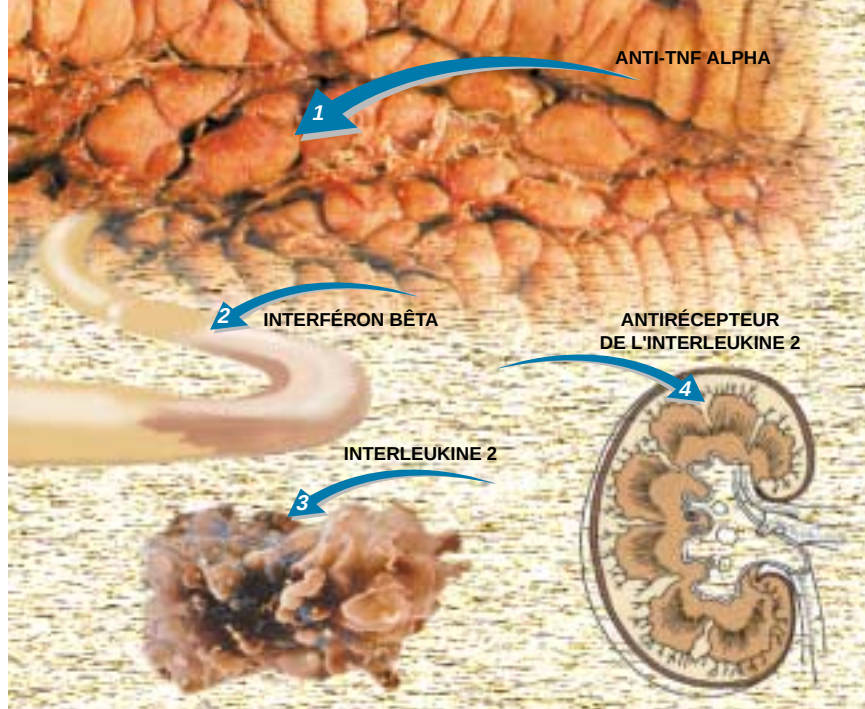


d'obtenir leur autorisation de mise sur le marché en Europe pour deux maladies fréquentes et invalidantes : la maladie de Crohn et la polyarthrite rhumatoïde (toutes deux dues à un excès de TNF). Utilisés depuis quelques années aux États-Unis, ces traitements ont totalement changé le pronostic de ces deux maladies. Aujourd'hui les cytokines thérapeutiques et leurs antagonistes sont administrés par piqûres et sont coûteuses. On peut espérer, dans un avenir proche, disposer de petites molécules non protéiques moins onéreuses et administrables par voie orale.

Par ailleurs, dans le cas d'un choc septique, on a montré, sur l'animal, que des substances qui neutralisent le TNF alpha préviennent la survenue d'un choc septique à condition d'être administrées dès le début de la libération massive des cytokines. Quelques tentatives sur l'homme n'ont pas eu les résultats escomptés, vraisemblablement en raison d'une administration trop tardive, une fois que les signes cliniques du choc septique étaient déjà manifestes, une fois l'orage cytokinique déjà déclenché.

Les cytokines semblent aussi avoir des applications intéressantes chez les personnes infectées par le VIH. Les traitements antiviraux utilisés contre le VIH assurent une réduction notable de la concentration en particules virales dans le sang, mais la récupération des fonctions du système immunitaire est lente et incomplète. On s'est demandé comment accélérer cette récupération. Or, l'interleukine 2 est normalement synthétisée par les lymphocytes T auxiliaires, mais ces derniers sont détruits par le VIH : sa concentration est inférieure à la normale chez les personnes séropositives. De plus, on sait que cette cytokine stimule la prolifération des lymphocytes T, *in vitro*. Au cours d'un essai thérapeutique coordonné par l'Agence nationale de recherche sur le SIDA, l'ANRS, on a administré de l'interleukine 2 à une centaine de personnes infectées par le VIH, à un stade peu avancé de la maladie. Cet essai a montré que le traitement par l'interleukine 2 des personnes infectées par le VIH favorise la multiplication des lymphocytes T auxiliaires, et, comme elle les protège contre la mort cellulaire programmée, l'apoptose, elle semble aussi améliorer leur survie.

Enfin, la spécificité des cytokines ouvre des espoirs thérapeutiques :



6. DE NOUVEAUX TRAITEMENTS inhibent les cytokines responsables de diverses maladies. La maladie de Crohn (1, aspect de l'intestin atteint) est due à un excès de TNF, et des antagonistes spécifiques de cette substance font régresser la maladie. Les poussées de sclérose en plaque (2, les prolongements neuronaux perdent progressivement leur enveloppe de myéline) sont freinées par l'interféron bêta. Le traitement par l'interleukine 2 des personnes infectées par le VIH favorise la multiplication des lymphocytes T (3, un lymphocyte d'où s'échappent d'innombrables particules virales). Des anticorps dirigés contre les récepteurs de l'interleukine 2 empêchent que les greffes (de rein, par exemple, 4) ne soient rejetées.

on devrait pouvoir élaborer de nouveaux médicaments qui inhiberaient un seul type de réaction immunitaire, sans perturber les autres. Par exemple, la plupart des cellules immunitaires présentes dans la muqueuse bronchique au cours d'une crise d'asthme semblent être recrutées par une seule chimiokine, l'éotaxine, qui agit sur un récepteur spécifique, nommé CCR₃. Si l'on parvenait à bloquer ce récepteur, on empêcherait le développement de l'inflammation allergique bronchique, et uniquement cette réaction inflammatoire.

Citons un dernier exemple des applications potentielles de la spécificité des cytokines : des anticorps monoclonaux dirigés contre les récepteurs de l'interleukine 2 sont utilisés contre les rejets de greffe. Lors d'une

greffe, les lymphocytes T spécifiques du greffon sont activés et ils déclenchent les réactions immunitaires qui seront responsables du rejet de la greffe. Or ces lymphocytes ne peuvent survivre qu'en présence d'interleukine 2 dont ils portent – seuls – des récepteurs. On a donc eu l'idée de synthétiser des anticorps dirigés contre le récepteur de l'interleukine 2 : ils se fixent sur le récepteur, empêchant l'interleukine 2, vitale pour les lymphocytes spécifiques du greffon, de s'y loger. Ces lymphocytes meurent : la greffe n'est pas rejetée. Comme seuls les lymphocytes T spécifiques du greffon sont activés, les anticorps dirigés contre le récepteur de l'interleukine 2 n'agissent que sur eux : les autres acteurs du système immunitaire ne sont pas perturbés.

Dominique ÉMILIE travaille dans le service de médecine interne et d'immunologie clinique, dirigé par Pierre GALANAUD, à l'Hôpital Antoine-Béclère, à Clamart. Dans le même hôpital, Marc HUMBERT travaille dans le service de pneumologie. Ils mènent tous trois des recherches à l'Institut Paris-Sud sur les cytokines.

D. ÉMILIE et al., *Chimiokines et leurs récepteurs : rôle dans l'infection par le VIH*, in *Med. Thérap.*, n° 4, pp. 663-666, 1988.

D. ÉMILIE et al., *Quel avenir pour les drogues immunostimulantes : l'exemple de l'interleukine 2 dans la reconstitution immunitaire de l'infection par le VIH*, in *Médecine/Sciences*, vol. 15, pp. 911-914, 1999.

