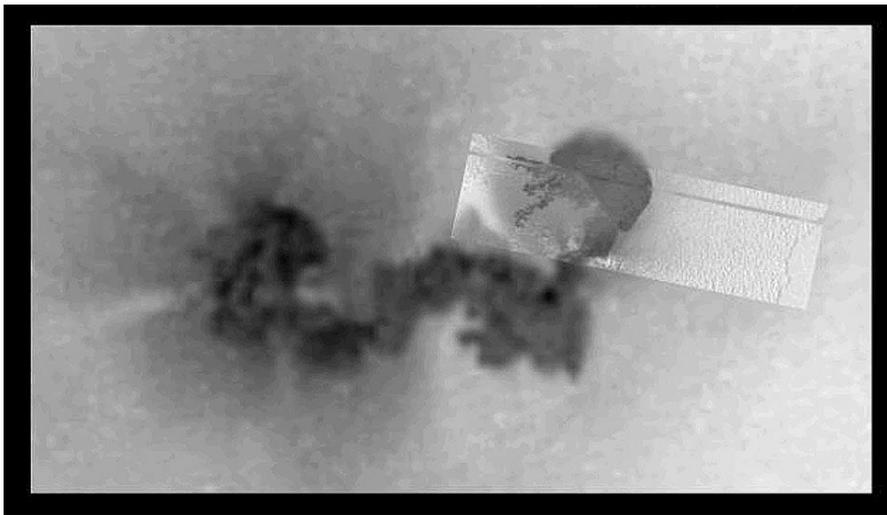
- Mieux comprendre les processus à haute température et à hauts volumes volcaniques éruptifs de Io, en essayant de voir s'il est possible de trouver des points communs, comme l'éjection d'un matériau appelé komatiite, avec certains processus volcaniques terrestres.

- Déterminer la nature du champ magnétique de Io et caractériser sa dynamique interne ainsi que sa balance énergétique. Réaliser de meilleurs mesures des flux de chaleur globaux pour aboutir à des modèles de flux énergétiques et de dégagement de chaleur pour Io et Europa.

- Caractériser les processus d'accélération du plasma dans des régions auparavant inexplorées et



La surface de Ganymède.



Observation du panache du volcan Prometheus sur Io.

déterminer la dynamique de l'enveloppe de plasma de Jupiter ainsi que son rôle dans la dynamique d'ensemble de la magnétosphère.

- Etablir les propriétés des processus de transfert de plasma comme les processus d'échange et de diffusion dans la partie extérieure du tore de plasma de Io.

La cinquième rencontre de la mission GMM et la rencontre finale de Galileo avec Callisto se produisit le 25 mai 2001. Lors de son survol, le vaisseau spatial passa à 138 km de la surface de Callisto. Le mode de ce survol était inhabituel dans la mesure où la sonde arriva par la partie ombragée de la lune jovienne. Galileo survola Callisto à la vitesse de 9,7 km/s et la séquence de rencontre commença le 22 mai 2001. La trajectoire avait été également calculée pour des objectifs autres que Callisto car la gravi-assistance de ce gros satellite jovien était la voie la plus efficace pour permettre la décroissance du périastre de l'orbite et le retour de Galileo vers Io. Pendant l'occultation de Callisto, l'expérience de radioscience obtint des données qui permirent de mesurer la distribution verticale des électrons libres dans l'ionosphère du satellite. Certaines données ont rendu possible des investigations complémentaires sur le champ magnétique induit de Callisto.

Lors de la rencontre, les observations du spectromètre NIMS étaient centrées sur Jupiter et Callisto mais incluaient aussi des observations à distance de Io et Europa. Avec Callisto comme cible, dont les inves-

tigations étaient complémentaires de celles de la « Prime Mission », on a réussi une couverture complète des régions comme le Bran Crater et le bassin Asgard. Un objectif très important de ces observations était de faire une cartographie des variations de composition de cette surface, en comparant les données obtenues avec celles de la première mission. Durant son retour vers Io, la sonde, avec l'instrument NIMS, effectua des observations à la fois quand la planète était éclairée et en période d'éclipse pour surveiller l'activité volcanique. Tout cela permit de détecter des changements dans la distribution du SO_2 et d'affiner les mesures de température à la surface de Io.

