

GALILEO : LA FIN D'UN LONG VOYAGE

ANN C. VANDAELE
IASB

LA SONDE GALILEO de la NASA, nommée en l'honneur de Galilée, l'astronome italien qui découvrit les quatre satellites de Jupiter, Io, Callisto, Ganymède et Europe en 1610, vient d'achever sa mission d'observation de la planète géante. Initialement prévue pour une mission de 23 mois, comprenant 11 orbites autour de Jupiter et 10 rencontres avec les lunes principales, la sonde sera finalement restée 8 ans à observer le système jovien, avec à son actif 34 orbites autour de la planète et 35 rencontres avec ses satellites.

Mise sur orbite le 18 octobre 1989 par la navette Atlantis, Galileo a commencé son long voyage vers Jupiter... en se dirigeant tout d'abord vers Vénus autour de laquelle elle a effectué une orbite lui permettant de gagner de la vitesse. Le projet initial comportait un moteur à trois étages qui aurait permis un trajet direct Terre-Jupiter en trois ans et demi, mais, restrictions budgétaires obligent, la sonde ne fut équipée que d'un moteur à deux étages l'obligeant à effectuer un passage autour de Vénus en février 1990 et un autre

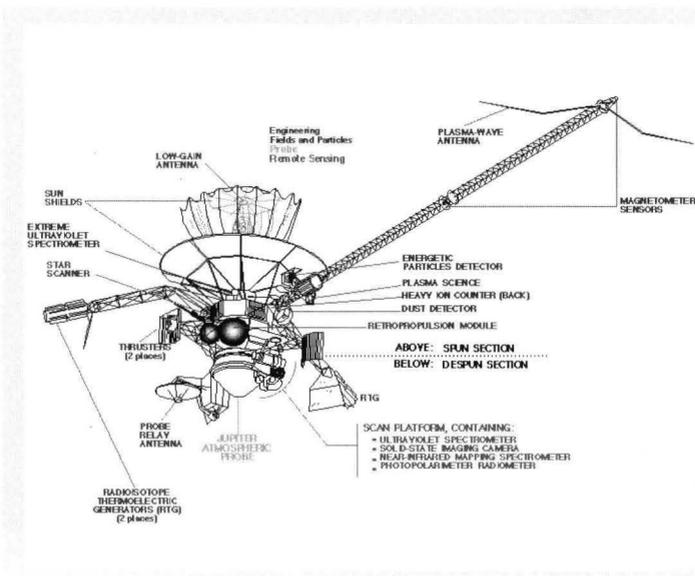
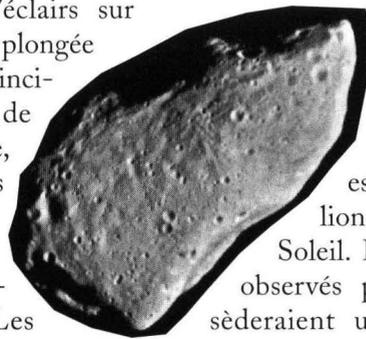
autour de la Terre en décembre 1990. Grâce à ce dernier la sonde se plaça sur une orbite elliptique autour du Soleil. Un dernier survol de la Terre lui fournit suffisamment d'accélération, pour atteindre Jupiter en 22 mois.