M. HUMBERT, *Les nouvelles armes contre l'asthme*, in *Pour la Science*, n° 264, pp. 46-53, octobre 1999.

J. THÈSE, *The Cytokine Network and Immune Functions*, Oxford University Press, 1999.

La mission *Galileo* vers Jupiter

TORRENCE JOHNSON

Malgré des difficultés techniques, la sonde spatiale Galileo a révélé l'inouïe variété des satellites de Jupiter.

Afin d'économiser son énergie, le module de descente voyageait dans un silence radio total. Seule une petite horloge égrenait les secondes. À 215 000 kilomètres de là, le vaisseau qui l'avait largué était prêt à recevoir et à retransmettre ses émissions. Sur la Terre, des scientifiques attendaient impatiemment ces données : n'avaient-ils pas, pour certains, préparé cet instant depuis 20 ans ? Le premier signal attendu était un simple bit de donnée, oui ou non, qui indiquerait si le petit module avait survécu à son plongeon dans l'atmosphère dense de Jupiter.

La route jusqu'à Jupiter fut parsemée d'embûches. Lors de la conception du projet, au milieu des années 1970, on avait prévu que la sonde spatiale prendrait le départ en 1982, serait mise en orbite autour de la Terre par une navette spatiale et serait envoyée vers Jupiter par un étage supérieur de fusée spécialement conçu. Toutefois, les ratés des premiers lancements de la navette et des difficultés de conception de l'étage supérieur ont retardé le calendrier. Le terrible accident de *Challenger*, en 1986, alors que *Galileo* était prête à partir, bouleversa les plans. Contraints d'utiliser un étage supérieur plus sûr mais moins puissant, les ingénieurs calculèrent une trajectoire qui utilisait l'assistance gravitationnelle de Vénus et de la Terre. Après le lancement, en octobre 1989, le voyage devait durer six ans. Toutefois, après deux années de voyage, l'antenne principale de communication ne s'ouvrit pas ; il ne restait que l'antenne de secours, moins puissante, pour assurer les communications avec la Terre. Puis l'enregistreur de données à bande se bloqua.

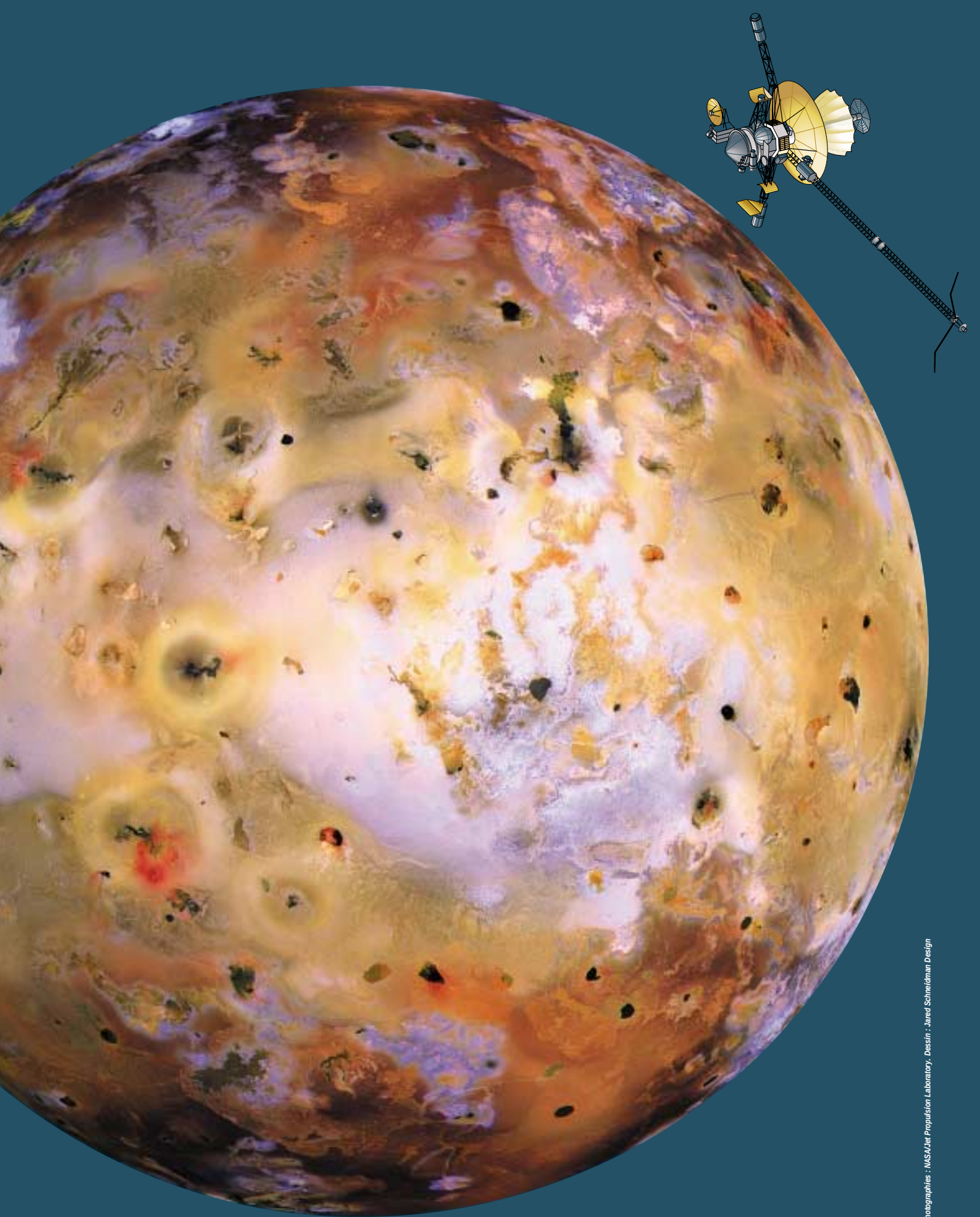
Lorsque les ingénieurs reçurent le signal qui confirmait le fonctionnement du module, il y eut des exclamations de joie dans la salle de contrôle. Pourtant, tous savaient que deux heures cruciales allaient s'écouler avant le second événement clé : la mise en orbite de l'orbiteur autour de

Jupiter. Pour la réussir, on devait réduire sa vitesse : pendant 45 minutes, les ingénieurs donnèrent l'ordre au moteur principal de ralentir l'orbiteur. La manœuvre fut un succès : l'orbiteur devint le premier satellite artificiel de la planète géante.

Depuis ce jour de décembre 1995, la mission a donné la première vision détaillée du système jovien (les survols par *Pioneer* et *Voyager*, dans les années 1970, n'en avaient donné qu'un aperçu). Le module de descente a traversé les nuages de Jupiter et a fait les premières mesures *in situ* de l'atmosphère d'une planète extérieure, envoyant ses données pendant une heure avant de sombrer dans les profondeurs gazeuses de la planète. L'orbiteur se porte toujours à merveille. Il a photographié et analysé la planète, ses anneaux et ses multiples satellites. Mieux encore, il a révélé qu'un océan d'eau liquide semble être abrité par Europe, l'un des quatre plus gros satellites de Jupiter, découverts par Galilée en 1610 (voir *L'océan caché d'Europe*, de Robert Pappalardo, James Head et Ronald Greeley, *Pour la Science*, février 2000). D'autres surprises attendaient les astronomes : des jets d'électrons relient Jupiter et Io, le satellite galiléen à l'activité volcanique intense ; Ganymède est le premier satellite dont on ait détecté un champ magnétique ; Callisto présente des caractéristiques étranges et possède peut-être un océan, comme Europe.