Le PPR collecta divers assortiments d'observations incluant Jupiter, Io, Ganymède et Callisto. Durant le survol de Callisto, le PPR collecta des mesures de température près du terminateur (limite entre la partie illuminée et non illuminée de la surface d'une planète ou d'une lune), dans le but d'évaluer l'inertie thermique de la surface et observa des changements de température sur des portions de la surface qui commençaient à être chauffées par le Soleil. Avec d'autres observations, on mesura les températures aux régions polaires afin de mettre en évidence la possibilité de composés volatils. Les observations de Jupiter incluaient des images à haute résolution de PPR qui permirent de faire des investigations faisant appel à des modèles de convection globale et des modèles de transfert d'énergie.

D'autre part, le PPR compléta la carte des températures enregistrées pendant le jour sur Io et obtint une carte des températures et des mesures de polarisation de Ganymède.

Si les observations ssi planifiées pour Callisto 30 étaient focalisées sur Callisto tout en incluant des images de Jupiter, Io et Ganymède, une observation d'Amalthée était prévue pour préparer le survol de cette lune en novembre 2002.

Le ssi obtint pour Callisto des images à très haute résolution montrant des détails de moins de 10 m. Galileo observa notamment le bassin d'impact Valhalla, une structure à anneaux multiples de 600 km consistant en une zone centrale lumineuse entourée par de nombreux anneaux concentriques espacés par des intervalles de 20 à 100 km. Sept autres structures de ce type ont été identifiées par Galileo sur Callisto et les spécialistes comparent souvent Valhalla à Caloris Planitia, un large bassin de 1 300 km avec des cercles concentriques et situé sur la planète Mercure. Lors de cette trajectoire, une image couleur à échelle globale de Ganymède fut obtenue avec succès.

La sixième rencontre de la mission GMM et le premier des trois survols consécutifs de Io se produisit le 6 août 2001, quand le vaisseau spatial survola la surface du satellite à 194 km. La géométrie du vol impliquait un survol polaire et, de ce fait, le vaisseau put observer la région Tvashtar. Galileo et Cassini avaient déjà observé des panaches volcaniques dans cette région en décembre 2000.

Lorsque Galileo effectua le premier survol au-dessus de la portion supérieure du panache, celui-ci était faiblement actif mais, à la fin de ce survol, une éruption très violente se produisit, caractéristique du phénomène de volcanisme permanent qui règne sur Io. La séquence de rencontre commença le 4 août 2001 et continua jusqu'au 9 août 2001, soit environ cinq jours et demi. La majorité des activités scientifiques pour cette période furent centrées sur Io, avec des observations additionnelles sur l'atmosphère de Jupiter (régions des vortex Nord et Sud, régions des pôles), Callisto et Amalthée. Une campagne intensive d'observations de Io a été effectuée lors de cette

mission, incluant des investigations nocturnes du plein disque à basse résolution et de régions sélectionnées à haute résolution.

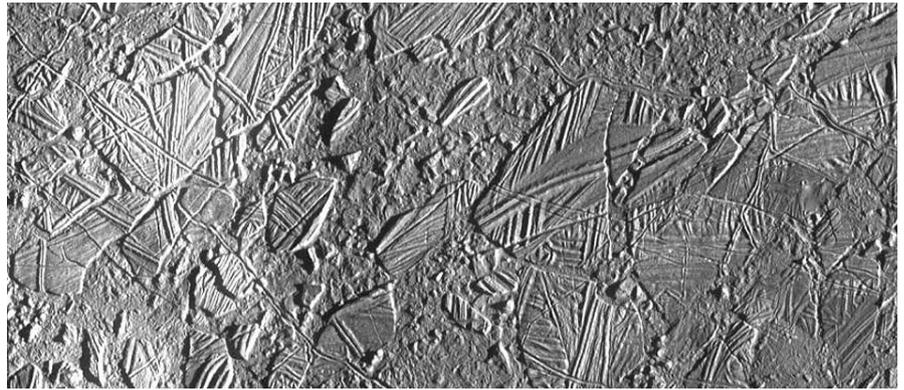
Il fut particulièrement intéressant de mesurer la température des régions polaires où des phénomènes de montée de température avaient été décelés lors de survols précédents. Le PPR collecta des données détaillées de la région du volcan Loki et de Lei-Kung Fluctus, un large fleuve de laves, et obtint la première carte globale des températures pendant le jour depuis les premières études effectuées dans le passé par Galileo sur Io.