EN ROUTE

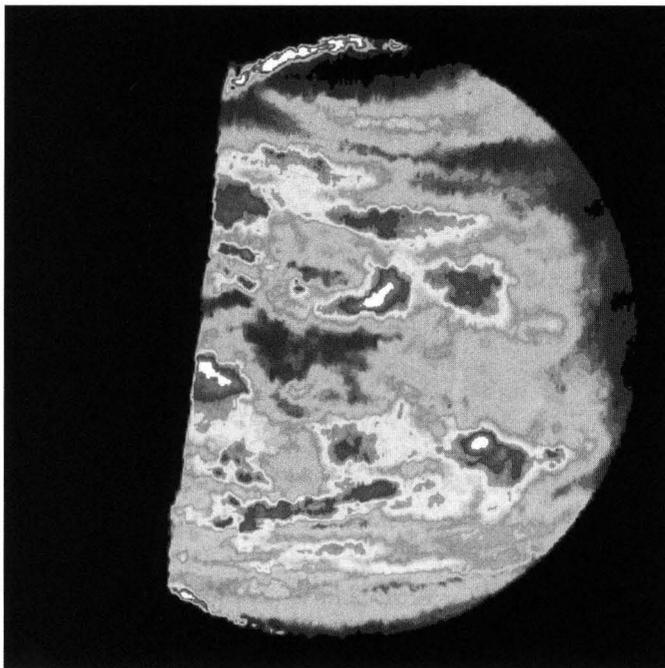
Lors du survol de Vénus à une altitude de 16 000 km, Galileo eu l'occasion d'observer des nuages de moyenne altitude et pu également confirmer l'existence d'éclairs sur cette planète. Vénus est plongée dans une atmosphère principalement composée de nuages d'acide sulfurique, épaisse de plusieurs kilomètres. Les images prises en lumière visible montrent une sphère uniformément blanche. Les quelques prises de vue réalisées avec le spectromètre infrarouge à bord de la sonde (*Near Infrared Mapping Spectrometer*) ou celles obtenues avec un filtre ultraviolet ont mis en évidence des structures nuageuses plus complexes et dont la dynamique révèle des vitesses de

déplacement phénoménales d'environ 380 km/h.

Sur sa route vers Jupiter, Galileo passa au voisinage de deux astéroïdes: le 29 octobre 1991, elle passa à près de 1600 km de Gaspra, un caillou irrégulier de 20 km de long et 12 de large, et le 28 août 1993, la sonde survola Ida, un astéroïde de plus grande taille. Découvert en 1916 par l'astronome Grigori Neujmin de l'Observatoire de Simeis en Ukraine, Gaspra est l'un des 15000 objets appartenant à la ceinture principale d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter. Gaspra est situé à 331 millions de kilomètre du Soleil. Les deux astéroïdes observés par la sonde possèderaient un champ magnétique, mais Galileo a surtout découvert qu'Ida possède son propre satellite, Dactyl, d'un diamètre d'à peine 1,5 km. La connaissance de l'orbite de ce dernier a permis d'estimer la densité de Ida. Etudier des astéroïdes tels que Gaspra et Ida offre la possibilité aux



LA CONCEPTION DE LA SONDE ORBITALE est assez originale. En règle générale, les engins spatiaux sont stabilisés en vol soit en les faisant tourner sur leur axe principal, soit en maintenant leur orientation fixe dans l'espace. La solution choisie pour Galileo combine ces deux techniques : à côté de la section en rotation, il y a également une section contra-rotative, ayant une orientation fixe. Un pointeur stellaire détermine l'orientation et la vitesse de rotation et des gyroscopes placés sur la partie contra-rotative permettent le pointage des instruments. L'alimentation, le module de propulsion, la plupart des ordinateurs, ainsi que l'électronique de contrôle sont montés sur la section tournante. On y trouve également les instruments mesurant les champs magnétiques et les particules chargées. Parmi ceux-ci, les capteurs magnétométriques sont placés au bout d'un bras de 11 m de long, de manière à minimiser les interférences dues au vaisseau lui-même. La partie contra-rotative transporte les instruments qui doivent rester stables, comme par exemple, les systèmes de caméra, les spectromètres infrarouge et ultraviolet, ainsi que les radio-photomètres.



Vue en fausse couleur des nuages sur la face nocturne de Vénus. Cette image a été obtenue par le Near Infrared Mapping Spectrometer alors que Galileo s'approchait de Vénus le 10 février 1990. L'image montre la chaleur rayonnée par la basse atmosphère et traversant la couche nuageuse. Les couleurs indiquent la transparence relative des nuages : blanc et rouge pour des nuages fins, bleu et noir pour des couches nuageuses épaisses. La région sondée correspond à la moyenne atmosphère de la planète (50-55 km d'altitude par rapport à la surface). Près de l'équateur, les nuages apparaissent massifs et duveteux ; plus au nord, ils s'étirent en filaments orientés d'est en ouest, suite à l'action de vents dont la vitesse est estimée à 70 m/s ; les pôles sont quant à eux recouverts d'épais nuages © JPL/NASA

scientifiques de mieux comprendre la formation et l'évolution du système solaire. On pense que les astéroïdes ont été formés à un stade très précoce de la formation du système solaire et recèlent dès lors des indices sur l'évolution des planètes. Les observations de Galileo ont amélioré nos connaissances des astéroïdes ainsi que les modèles de leur formation et de leur évolution. L'observation de Gaspard devrait en outre permettre l'étalonnage des instruments au sol puisque cet astéroïde peut également être observé depuis la Terre.