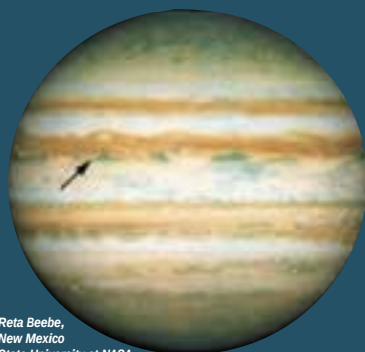
CRIBLÉE DE 80 VOLCANS ACTIFS, la surface de Io donne l'impression que la Terre est géologiquement inerte, par comparaison. Les taches jaunes, marron et rouges de cette mosaïque en fausses couleurs (*image principale*) correspondent à différents minéraux à base de soufre. Un givre de dioxyde de soufre recouvre les zones blanches. Du gaz et de la poussière éjectés se retrouvent en orbite, comme on l'observe quand le Soleil éclaire Io de côté (*en cartouche à droite*). La lueur jaunâtre est due en grande partie à du sodium gazeux. Le jet de lumière blanche correspond à la dispersion de la lumière solaire par le panache, haut de 100 kilomètres, du volcan Prométhée.





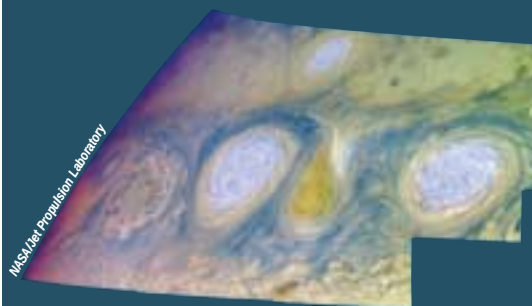
Photographies : NASA/Jet Propulsion Laboratory. Dessin : Jared Schneidman Design

La géante gazeuse : Jupiter



Reta Beebe,
New Mexico
State University et NASA

Avant la mission *Galileo*, aucun objet fabriqué par l'homme n'était jamais entré en contact avec une planète géante gazeuse. Le vaisseau principal a laissé tomber un module dans l'atmosphère de Jupiter, un peu au Nord de son équateur (*flèche noire sur la photographie de gauche*). Pendant plus d'une heure, le module est descendu dans l'atmosphère, mesurant sa composition (*tableau ci-contre*), avant d'être détruit par la pression et la chaleur excessives (*séquence ci-contre à droite*). Dans le tableau, on suppose que la composition solaire primordiale est identique à celle des couches externes du Soleil.



NASA Jet Propulsion Laboratory

CES NUAGES OVALES ont été observés par *Galileo* dans le proche infrarouge, au début de 1997. Une région en forme de poire est piégée entre eux. Les ovals tournent en sens inverse des aiguilles d'une montre, tandis que la région en forme de poire tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Un an plus tard, les ovals avaient fusionné. Chaque ovale a un diamètre d'environ 9 000 kilomètres.



Don Dixon

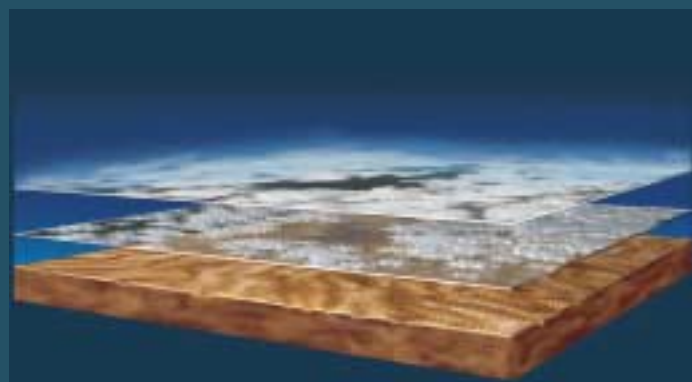


NASA Jet Propulsion Laboratory

CETTE GRANDE TACHE ROUGE est une zone de cyclone qui s'élève à une trentaine de kilomètres au-dessus des nuages voisins. En allant du rouge au vert puis au bleu, les couleurs correspondent à une quantité décroissante de méthane mesuré le long de la ligne de visée. Ainsi, les zones roses et blanches sont les plus hautes, et les zones bleutées et noires sont les plus basses. La tempête, de 26 000 kilomètres d'extension, résulte vraisemblablement des instabilités des forts courants atmosphériques d'Est et d'Ouest de la planète. Sur le schéma (*cartouche, ci-dessus*), l'échelle verticale est exagérée d'un facteur 1 000.

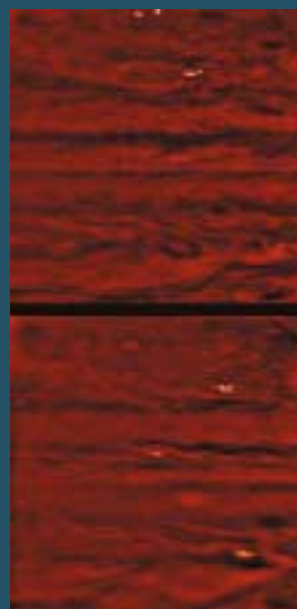


NASA Jet Propulsion Laboratory



Don Dixon

UN TROU DANS LA COUVERTURE NUAGEUSE de haute altitude révèle les régions comparativement chaudes situées plus bas. Comme sur les autres images prises dans l'infrarouge proche, les nuages bleutés sont minces, les nuages blancs sont épais et les nuages rougeâtres sont en profondeur (*schéma ci-dessus*). La sonde *Galileo* s'est enfoncée dans une région de ce type, nommée point chaud. Cette image couvre 34 000 kilomètres en longueur.



NASA Jet Propulsion Laboratory

DES ÉCLAIRS apparaissent sur ces images de la face nocturne de Jupiter. Le clair de lune de Io éclaire faiblement la couverture de nuages d'ammoniac. Les éclairs proviennent probablement de nuages d'eau situés une centaine de kilomètres plus bas. La foudre frappe à peu près au même rythme que sur Terre, mais les éclairs sont 1 000 fois plus brillants. Chaque image fait environ 60 000 kilomètres de côté.