Quant aux observations collectées par le NIMS, elles furent exclusivement centrées sur Io à l'exception d'une étude de la dynamique des nuages de régions situées à proximité de la grande tache rouge de Jupiter.

Lors de l'approche de Galileo vers Io, le NIMS récolta des mesures thermiques en infrarouge de la région située près des volcans Pelé et Pillan ainsi que de la région Isum, laquelle présenta quelques changements et une nouvelle activité volcanique par rapport au survol Io 27. En outre, une cartographie de la distribution du SO₂ aux hautes latitudes fut effectuée. Peu de temps après l'approche de Io, le NIMS effectua plusieurs observations à haute et moyenne résolution de nombreuses régions incluant Tvashtar Catena, Prometheus et le fleuve de laves Emakong, les régions Amirani-Maui et celles de taches chaudes dans l'hémisphère Sud qui avaient déjà été détectées lors du survol de Callisto 30.

L'instrument ssi, durant Io 31, commença à détecter des activités de panache de la région Tvashtar mais montra ses limites à cause de sa faible sensibilité en UV.

Quant aux observations ne concernant pas Io, le ssi effectua des relevés sur l'hémisphère de Callisto situé en dessous du plan équatorial jovien et sur la propagation des ondes méso-sphériques dans l'atmosphère jovienne. Lors de cette mission, on observa également en détails le satellite Amalthée, qui gravite près de Jupiter, en vue de préparer le survol plus rapproché de novembre 2002. Les observations de Io avec le ssi incluent une surveillance globale en couleur des changements au niveau



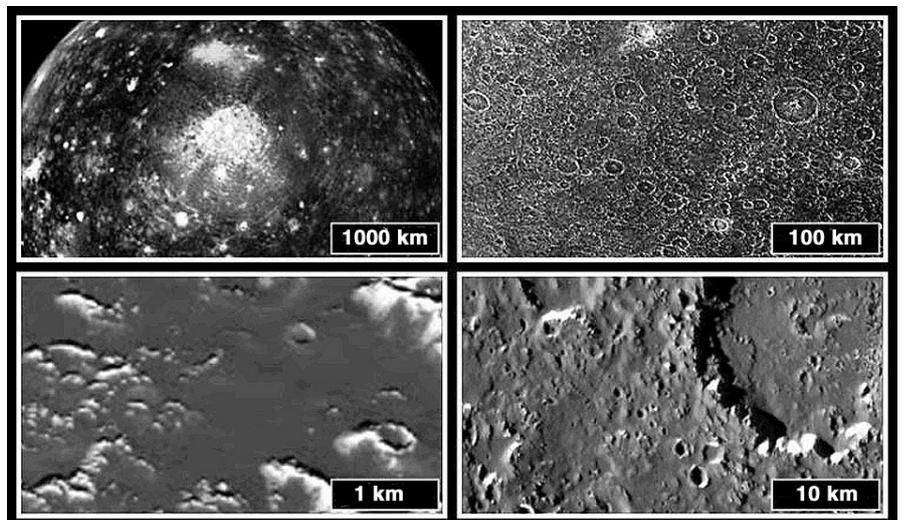
La surface d'Europa.

de la surface de Tvashtar, en images à haute résolution, et d'une variété de régions, à moyenne résolution, comme Masubi, Letizi, Kanehekili Fructus, la région Amirani-Maui, Savitr et Itzamna Patera. De plus, on étudia des régions proches de l'hémisphère Sud où ont été détectées des taches chaudes lors de précédents survols.