En 1994, la sonde était au bon endroit et au bon moment pour observer la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter, la géante gazeuse. Les images de l'impact non-visible depuis la Terre, furent d'une grande aide pour la compréhension de ce type d'événements.

DANS L'ATMOSPHÈRE JOVIENNE

Le 13 juillet 1995, la sonde atmosphérique est lâchée et commence sa chute vers Jupiter. Elle y arrivera 5 mois plus tard. La sonde n'ayant pas de moyen de propulsion propre, sa trajectoire fut choisie en pointant Galileo dans la bonne direction.

Deux semaines plus tard, Galileo utilisait son moteur-fusée pour la première fois pour réajuster sa trajectoire vers Jupiter. Elle y arriva le 7 décembre. Le même jour elle réalisa les premiers survols d'Io et d'Europe et recevait les premières données

émises par la sonde atmosphérique. Cette dernière pénétrait à ce moment l'atmosphère jovienne à une vitesse proche de 170 000 km/h. La sonde ralentit par freinage aérodynamique pendant quelques minutes avant de déployer son parachute.



Vue artistique de Galileo et Jupiter © JPL/NASA

Elle flotta ainsi jusqu'à une altitude de 200 km environ, retransmettant vers la sonde orbitale des données sur la quantité de lumière solaire, les flux de chaleur, la pression, la température, les vents, les éclairs et la composition de l'atmosphère jovienne. Après 58 minutes de descente, la chaleur intense réduisit la sonde au silence. Elle avait atteint une région de l'atmosphère où régnait une pression de près de 23 fois supérieure à la pression existant à la surface de la Terre. A la fin de la transmission de ces données, Galileo freina, de manière à se mettre en orbite autour de la planète.

La première orbite dura sept mois, durant lesquels de nouvelles versions des programmes de compression des données furent installées et testées. Le taux de transmission pu ainsi être multiplié par un facteur 10. Cela allait compenser les problèmes rencontrés avec l'antenne à gain élevé qui ne s'était pas déployée comme prévu, forçant les transmissions à s'effectuer via l'antenne à faible gain. Le problème lié à l'antenne avait fait craindre que de nombreux objectifs de la mission originelle ne soient pas réalisés. Les nouveaux programmes de compression conjugués au fait que la mission a duré finalement près de quatre fois plus longtemps que prévu initialement, ont fait que la mission a fourni au total bien plus que ce qu'on attendait d'elle.

En fait, dès décembre 1997, les objectifs principaux de la mission avaient été réalisés. Ensuite des extensions de la mission ont permis à la sonde de continuer son travail scientifique, et notamment d'examiner en détail Europe, mettant ainsi en évidence la présence d'un océan liquide sous la surface gelée de la lune. Ce fut ensuite le tour d'Io, pour laquelle les ingénieurs de la NASA durent modifier les codes ordinateurs à bord de la sonde afin de les rendre moins sensibles aux effets des radiations. La seconde extension de la mission, Galileo Millennium Mission, approuvée en 2000, devait permettre de nouvelles découvertes et prévoyait déjà la fin de la sonde en 2003. Un des points forts de cette mission fut sans nul doute la double présence autour de Jupiter de Galileo et de la sonde Cassini, alors en route vers Saturne.