Don Davis

Le module pénètre l'atmosphère
450 kilomètres, 10^{-7} bar, 0 minute

Le premier parachute s'ouvre
23 kilomètres, 0,4 bar, 2,86 minutes

Le module se sépare
du couvercle arrière
23 kilomètres, 0,4 bar, 2,88 minutes

Le bouclier thermoprotecteur tombe
21 kilomètres, 0,45 bar, 3,03 minutes

ALTITUDE DE RÉFÉRENCE : 0 kilomètre, 1 bar, 6,4 minutes

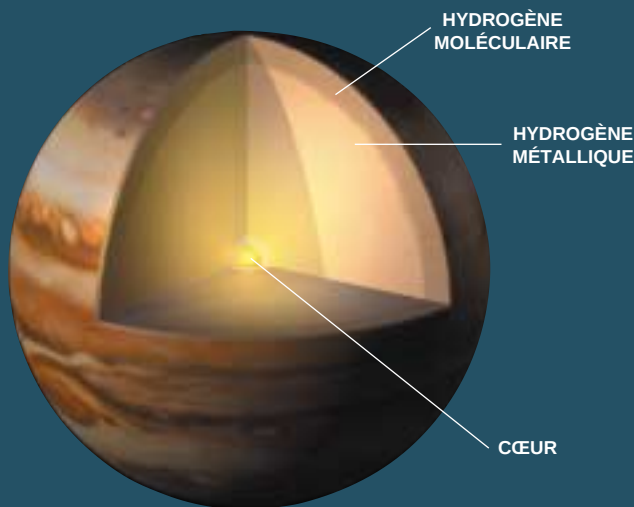
Les communications cessent
-146 kilomètres, 22 bars,
61,4 minutes

La structure de titane fond
-1 000 kilomètres, 2 000 bars,
9 heures

Don Dixon

COMPOSITION CHIMIQUE DE LA HAUTE ATMOSPHÈRE
(NOMBRE D'ATOMES PAR ATOME D'HYDROGÈNE)

ÉLÉMENT	FORME CHIMIQUE	JUPITER	SATURNE	SOLEIL
HÉLIUM	HÉLIUM	0,078	$0,070 \pm 0,015$	0,097
CARBONE	MÉTHANE	$1,0 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$3,6 \times 10^{-4}$
AZOTE	AMMONIAQUE	$4,0 \times 10^{-4}$	$3 \pm 1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$
OXYGÈNE	EAU	$3,0 \times 10^{-4}$	non mesuré	$8,5 \times 10^{-4}$
SOUFRE	SULFURE D'HYDROGÈNE	$4,0 \times 10^{-5}$	non mesuré	$1,6 \times 10^{-5}$
DEUTÉRIUM	DEUTÉRIUM	3×10^{-5}	3×10^{-5}	$3,0 \times 10^{-5}$
NÉON	NÉON	$1,1 \times 10^{-5}$	non mesuré	$1,1 \times 10^{-4}$
ARGON	ARGON	$7,5 \times 10^{-6}$	non mesuré	$3,0 \times 10^{-6}$
KRYPTON	KRYPTON	$2,5 \times 10^{-9}$	non mesuré	$9,2 \times 10^{-10}$
XÉNON	XÉNON	$1,1 \times 10^{-10}$	non mesuré	$4,4 \times 10^{-11}$



HYDROGÈNE
MOLÉCULAIRE

HYDROGÈNE
MÉTALLIQUE

CŒUR

Alfred T. Kamajian

JUPITER n'est pas véritablement une planète géante gazeuse. Sous une mince couche d'atmosphère, l'essentiel de la planète est constitué d'hydrogène à une pression telle qu'il est devenu liquide et conducteur, un peu comme du mercure. Au centre, l'hydrogène s'accumule autour d'un noyau rocheux.

Un courant descendant magistral

Selon les théories de formation planétaire, Jupiter et les autres planètes géantes se sont créés à partir de la nébuleuse solaire primordiale en deux étapes. Dans un premier temps, des «planétésimaux» formés de glaces (de grosses comètes qui s'étaient condensées à partir du nuage de gaz et de poussières primordial) s'agglomérèrent. Puis, quand la protoplanète est devenue suffisamment grosse, elle a attiré du gaz de la nébuleuse. Ainsi, Jupiter aurait une composition semblable à celle de la nébuleuse solaire primordiale. Par la suite, la planète a été façonnée par des mécanismes de différenciation interne et par l'apport de matériaux provenant des comètes qui ne cessent de la percuter. Le module de descente devait surtout chercher la contribution de ces divers mécanismes.

La découverte de la sonde qui pose le plus de problèmes est sans doute celle qui concerne les «espèces condensables», dont l'azote, le soufre, l'oxygène et le carbone. Depuis longtemps, les planétologues savent que Jupiter renferme environ trois fois plus de carbone (détecté sous la forme de méthane) que le Soleil. Les autres espèces (sous la forme d'ammoniac, de sulfures d'ammonium et d'eau) devaient se condenser en couches de nuages à des profondeurs variées. Les impuretés contenues dans les gouttelettes des nuages, peut-être du soufre ou du phosphore, donnent à chaque couche sa couleur. Le module était conçu pour descendre sous la couche nuageuse inférieure : on pensait qu'elle était composée d'eau, à une pression de cinq à dix atmosphères, située à environ 100 kilomètres sous les nuages supérieurs, composés d'ammoniac solidifié. On prévoyait d'observer du vent, des nuages et une chaleur humide.

Pourtant, à la profondeur prévue, les instruments n'ont observé aucun signe de nuages, juste quelques légères brumes à la pression de 1,6 atmosphère. L'eau et le soufre étaient peu abondants. Le détecteur d'éclairs (un système radio qui détecte les décharges d'électricité statique) n'a enregistré que de faibles décharges. Bref, le ciel était dégagé et sec. Pourquoi les prévisions étaient-elles erronées ? Les images infrarouges des télescopes terrestres apportèrent rapidement un élément de réponse. La sonde était fortuitement entrée dans une région atmosphérique

particulière, un «point chaud», où le ciel dégagé laisse passer le rayonnement infrarouge des niveaux inférieurs. Jupiter possède de nombreuses régions

de ce type, et leur emplacement change continuellement, de sorte qu'il était impossible de programmer la sonde pour qu'elle les vise ou les évite.

Le hasard de cette descente sur un point chaud ne dissipait pas entièrement le mystère. Les planétologues pensaient que, même dans ces régions

La force des éclairs

S'il est connu depuis les observations des sondes *Voyager* que l'atmosphère jovienne est le siège de nombreux orages, leur origine demeurait un mystère. L'interprétation récente d'images de Jupiter obtenues par *Galileo* a abouti à des résultats spectaculaires. En observant la face nocturne de Jupiter éclairée par le clair de lune de Io et en comparant, de nuit, les zones nuageuses éclairées par les orages aux mêmes zones, de jour, afin d'identifier les nuages environnants, les planétologues ont localisé précisément le lieu de ces phénomènes électriques.

Cet éclairage indirect a permis de repérer quels nuages étaient à l'origine des éclairs. En analysant ces images, les planétologues américains Andrew Ingersoll et Peter Gierasch ont montré que ces nuages étaient associés à des

tourbillons atmosphériques. Ces nuages d'orage, situés à des profondeurs de trois atmosphères, sont bien des nuages de gouttelettes d'eau analogues aux nuages tropicaux terrestres. Lorsque l'on comptabilise l'énergie résultant de la convection dans ces nuages, on constate qu'elle est suffisante pour entretenir les mouvements tourbillonnaires de l'atmosphère qui alimentent les vastes courants zonaux et les grands systèmes anticycloniques, telle la grande tache rouge.