Lors de la trajectoire Io 32, Galileo passa au sud de Io le 16 octobre 2001 à une altitude de 181 km. Ce survol a offert une deuxième opportunité pour déterminer la signature magnétique de Io et affiner le modèle de champ magnétique avec ses implications en ce qui concerne la structure interne de la lune. Les instruments de télédétection furent principalement utilisés pour l'imagerie topographique des régions situées près du terminateur, les observations à haute résolution des régions du pôle Sud et les investigations sur

les contrées considérées à activité volcanique (Tvashtar et Pelé). Les taches chaudes de Jupiter furent aussi observées. Les instruments de champs et particules obtinrent à haute résolution des données sur le tore de Io en tant que composant de l'étude de la dynamique et de la structure de la magnétosphère intérieure de Jupiter.

Lors de la trajectoire Io 33, Galileo survola pour la dernière fois Io à latitude Nord moyenne le 17 janvier 2002 et à une altitude de 100 km, ce qui constitue un record de proximité pour la mission. Cette trajectoire et cette rencontre allaient permettre de modifier l'orbite de la sonde pour la placer sur une trajectoire balistique d'impact avec Jupiter, et cela deux orbites ultérieures plus tard. Néanmoins, cette mission allait permettre des opportunités pour la science. Les instruments de champs et de particules continuèrent leur caractérisa-



La surface de Callisto.

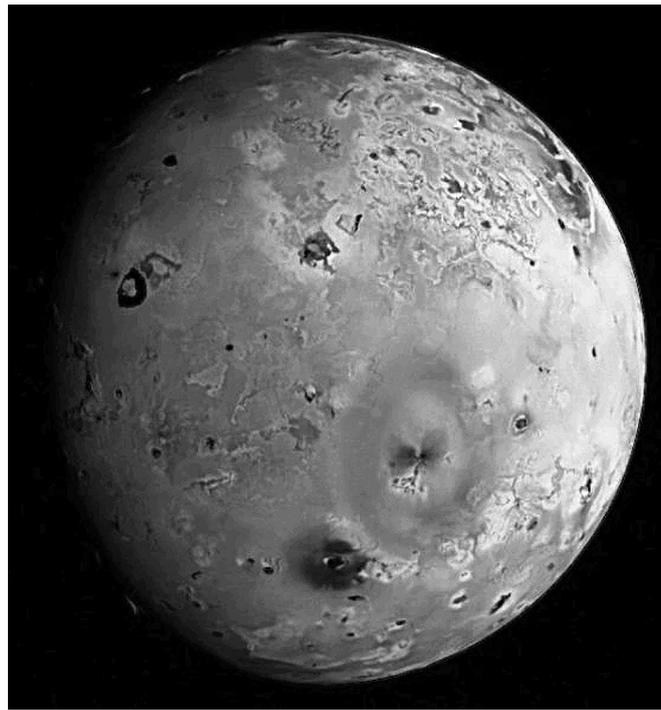
tion du tore de Io et de son champ magnétique. D'autres instruments (NIMS) permirent de mieux caractériser sa face tournée vers Jupiter.

Le 5 novembre 2002, la trajectoire Amalthée 34 concrétisa la rencontre de survol final de Galileo avec le gros rocher Amalthée, une des petites lunes intérieures, avec une mesure précise de la masse et de la densité de cette lune mineure de Jupiter. Ce passage dans le système jovien intérieur se produisit alors que Galileo était à deux rayons de la planète Jupiter, au sein du système d'anneaux qui l'entoure et dans la magnétosphère intérieure, une région analogue à la plasmasphère terrestre et de ceintures de radiations effectuant un piégeage de particules. La mission opérationnelle prendra fin en janvier 2003 avec la transmission vers la Terre des données recueillies par la mission Amalthée 34. En avril 2003, la sonde sera éloignée de 26,4 millions de kilomètres de Jupiter vers laquelle elle plongera progressivement à partir de juin 2003. L'impact avec Jupiter est prévu pour le 21 septembre 2003 et la trajectoire de la sonde a été optimisée pour éviter tout impact susceptible de contaminer Europa où pourraient exister des formes de vie primitive.