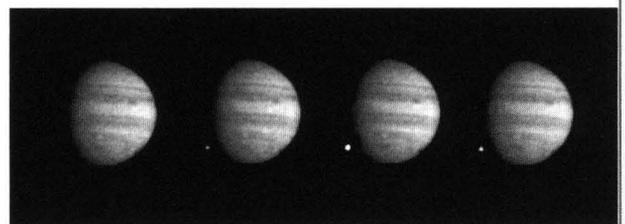
FIN PROGRAMMÉE

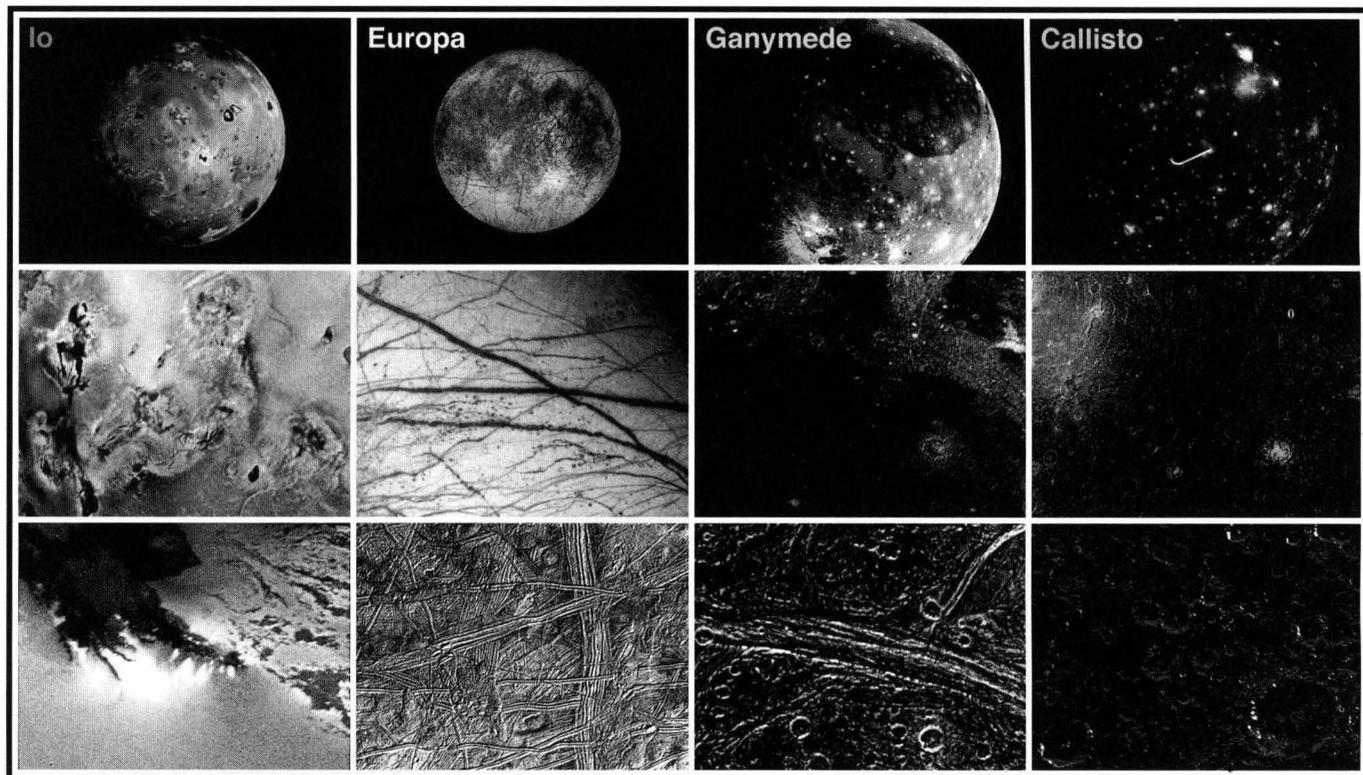
Ce dimanche 23 septembre 2003, Galileo s'est engloutie dans l'atmosphère de la géante. La NASA a fait dévier la sonde de son orbite, de manière à l'amener dans l'atmosphère agitée de Jupiter. La chaleur alliée à la pression écrasante ont pulvérisé la sonde ainsi que les micro-organismes suspectés d'y résider. C'est ceux-ci entre autre qui sont à l'origine de la fin spectaculaire de Galileo. La NASA a voulu en effet s'assurer que la sonde ne s'écraserait