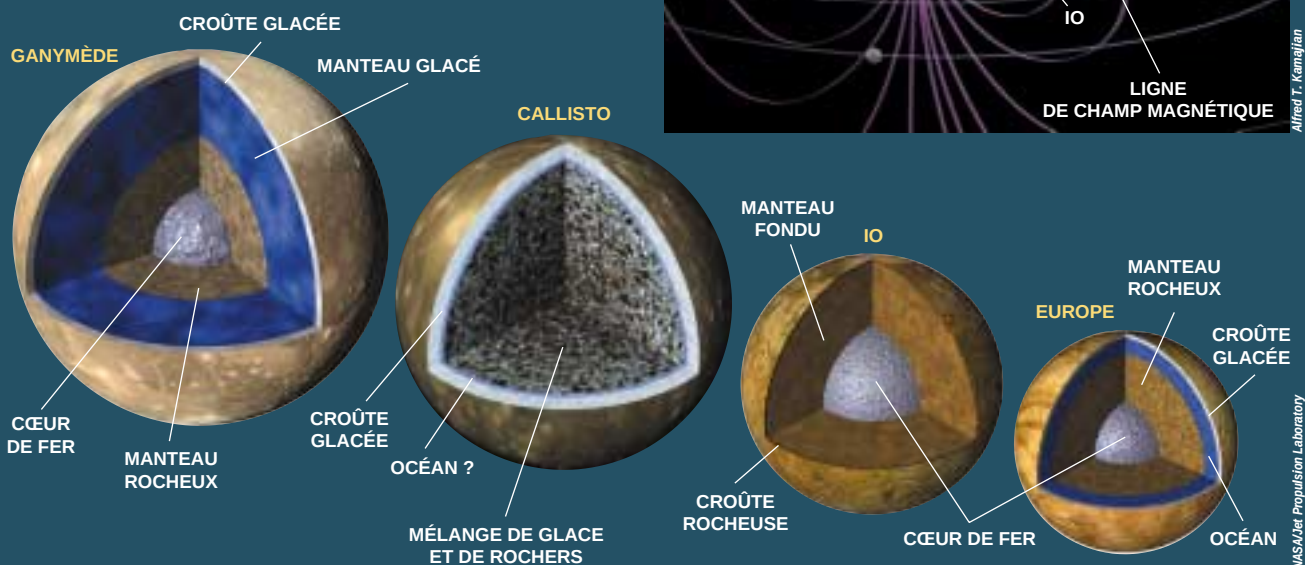
Le lien entre les nuages d'eau générateurs d'éclairs et la dynamique des tourbillons aidera à élucider les mécanismes responsables de la météorologie globale de Jupiter, encore fort mystérieux.

Pierre DROSSART, Observatoire de Meudon

Structure interne et champ magnétique des satellites galiléens

Les quatre satellites de Jupiter ne méritent pas vraiment d'être rabaissés au rang de simples «lunes», car, à de nombreux égards, ce sont de véritables planètes. Les deux objets les plus proches de Jupiter, Io et Europe, ont à peu près la même taille et la même densité que notre Lune. Les deux plus éloignées, Ganymède et Callisto, sont à peu près de la taille de Mercure, mais bien moins denses. La sonde *Galileo* n'a pas atterri sur ces astres, mais les astronomes déduisent leur structure interne à partir de mesures des forces gravitationnelles et des champs magnétiques. Parmi ces quatre objets, seule Callisto ne semble pas s'être différenciée en couches distinctes de métal, de roche et d'eau gelée. Les champs électromagnétiques de Jupiter interagissent avec les quatre satellites, mais plus particulièrement avec Io (*schéma de droite*). Les champs piègent et ionisent

du sodium provenant des éruptions volcaniques de Io, créant un tore de plasma. Un tube de flux reliant Jupiter à Io transporte un courant électrique dont l'intensité atteint cinq millions d'ampères (*la planète et les satellites ne sont pas à l'échelle*).

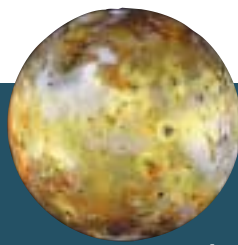


spécifiques et à la profondeur atteinte par la sonde, la composition des gaz serait analogue à celle de l'ensemble de l'atmosphère. Or, celle-ci ne semblait pas être telle que d'autres mesures l'indiquaient. Jupiter contenait-elle vraiment aussi peu d'oxygène et de soufre que le module le mesurait? Personne n'a pu expliquer comment ces éléments ont été éliminés si efficacement.

La composition des points chauds différerait-elle alors considérablement de celle du reste de l'atmosphère? Par exemple, un fort courant descendant de gaz froid et sec, en provenance de l'atmosphère supérieure, engendrerait-il la modification atmosphérique observée? Cette théorie comporte des difficultés, mais elle est aujourd'hui la plus plausible. En effet, juste avant que le module ne cesse d'émettre, les concentrations en eau, en ammoniac et en sulfure d'hydrogène augmentaient rapidement, comme si la sonde approchait la base d'un courant descendant. Les images d'un autre point chaud important, fournies par l'orbiteur, montrent que les vents convergent vers le centre du point chaud à partir de toutes les directions (voir l'illustration de la page 66). Le gaz ne peut aller que vers le bas. En outre, les spectres obtenus ont montré que les quantités d'eau et d'ammoniac varient d'un facteur 100 entre les différents points chauds, ce qui corrobore l'idée selon laquelle les conditions météorologiques locales déterminent la composition détaillée de l'atmosphère.

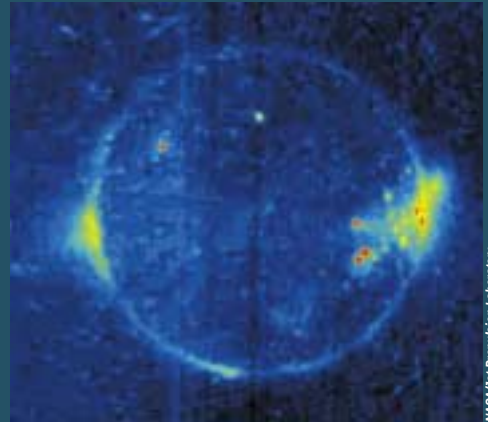
De la pluie sur toutes les planètes

Les prévisions étaient justes sur un point : le vent. Les bandes de nuages de Jupiter sont associées à des courants rapides, des vents d'Est et des vents d'Ouest soufflant à plusieurs centaines de kilomètres par heure. Sur la Terre, les vents analogues faiblissent près de la surface. Cependant, Jupiter n'a pas de surface, puisque c'est une planète formée de gaz. De ce fait, si une source d'énergie interne (comme l'énergie libérée par la contraction gravitationnelle) dominait, les vents devraient rester forts, voire s'accroître en profondeur. Inversement, si l'énergie était apportée principalement par une source externe (comme la lumière solaire), le contraire se produirait : comme sur la Terre, les vents faibliraient avec la profondeur. En descendant, le module atmosphérique observa que les vents

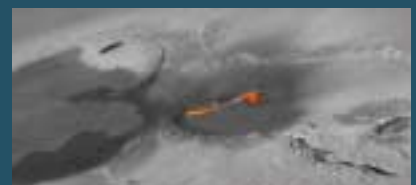
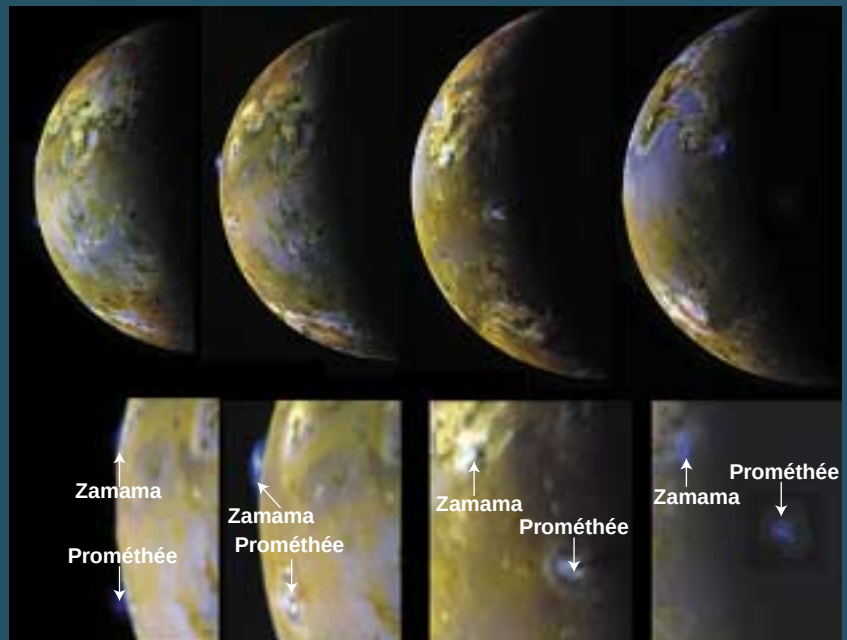