Bilan provisoire : des données scientifiques exceptionnelles

Grâce à Galileo, nos connaissances ont considérablement progressé dans un certain nombre de domaines du système jovien que nous ne prétendons pas citer de façon exhaustive. Notons la confirmation de l'existence de l'océan du satellite Europa qui, selon le planétologue américain Paul Shenk, serait enveloppé d'une carapace de glace plus épaisse que prévu (20 à 25 km), contrairement à certaines théories passées qui donnaient à la banquise de ce satellite une épaisseur inférieure à 10 km.

Sur ce sujet, il y a toujours controverse et certains scientifiques soutiennent au contraire l'hypothèse d'un remodelage permanent de la surface d'Europa, prouvé



Les plus importants des anneaux rouges sombres ont été mis en évidence dans l'environnement du centre éruptif Pelé, situé près de l'équateur de Io.

selon eux par le faible taux de caractérisation de la lune galiléenne, ce qui impliquerait que des phénomènes internes effaceraient les traces des impacts. Si cette théorie s'avérait exactes, la carapace de glace d'Europa ne devrait pas alors dépasser pas quelques kilomètres. Une autre découverte concernant Europa a été la présence d'une fine couche atmosphérique composée d'oxygène. Celle-ci pourrait être due à la sublimation de glaces lors d'impacts. Dans ce cas, l'agitation thermique des molécules d'hydrogène ferait que celles-ci s'évaderaient dans l'espace alors qu'une partie de l'oxygène dégagée resterait prisonnière de la gravité du satellite.

L'eau semble être une des composantes principales des satellites galiléens Europa, Ganymède et Callisto, et une des grandes découvertes de Galileo a été, grâce à la détection d'un champ magnétique induit, la mise en évidence de grands lacs d'eau salée à 150 km sous la carapace de glace et de boue glacée de Callisto ainsi que la détection d'un océan sous la carapace de glace et de boue gelée de Ganymède. Une des découvertes majeures de la Galileo Prime Mission (1995-1997) était que Ganymède possédait un champ magnétique propre engendré par des phénomènes internes, comme l'existence plus que probable d'un gros noyau.

Pendant les survols de Ganymède

qui se déroulèrent pendant les deux années de la Galileo Europa Mission (1998-1999), les analyses continuèrent sur les images prises sur la surface de Ganymède et les données sur les champs et les particules. Ces données suggèrent que Ganymède a eu une histoire plus similaire à celle d'Europa qu'on ne le croyait auparavant. Certaines images laissent à penser qu'il existe une forme de « volcanisme de glaces » (par remontée) ainsi que des paysages et des structures de surface ressemblant beaucoup avec celles découvertes à la surface d'Europa. Les données sur le champ magnétique indiquent que Ganymède, en plus de son champ magnétique propre, possède, comme Europa et Callisto, un champ magnétique induit. Dans le cas d'Europa, le modèle le plus plausible pour le matériel conducteur est une couche d'eau salée de plusieurs kilomètres d'épaisseur située à environ 100 km de profondeur par rapport à la surface et directement en contact avec le noyau. Ce champ magnétique induit est une des pièces les plus solides pour ce qui concerne la présence d'eau liquide en quantités considérables sous la carapace de glace d'Europa.

Quant à Ganymède, la signature d'un champ magnétique induit est perturbée par la présence d'un champ magnétique interne généré par le noyau de la planète elle-même. Les données collectées

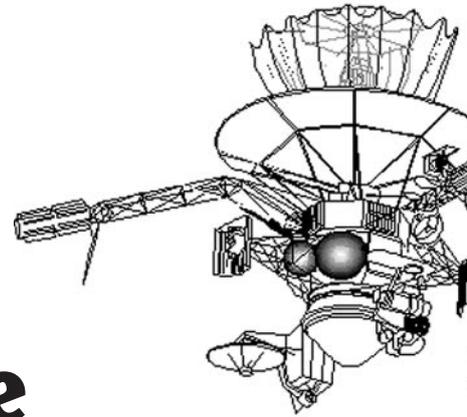
par le magnétomètre durant les survols de Ganymède 28 et 29 ont été comparées avec les données des survols précédents. Elles indiquent qu'un matériau très conducteur est présent et qu'il est compatible avec la présence d'une couche d'eau salée de quelques kilomètres d'épaisseur localisée en dessous de 200 km de la surface de Ganymède.