Rencontres autour de Jupiter

Orbite	Cible	Date	Altitude (km)
0	Io	7 déc. 1995	897
1	Ganymède	27 juin 1996	835
2	Ganymède	6 sept. 1996	261
3	Callisto	4 nov. 1996	1136
4	Europe	19 déc. 1006	692
5	-	-	-
6	Europe	20 fév. 1997	586
7	Ganymède	5 avril 1997	3102
8	Ganymède	7 mai 1997	1603
9	Callisto	25 juin 1997	418
10	Callisto	17 sept. 1997	535
11	Europe	6 nov. 1997	2043
12	Europe	16 déc. 1997	201
13	-	-	-
14	Europe	29 mars 1998	1644
15	Europe	31 mai 1998	2515
16	Europe	21 juil. 1998	1834
17	Europe	26 sept. 1998	3582
18	Europe	22 nov. 1998	2271
19	Europe	1 fév. 1999	1439
20	Callisto	5 mai. 1999	1321
21	Callisto	30 juin 1999	1048
22	Callisto	14 août 1999	2299
23	Callisto	16 sept. 1999	1052
24	Io	11 oct. 1999	611
25	Io	26 nov. 1999	301
26	Europe	3 janv. 2000	351
27	Io	22 fév. 2000	198
28	Ganymède	20 mai 2000	809
29	Ganymède	28 déc. 2000	2338
30	Callisto	25 mai 2001	138
31	Io	6 août 2001	194
32	Io	16 oct. 2001	184
33	Io	17 janv. 2002	102
34	Amalthea	5 nov. 2002	160
35	Jupiter	21 sept. 2003	impact

Ces quatre images prises à 2,3 s d'intervalle montrent les premiers instants de l'impact du fragment W, le plus grand, de la comète Shoemaker-Levy 9 dans l'atmosphère de Jupiter. Sur la première image, l'impact n'est pas encore visible; sur la seconde, un point lumineux apparaît surimposé à la face nocturne de l'hémisphère sud de Jupiter. Dans la troisième image, l'impact est devenu tellement brillant qu'il sature la caméra CCD au centre de l'impact. Dans la dernière image, l'impact est déjà beaucoup plus faible. Ces images sont extraites d'une série de 56 prises de vue illustrant la comète réduite en pièces lors de son arrivée près de Jupiter en juillet 1992 et percutant la planète fin juillet 1994. Les impacts des différents fragments cométaires ont produit plus d'énergie dans l'atmosphère que tout l'arsenal nucléaire existant sur Terre. Ces impacts s'étant déroulé du côté nuit de la planète, ils ne furent pas visibles depuis la Terre. La décomposition d'une comète en de nombreux fragments est un événement rare, mais la collision d'une comète avec une autre planète l'est encore plus. © JPL/NASA





Les satellites galiléens photographiés par Galileo. © JPL/NASA

jamais sur Europe, convaincu que cet astre pourrait abriter les conditions les plus favorables pour le développement d'une vie extra-terrestre. Si les micro-organismes de Galileo, ainsi que son générateur thermoélectrique à radio-isotopes d'ailleurs, s'écrasaient sur Europe, ils pourraient compromettre d'éventuelles tentatives de recherche de traces de vie indigène. En règle générale, la NASA désinfecte ses engins spatiaux afin d'éviter tout risque de contamination, mais cette désinfection ne fut pas réalisée lors du lancement de Galileo. D'où la nécessité du crash. Sept minutes avant la désintégration de la sonde, cette dernière a interrompu sa dernière transmission qui avait débuté près de 3 heures auparavant. Une bonne partie de ces données ont été récupérées et fourniront certainement encore d'étonnants résultats.

UNE PLÉTHORE DE RÉSULTATS

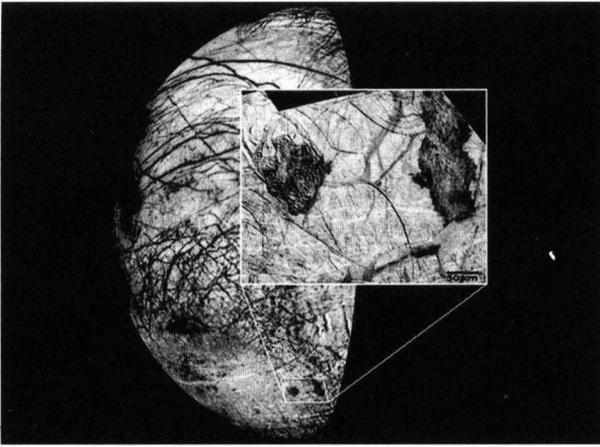
Les résultats scientifiques obtenus grâce à Galileo sont nombreux et il

serait fastidieux de tous les citer. En voici les plus marquants :