Io, le satellite infernal

La belle couleur rouge orangé qui caractérisait Io sur les images données par la sonde *Voyager*, il y a 20 ans, n'apparaît pas sur ces images en fausses couleurs obtenues par *Galileo*. Elles n'en sont pas moins spectaculaires. Lorsque le satellite se trouve dans l'ombre de Jupiter (*en haut*), les écoulements de lave sont visibles sous la forme de petites taches rouges et jaunes. Les panaches volcaniques apparaissent comme des lueurs sur le pourtour ; le panache de gauche s'échappe du volcan Prométhée. Une séquence de quatre images en couleurs renforcées (*au milieu*) montre les volcans Prométhée et Zamama : on voit d'abord apparaître des panaches, puis les volcans eux-mêmes, entourés d'anneaux de débris de plus de 100 kilomètres de diamètre. En novembre 1999, la sonde *Galileo* a obtenu des images du volcan Pelé dans le visible (*en bas à gauche*) et en infrarouge (*en bas à droite*). Au centre de cette dernière image se trouve un point rouge sombre : le rougeolement de la lave au cœur du volcan.

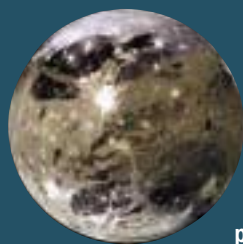


NASA/Jet Propulsion Laboratory



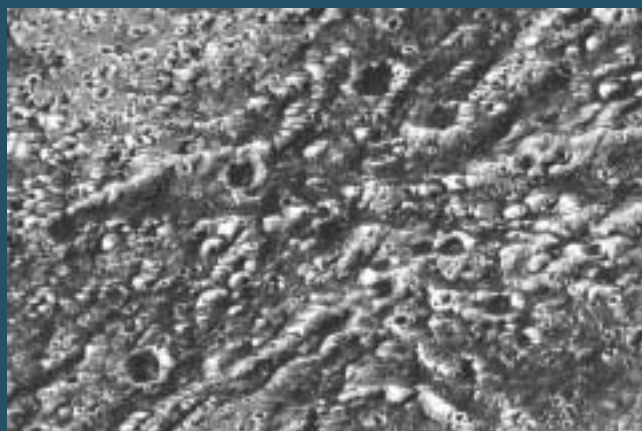
NASA/Jet Propulsion Laboratory

Ganymède, mélange glacé

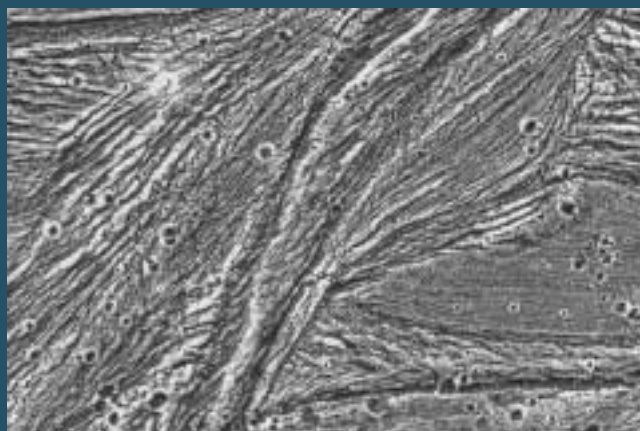


Le plus gros satellite du Système solaire est un étrange mélange de terrains sombres ou clairs. Les régions sombres, comme *Galileo Regio* (première image), comportent de nombreux cratères. Les sillons profonds pourraient contenir des pous-

sières laissées par la sublimation de la glace. Les régions claires, comme *Uruk Sulcus* (deuxième image), présentent moins de cratères, et davantage de caractéristiques tectoniques, tels des sillons. Cette image couvre environ 400 kilomètres de côté. Certaines régions, comme *Tiamat Sulcus* (troisième image), ici juste après le lever du Soleil, contiennent les deux types de terrain.



NASA/Jet Propulsion Laboratory



NASA/Jet Propulsion Laboratory

s'intensifiaient d'abord rapidement, puis se stabilisaient : l'atmosphère de Jupiter est régie par des sources d'énergie internes.

Bien que le module de descente n'ait détecté que peu de signes d'orages, l'orbiteur a vu les nuages illuminés par des éclairs brillants (voir l'illustration de la page 66). Comme *Voyager* l'avait fait avant elle, *Galileo* a observé que les éclairs étaient circonscrits à des latitudes précises. Ces zones sont des régions de cisaillement anticyclonique : les vents Est-Ouest y changent de vitesse de façon brusque du Nord au Sud. Ces changements d'intensité créent des conditions turbulentes et orageuses. Comme sur la Terre, des éclairs naissent dans des nuages où des grains de glace partiellement fondus s'élèvent et retombent dans la turbulence, ce qui sépare des charges positives et négatives. On estime la profondeur à laquelle l'éclair se produit d'après la taille de la tache illuminée sur les nuages : plus la tache est grande, plus la décharge est profonde. Les mesures de la sonde ont montré que les éclairs émanent des couches de l'atmosphère où sont censés se former des nuages d'eau. L'importance de ces phénomènes orageux confirme que toutes les régions de l'atmosphère ne sont pas aussi sèches que le site traversé par la sonde atmosphérique.

Le module a cessé d'émettre après avoir parcouru 0,1 pour cent de la dis-

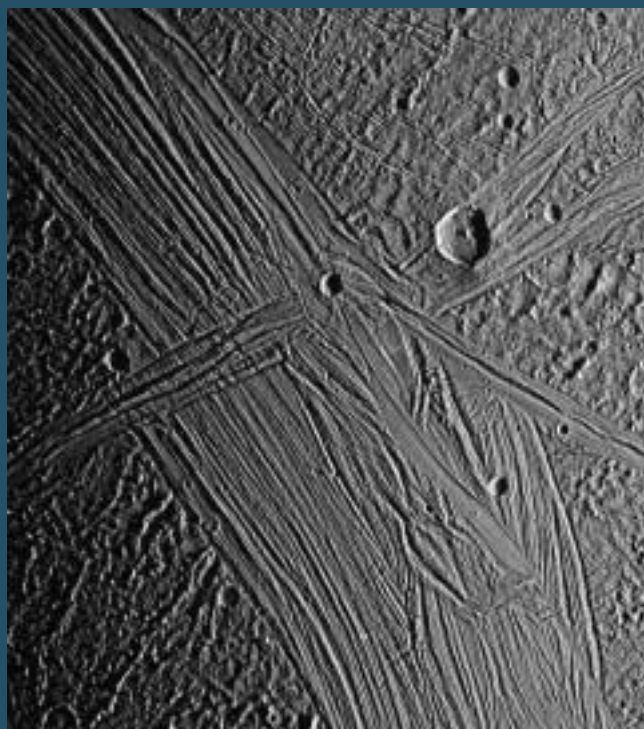
tance au centre : les fortes pressions et la température élevée l'ont ensuite détruit. Cependant, grâce à certaines de ses mesures, les astronomes entrevoient les profondeurs de l'atmosphère. Les concentrations en gaz rares – hélium (l'élément le plus abondant dans Jupiter après l'hydrogène), néon, argon, krypton et xénon – sont particulièrement instructives. Ces gaz ne réagissant pas chimiquement avec les autres éléments, ils indiquent les conditions physiques au sein de la planète. Notamment, la concentration en hélium est si révélatrice qu'un instrument de *Galileo* était consacré à sa mesure.