Une autre découverte importante de Galileo concerne Io et son volcanisme dont on avait cru, à la lumière des résultats des sondes Voyager, qu'il était majoritairement concentré près des parties équatoriales. Des images de la région Tvashtar Catena furent obtenues durant Io 25 (novembre 1999) et Io 27 (février 2000), mettant pour la première fois en évidence des phénomènes volcaniques dans cette région située près du pôle Nord. Durant la mission conjointe Galileo-Cassini de survol de Jupiter en décembre 2000, les deux vaisseaux spatiaux concentrèrent un nombre significatif d'observations sur Io. Les données révélèrent des panaches dus à des éruptions volcaniques situées dans la région Tvashtar. Des images à l'échelle globale de Io par l'instrument SSI indiquèrent la présence d'un anneau fraîchement déposé de matériau de teinte rouge sombre d'environ 1 400 km de diamètre. De tels dépôts sont la marque de retombées de panaches volcaniques.

Les plus importants de ces anneaux rouges sombres ont été mis en évidence dans l'environnement du centre éruptif Pelé, situé près de l'équateur de Io. En général, les panaches d'activité volcanique ont été observés aux latitudes moyennes et basses du satellite Io. La découverte de panaches éruptifs dans les latitudes Nord est donc inhabituelle et constitue une grande surprise. Les observations effectuées sur Io à partir de Cassini, en faisant appel à sa caméra à filtres UV, ont montré que les panaches de Tvashtar Catena pouvaient s'élever jusqu'à 400 km en raison de la faible gravité du satellite.

L'activité interne intense des quatre grands satellites galiléens est la grande découverte du programme Galileo. En 2008-2010, la mission Europa Orbiter devrait prendre la route de Jupiter. Un peu de patience et nul doute que le système que constituent Jupiter et ses satellites n'a pas fini de nous émerveiller ! ■

Systeme énergétique de Galileo : la revanche du nucléaire dans l'espace



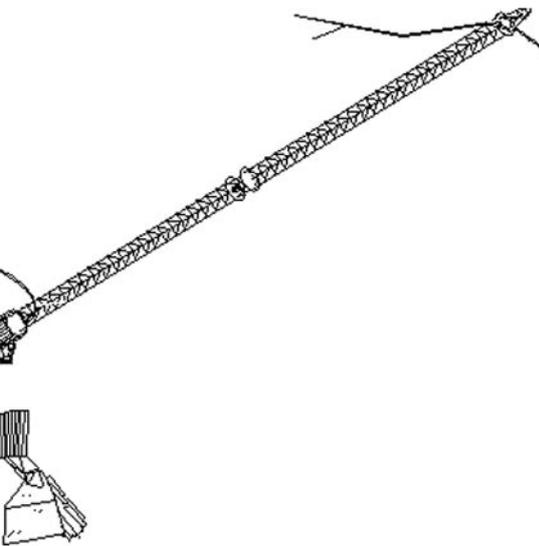
PHILIPPE JAMET

Lors de son lancement en 1989, et il en fut de même en 1997 lors du lancement de la sonde Cassini-Huygens, la sonde Galileo fit l'objet d'attaques insensées de la part des écologistes, lesquels craignaient des risques de contamination à cause de son système énergétique nucléaire en cas d'accident au lancement. Actuellement, alors que la sonde a été placée sur une trajectoire de collision avec Jupiter prévue pour septembre 2003, il ne faut pas oublier que si ses instruments fonctionnent correctement depuis 1995, c'est avant tout au nucléaire qu'elle le doit. Il ne faut pas oublier non plus que la sonde orbiter, après détachement de la sonde atmosphérique jovienne, ne devait opérer que sur les deux années 1995-1997, alors qu'elle opère toujours efficacement en dépit des problèmes graves qui ont affecté son antenne de transmission principale et parfois ses instruments lors de traversées des ceintures de radiations joviennes – soit un prolongement de plus de cinq ans !