- Les mesures réalisées par la sonde atmosphérique ont montré que l'abondance relative de certains éléments est différente de celle du Soleil, donnant ainsi des indications sur l'évolution de l'atmosphère de la planète après sa formation à partir de la nébuleuse solaire. Les scientifiques ont par ailleurs été surpris de ce que la sonde atmosphérique n'ait pas trouvé autant d'eau que prévu. Il s'avéra par la suite que l'endroit choisi pour l'atterrissage était inhabituel. En effet, des observations réalisées depuis la Terre ont montré depuis que cette région était sans doute une des plus chaude et sèche de la planète. Plus tard, en effet, les instruments à bord de Galileo confirmaient la présence de zones sèches et de zones humides sur Jupiter. Les premières correspondraient à des régions où l'air descend en s'asséchant, et les secondes à des régions où la vapeur d'eau subirait un mouvement ascendant, formant des orages beaucoup plus puissants que

ceux existant sur Terre.

- De nombreux orages de grande ampleur sont concentrés dans des régions équatoriales, où les vents sont très turbulents. Bien que moins fréquents que sur Terre, les éclairs joviens sont jusqu'à 1000 fois plus puissants.
- Les mesures corroborent la théorie selon laquelle il y aurait un océan liquide sous la surface gelée d'Europe. Certaines structures semblent être séparées par de la glace plus récente et lisse, indiquant qu'elles auraient dérivé sur de l'eau liquide, un peu à l'image des icebergs dans les régions polaires de la Terre. Des coulées volcaniques de neige associées à des coulées d'eau liquide à la surface, ont également été observées. Cette dernière découverte intrigue les chercheurs. En effet, l'eau liquide est un élément clef dans l'apparition et le développement de la vie.
- Galileo a également mis en évidence la présence de mers salées liquides sur Ganymède et Callisto. Les mesures faites à l'aide de magnétomètres indiquent que la variation



Cette image est un agrandissement de la région de Thrace sur Europe. Avant la mission Galileo, les connaissances relatives à Europe en faisait une lune couverte de glace, à la surface exceptionnellement brillante, recouverte de marques linéaires ou courbes. Maintenant, les scientifiques peuvent affirmer, d'après les mesures réalisées par Galileo, l'existence d'une couche de glace jeune, fine et craquelée, bougeant probablement lentement à la surface d'un océan profond de plus de 100 km. Les scientifiques pensent qu'Europe représente un habitat potentiel pour le développement d'une vie extra-terrestre © JPL/NASA

des champs magnétiques autour de ces deux lunes révèle la présence, sous leur surface, de couches électriques conductrices, comme par exemple des océans.

- Europe, Io et Ganymède ont toutes des cœurs métalliques, signifiant qu'une migration des éléments les plus lourds s'est produite vers le centre de ces lunes. A l'opposé, la composition de Callisto est quasi uniforme, montrant que cette dernière n'a pas suivi la même évolution que les trois autres satellites.

- Europe, Ganymède et Callisto possèderaient une exosphère, c'est à dire une couche riche en ions et gaz neutres entourant leur surface. La présence de ces gaz prouve l'efficacité d'un processus déjà connu en laboratoire et qui décrit la formation de vapeur d'eau et d'autres gaz suite à la collision de particules chargées (issus de la magnétosphère) avec une surface gelée.

- Ganymède génère un champ magnétique. C'est en fait la première

lune connue possédant son propre champ magnétique. On savait déjà que certains satellites de Jupiter possédaient un champ magnétique induit par celui de la planète. Ces observations mettent à rude épreuve les modèles que les scientifiques se faisaient de la formation des champs magnétiques, notamment dans des satellites.

- L'activité volcanique d'Io est sans doute 100 fois supérieure à celle de la Terre. Ce processus modifie continuellement sa surface. Les analyses spectrales ont montré que ces éruptions sont essentiellement composées de roches silicatées liquides. La température de ces laves est en effet trop élevée pour permettre la présence d'autres composés tel que le soufre. La composition de ces laves chaudes est similaire au volcanisme ayant existé sur Terre il y a plus de 3 millions d'années.