Les spectres infrarouges obtenus par *Voyager* indiquaient que l'atmosphère de Jupiter contenait proportionnellement beaucoup moins d'hélium que le Soleil. Les astronomes se perdaient en conjectures sur les mécanismes qui avaient vidé la haute atmosphère de cet élément. Toutefois, les mesures de *Galileo* ont montré que Jupiter renferme à peu près la même concentration en hélium que les couches externes du Soleil (voir l'illustration de la page 67). Ce nouveau résultat allège la difficulté, mais ne la résout pas complètement, car les couches externes du Soleil ont elles-mêmes perdu de l'hélium. Un mécanisme a dû appauvrir les couches externes de Jupiter en hélium, mais ce mécanisme a vraisemblablement démarré plus tard,

dans l'histoire de la planète, qu'on ne le supposait. Par ailleurs, les instruments de la sonde *Galileo* ont mesuré sur Jupiter une concentration en néon égale au dixième de la valeur solaire.

Ces deux résultats corroborent l'hypothèse, autrefois controversée, selon laquelle les profondeurs de Jupiter subissent un déluge d'hélium. Là, la pression est si considérable (des millions de fois la pression au niveau de la mer, sur la Terre) que l'hélium ne se mélange plus à l'atmosphère riche en hydrogène. L'hélium formerait alors un océan qui occuperait le centre de la planète. Dans certaines conditions, le néon se dissout dans les gouttes de pluie d'hélium. Selon les résultats de *Voyager*, l'hélium précipiterait de la même façon sur Saturne.

En revanche, après plusieurs années d'analyses, les planétologues ont récemment annoncé que Jupiter renferme les autres gaz rares en abondance. La planète gazeuse est plus riche que le Soleil en argon, en krypton et en xénon ; cet enrichissement est analogue à celui en carbone et en soufre. Pourquoi tant de gaz rares ? Le seul moyen de piéger de telles quantités de ces gaz rares serait par « congélation », ce qui n'est pas possible à la distance par rapport au Soleil à laquelle se trouve actuellement Jupiter. Par conséquent, une bonne partie des matériaux dont est constituée la planète proviendrait de régions plus froides et plus éloignées. Jupiter pourrait s'être



NASA Jet Propulsion Laboratory



Ron Davis

formée plus loin que son orbite actuelle et s'être ensuite rapprochée du Soleil (voir *La migration des planètes*, de Renu Malhotra, *Pour la Science*, octobre 1999).

La mesure de la concentration en deutérium (l'un des isotopes de l'hydrogène, dont le noyau est composé d'un proton et d'un neutron) complète l'histoire de Jupiter. Sa concentration est sensiblement égale à celle que l'on mesure dans le Soleil, et bien différente de celle des comètes ou des océans terrestres. Ainsi, malgré les spectaculaires collisions de comètes dans l'atmosphère de Jupiter, telle celle de Shoemaker-Levy 9, en 1994, les comètes modifieraient peu la composition de l'atmosphère jovienne en deutérium.

Un monde de feu

Après avoir transmis les données du module de descente, l'orbiteur a entamé sa visite du système jovien. Aujourd'hui, il a effectué une trentaine d'orbites autour de la planète, avec plusieurs survols de chacun des quatre satellites galiléens. Europe a tenu la vedette, en raison de sa géologie de surface et d'autres caractéristiques qui semblent indiquer l'existence d'un océan sous sa glace de surface. Les autres satellites n'ont pas été négligés pour autant.

Le satellite galiléen le plus proche de Jupiter, Io, avait été l'attraction principale lors des deux rencontres avec les

sondes *Voyager*. Les images initiales montraient une surface qui semblait remarquablement jeune, parce qu'elle était la seule du Système solaire qui soit quasi dépourvue de cratères d'impacts. Puis des clichés ont montré d'immenses panaches dus à des éruptions. Des observations ultérieures ont confirmé que Io est déchirée par une activité volcanique intense. De même taille que la Lune, le satellite émet 100 fois plus de laves que la Terre.

La sonde *Galileo* a moins observé Io que les autres satellites, en grande partie en raison des radiations qui pourraient endommager la sonde : Io se trouve à l'intérieur des ceintures de rayonnement intense de Jupiter. La sonde est passée à 900 kilomètres de la surface de Io juste avant de se mettre en orbite autour de Jupiter, en 1995, mais elle n'a revisité le satellite qu'en octobre 1999, une fois l'essentiel de la mission accompli et les scientifiques prêts à prendre plus de risques.

Lors du premier passage, une panne momentanée du système de stockage de données (blocage du dérouleur de bande magnétique) avait contraint les scientifiques à bloquer les systèmes d'imagerie et de spectroscopie, mais le détecteur de particules et le magnétomètre étaient restés actifs. Ces instruments ont montré que l'«espace vide» autour de Io regorge de particules et de gaz crachés par les éruptions volcaniques et aspirés

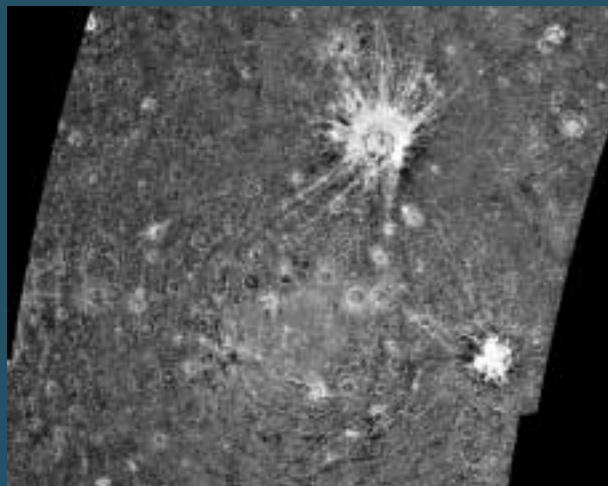
par le champ magnétique de Jupiter. Des faisceaux d'électrons suivent les lignes de champ qui relient Io à l'atmosphère de Jupiter ; des plasmas denses et froids s'infiltreraient dans le sillage laissé derrière Io par le balayage des champs magnétiques. À chaque passage de Io dans l'ombre de Jupiter, *Galileo* a vu, dans l'atmosphère de Jupiter, un anneau de gaz rougeoyant formé par le choc des électrons accélérés contre les molécules de l'atmosphère jovienne. Autrement dit, Io est étroitement liée à la planète géante par le plus vaste circuit électrique du Système solaire (voir l'illustration de la page 68).