Exceptionnellement brillante sur le plan des expériences scientifiques qui ont bénéficié, pour la définition de leurs objectifs, des renseignements apportés par les sondes Voyager 1 et 2 ainsi que des progrès techniques acquis depuis les années 1977-1978, la mission Galileo reste

avant tout marquée par la revanche du nucléaire dans l'espace. Contesté sur Terre par les ignorants et les irresponsables, le nucléaire spatial, même sous la forme atténuée de simples générateurs radio-isotopiques équipant les sondes scientifiques travaillant loin de l'orbite terrestre, fait l'objet d'un consensus unanime chez les scientifiques, dès lors qu'il est seul à permettre la réalisation de leurs projets... Aucune personne sérieuse et saine d'esprit ne songe en effet à en contester la nécessité quand il s'agit de fournir en quantité suffisante l'énergie pour le fonctionnement d'instruments scientifiques nombreux et très gourmands, embarqués sur une grosse sonde travaillant sur une orbite jovienne à presque 800 millions de kilomètres du Soleil.

Le nucléaire devient indispensable dans l'espace dès que l'on s'éloigne de l'orbite terrestre en direction des planètes extérieures pour compenser les problèmes de déficience d'énergie. En effet, une loi élémentaire de la physique stipule que la densité de puissance transmise par l'énergie solaire est inversement proportionnelle au carré de la distance. Ainsi, par exemple, elle est divisée par quatre quand l'éloignement au Soleil double. Les chiffres sont significatifs et parlent d'eux-mêmes : alors que la densité de puissance transmise par le rayonnement solaire à un satellite en orbite autour de la Terre (située en moyenne à 149,6 millions de ki-



lomètres du Soleil) se situe dans la fourchette 1 350-1 395 W/m² et reste utilisable pour fournir de l'énergie aux instruments placés sur ce satellite, cette même densité, au niveau de l'orbite martienne, ne représente plus en moyenne que 40 % de celle reçue en orbite terrestre (Mars se trouve entre 207 et 249 millions de kilomètres du Soleil).

Cette réalité n'est pas restée sans conséquences sur la conception des premières sondes martiennes américaines de la série Mariner qui ressemblaient déjà à des papillons du fait des panneaux solaires de très grande taille dont elles devaient être équipées. Alors que la sonde vénusienne Mariner 2 pouvait se contenter de deux petits panneaux solaires, puisqu'elle évoluait près de notre étoile, les sondes martiennes Mariner 3 et 4 (cette dernière ne fut jamais lancée) devaient, pour une structure presque identique, faire appel à quatre panneaux solaires de 2 m² porteurs chacun de 28 220 cellules photovoltaïques. De plus, ces sondes étaient relativement primitives et n'emportaient qu'un nombre restreint d'instruments. Néanmoins, Mars est simplement plus de deux fois plus loin du Soleil que Vénus et reçoit environ quatre fois moins d'énergie.

Lorsque l'on sait que la masse d'une sonde est essentiellement déterminée par l'importance et le nombre des expériences scientifiques embarquées, il devient évident qu'une grosse sonde aura

besoin de vastes panneaux si l'on choisit la solution du solaire. Or ces panneaux sont eux-mêmes lourds et encombrants et, plus il y en a, plus on risque de connaître des déficiences énergétiques entraînant des défaillances au niveau des instruments scientifiques. Ce problème, déjà difficile à résoudre au niveau de l'orbite martienne encore relativement proche, devient presque insurmontable au-delà. Jupiter se situant à 5,2 unités astronomiques du Soleil, on y reçoit 27 fois moins d'énergie solaire que sur Terre et 51 fois moins que près de Vénus. La densité de puissance transmise est donc 3,7 % de ce qu'elle est au niveau de la Terre.