- Découverts en 1973 par Voyager 1, les anneaux de Jupiter sont assez surprenants : l'anneau principal ainsi

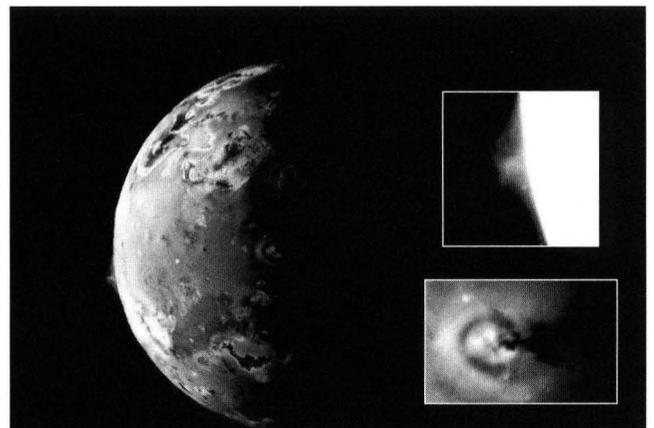
qu'un nuage annulaire intérieur, sont constitués de poussières noires, alors qu'un troisième anneau est en fait composé de plusieurs anneaux emmêlés les uns dans les autres. Le système d'anneaux de Jupiter serait formé de poussières produites par l'impact de météorites sur les quatre petites lunes intérieures de la planète, Métis, Adrasteé, Amalthée et Thébé.

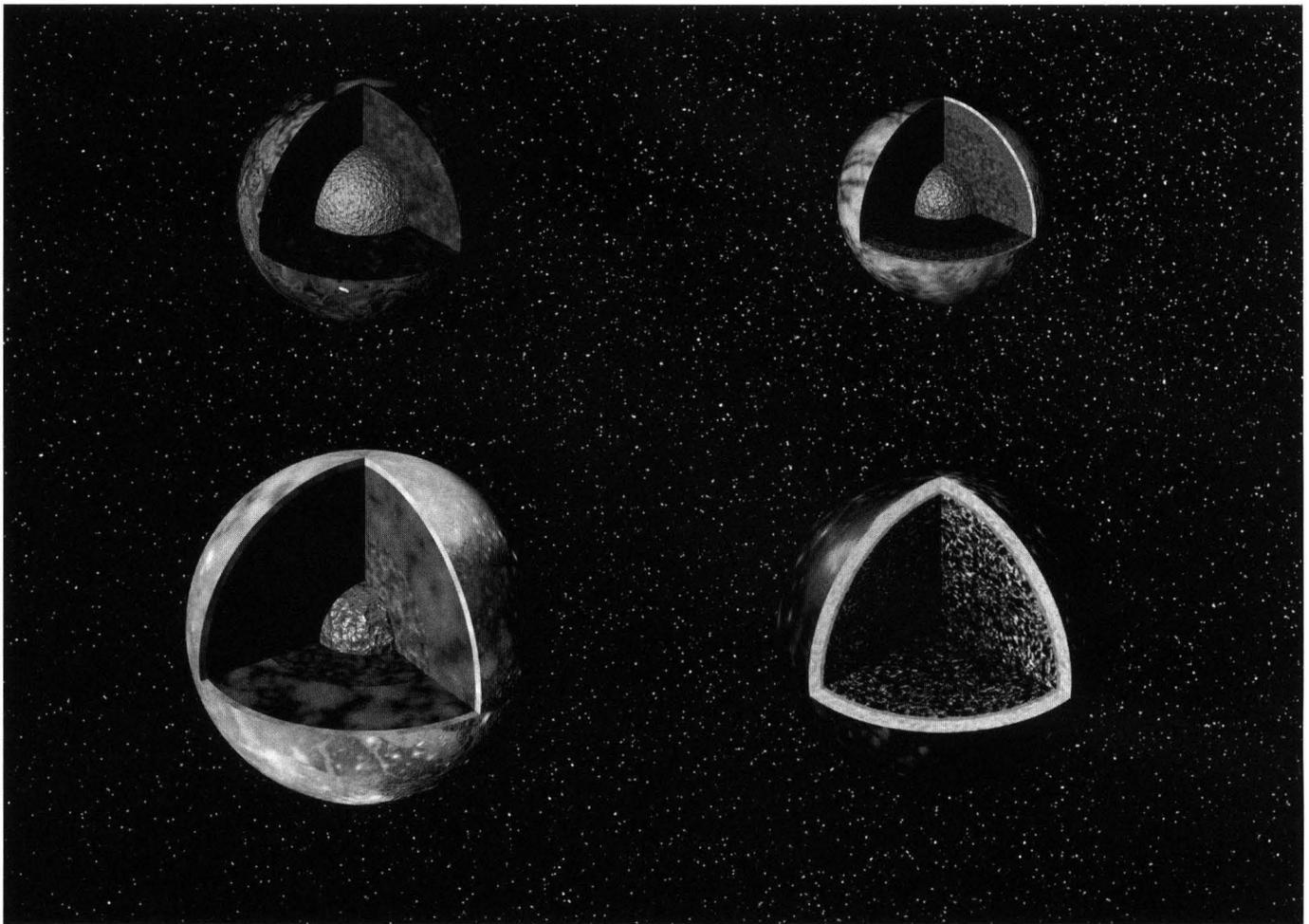
- En étant resté si longtemps plongé dans la magnétosphère de Jupiter, Galileo a pu en identifier la structure globale et étudier sa dynamique. Celle-ci est fort différente de ce qui se passe sur Terre. Sur Terre, les aurores sont générées par l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre; sur Jupiter elles sont le fruit de la rotation importante de la planète.

DE NOUVELLES ENVIES

Ces résultats époustouffants et surtout la possibilité que certaines des lunes, notamment Europe,

Cette image, enregistrée lors de la neuvième orbite de Galileo autour de Jupiter, montre deux panaches volcaniques sur Io. Le premier fut observé sur le limbe brillant de la lune, en éruption au dessus d'une caldera dénommée Pilon Patera, d'après un dieu sud-américain du tonnerre, du feu et des volcans. Le panache a été observé par Galileo, alors que celui-ci survolait Io à une altitude de 140 km. Le second panache, observé à la limite du jour et de la nuit, est appelé Prometheus d'après le dieu grec du feu. Son ombre de près de 75 km s'étend sur la droite de la cheminée volcanique. Celle-ci est au centre des anneaux brillants et sombres. Les panaches de fumée sur Io sont bleus, de sorte que leurs ombres sont rouges. Le panache Prometheus est visible sur toutes les prises de vue effectuées par Galileo se présentant sous la bonne géométrie, ainsi que sur les images enregistrées par Voyager 1 en 1979. Il est donc possible que ce volcan soit actif depuis plus de 18 ans © JPL/NASA





Modèles des structures internes des quatre satellites galiléens, Io (en haut à gauche), Europe (en haut à droite), Ganymède (en bas à gauche) et Callisto (en bas à droite). Les surfaces sont des images composites obtenues en 1979 par Voyager, et les structures internes ont été déduites des mesures de champ magnétique et gravifique effectuées par Galileo. Les satellites sont montrés en respectant leurs tailles respectives. A l'exception de Callisto, les lunes ont un cœur métallique (fer et nickel) indiqué en gris sur les figures. Le cœur métallique est ensuite entouré d'une couche de roches (en brun). Sur Io, la couche de roches s'étend jusqu'à la surface, alors que sur Ganymède et Europe, cette couche est elle-même enclose dans une couche d'eau sous forme liquide ou de glace (respectivement en bleu et blanc). L'intérieur de Callisto est homogène et est constitué d'un mélange uniforme de roches et de glace. © JPL/NASA

Ganymède et Callisto, pourraient abriter de vastes océans propices au développement d'une vie extra-terrestre, ont donné envie aux scientifiques et ingénieurs de la NASA de retourner explorer le système jovien. La NASA est en train de développer les plans d'une mission ambitieuse appelée *Jupiter Icy Moons Orbiter* ou JIMO, qui se mettrait en orbite autour de chacune de ces trois lunes, afin d'y réaliser des recherches et analyses détaillées sur leur formation, leur histoire et leur potentiel à assurer le développement de la vie. Cette mission ne devrait pas décoller avant 2011.

De nombreuses images et animations peuvent être trouvées sur le site officiel de Galileo, très bien organisé et clair, <http://www.jpl.nasa.gov/galileo>.

Voici les pages de ce site qui m'ont semblé particulièrement intéressantes :

<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/images>: toutes les images classées par objets ou astres ;

<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/countdown>: diverse simulations, notamment des différents survols, mais aussi de l'impact de la sonde sur Jupiter ;

<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/jupiterflyby>: encore des animations des survols ;

<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/instruments>: la liste détaillée de tous les instruments embarqués, avec de nombreux liens sur les pages dédiées à chaque instrument ;

<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/model>: pour les plus petits (mais cependant patients), tout le matériel et les instructions nécessaires pour construire sa propre maquette de la sonde.