Conscients de ce handicap et forts de leur expérience passée, les scientifiques de la NASA n'ont pas hésité, dès les années 1973-1974, à doter les sondes jupitériennes Pioneer de générateurs radio-isotopiques SNAP 27 délivrant 66 W, et il en fut de même pour les deux sondes martiennes Viking et les deux sondes Voyager qui n'eussent pu, sans cet apport, effectuer leurs extraordinaires missions sur Mars et aux confins du système solaire.

Dans le cas de Galileo, même en tenant compte des progrès technologiques effectués depuis cette époque en matière de cellules photovoltaïques, le choix de panneaux solaires de taille adéquate aurait conduit la NASA à alourdir la sonde de plus de 500 kg, rendant ainsi impossible sa mise en orbite de transfert avec l'étage supérieur inertiel IUS-19 choisi à la place du Centaur. C'est pourquoi les responsables de l'agence spatiale américaine ont fait appel à un générateur radio-isotopique capable de fournir une puissance de 570 W en début de mission (et 486 W en fin de mission après huit ans de fonctionnement), construit par la firme General Electric sous la responsabilité du département américain de l'Énergie.

Qu'est ce qu'un générateur radio-isotopique ? Il ne s'agit pas d'un véritable réacteur nucléaire mais d'une variante nucléaire de générateur thermoélectrique. Ce dispositif, faisant appel à l'effet thermoélectrique, permet la transformation directe d'énergie calorifique en énergie électrique lorsque des jonctions semi-conductrices ou des thermocouples sont chauffés (effet Zeebeck-

Peltier-Thomson). Dans le cas d'un générateur radio-isotopique comme celui de Galileo, la source de chaleur est fournie par la désintégration radioactive de plutonium 238. Cette chaleur est ensuite captée par un thermocouple composé de deux faces : l'une échauffée directement par la source et l'autre réfrigérée par l'espace. C'est entre ces deux faces que la différence de température est convertie en énergie électrique alimentant les instruments scientifiques. On estime qu'un tel système peut fonctionner dix à vingt ans et, même si sa puissance n'était pas extraordinaire, elle a été suffisante pour assurer le bon déroulement de la mission Galileo jusqu'en 2003.

Le succès des sondes Viking aurait dû être un bon conseiller pour la mise en œuvre de missions martiennes ultérieures car les atterrisseurs de ces deux sondes étaient également équipées de générateurs radio-isotopiques RTG. Viking 1 a atterri sur le site Chryse Planitia le 20 juillet 1976 et a fonctionné jusqu'en novembre 1982 ; Viking 2 a atterri sur Utopia Planitia le 3 septembre 1976 et a fonctionné jusqu'en février 1980. Si les instruments de ces deux sondes ont pu fonctionner aussi longtemps, c'est grâce à leurs générateurs radio-isotopiques et il est évident que c'est la solution idéale pour toute mission martienne devant faire appel à un atterrisseur au sol devant fonctionner longtemps.

Hélas, la leçon ne fut pas retenue par la NASA pour ses missions martiennes ultérieures et la sonde Polar Lander, dont on attendait monts et merveilles, n'en fut pas équipée et fit appel à la technique des panneaux solaires classiques, ce qui devait tout au plus lui permettre de fonctionner quelques semaines ou un mois après son atterrissage par 76,1°S et 195°O, après avoir lancé deux pénétrateurs dans le sol martien. De telles coordonnées avaient été décidées pour effectuer des investigations en bordure de la calotte polaire Sud, pour laquelle certaines photos prises par les orbiter des Viking et Mars Global Surveyor laissaient penser que de l'eau souterraine imprégnait les terrains.

On sait ce qu'il advint de la sonde Mars Polar Lander avec laquelle les contrôleurs de la NASA perdirent tout contact le 3 décembre 1999, peu de temps après avoir également perdu la sonde Mars Climate Orbiter... ■