Pendant l'essentiel de sa mission, *Galileo* a étudié la surface ravagée de Io à bonne distance. À partir de la luminosité des volcans à différentes longueurs d'onde, dans le domaine visible et dans le proche infrarouge, les planétologues ont estimé leur température, afin de déterminer la composition des laves. La plupart des volcans terrestres déversent une lave de composition basaltique (des silicates de fer, de magnésium et de calcium, comme l'olivine et le pyroxène) ; les coulées basaltiques ont des températures comprises entre 1 300 et 1 450 kelvins (1 027 à 1 177 °C). Les premières mesures de température de Io, obtenues à l'aide de télescopes au sol, il y a plusieurs années, indiquaient des valeurs comprises entre 1 500 et 1 800 kelvins. Ces analyses éliminaient l'hypothèse que les laves

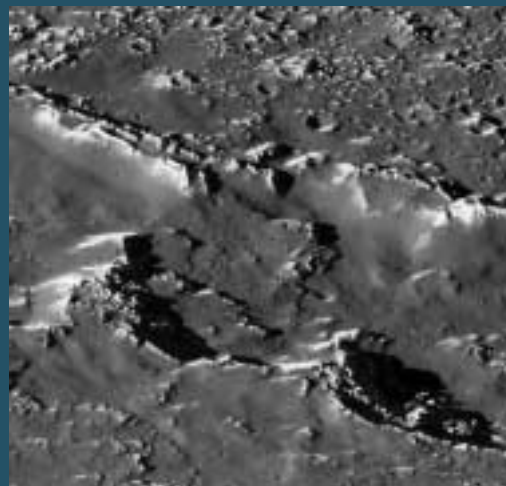


Une surface cratérisée : Callisto

Callisto est le plus déroutant des satellites galiléens. Sa surface est criblée de grands cratères, comme le *Valhalla*, énorme structure d'impact à plusieurs anneaux (à gauche). Pourtant, le satellite est relativement dénué de petits cratères, et ceux-ci ont des contours flous (image de droite), ce qui suggère une surface balayée par des poussières.



NASA Jet Propulsion Laboratory



NASA Jet Propulsion Laboratory

de Io soient composées de substances qui sont gazeuses à ces températures, comme le soufre, qui avait été pressenti jusque-là comme le fluide volcanique dominant sur Io.

Les mesures de *Galileo* ont renforcé l'énigme : les laves de Io ont des températures comprises entre 1 700 et 2 000 kelvins. La Terre n'a plus connu de magma à une telle température depuis trois milliards d'années. Aussi Io montre-t-elle peut-être comment était la Terre dans sa jeunesse, quand ses températures internes étaient supérieures et que la composition de son manteau différait de celle d'aujourd'hui.

Lorsque l'orbiteur est finalement retourné à proximité de Io, à l'automne 1999, les ingénieurs doutaient que l'engin survivrait au rayonnement. Lors de l'un de ses passages, il interrompit de son propre chef la séquence d'enregistrement de données quatre heures seulement avant d'atteindre Io, et l'équipe scientifique réinitialisa en catastrophe. Quelques instruments furent endommagés, mais tous continuèrent à fonctionner. Les volcans actifs de Io étaient enfin examinés de près (voir l'illustration de la page 69).

Un champ bien à elle

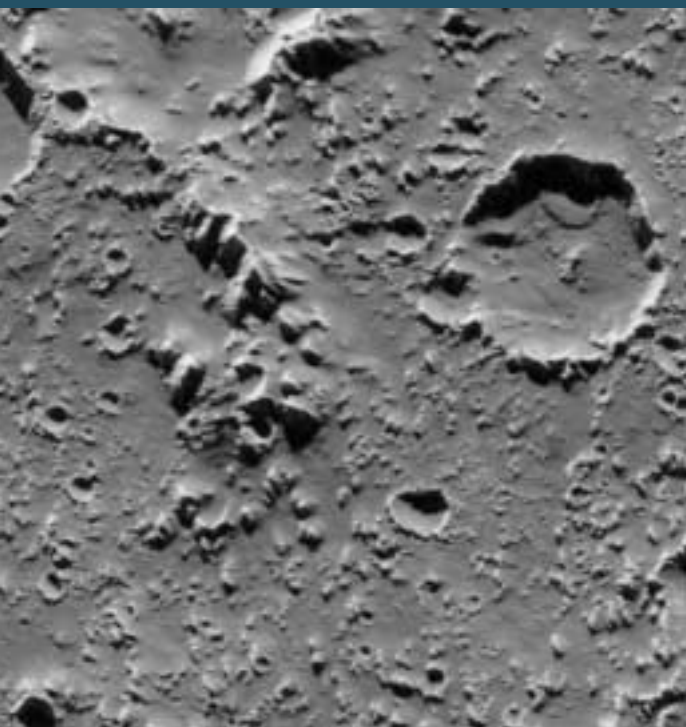
L'une des principales découvertes de *Galileo* a été faite lors de sa première rencontre orbitale avec Ganymède, le

plus gros satellite de Jupiter. Environ une demi-heure avant que la sonde ne s'approche au plus près de Ganymède, l'instrument qui enregistre les champs électriques ambiants commença à s'affoler. Au calme fond d'émission radio qui était observé presque partout dans le système jovien succédait une émission radio complexe et active. Pendant 45 minutes, l'activité resta intense, puis elle cessa aussi brusquement qu'elle avait commencé. Simultanément, le magnétomètre avait enregistré des signaux plus intenses.

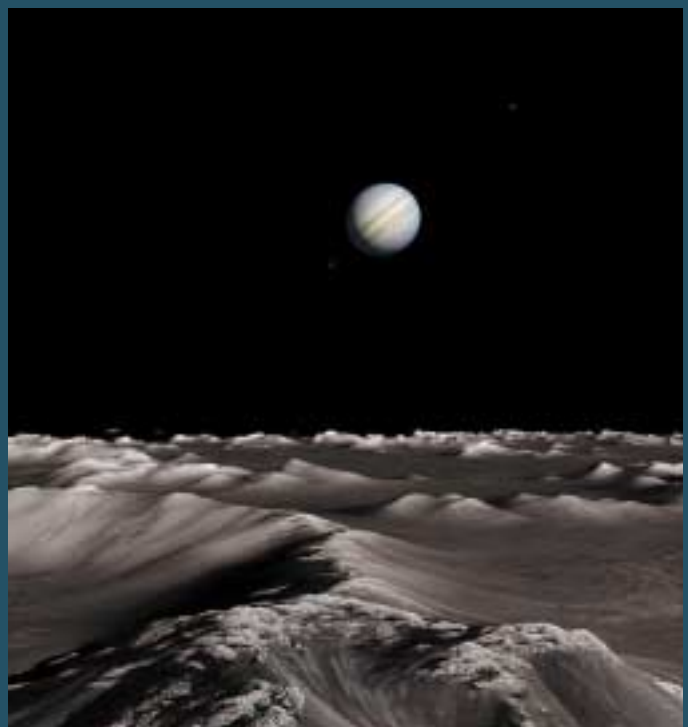
Les physiciens des plasmas avaient déjà observé de pareils signaux lorsque les vaisseaux spatiaux entraient et sortaient des magnétosphères de la Terre, de Jupiter, de Saturne, d'Uranus et de Neptune. Deux survols ultérieurs de Ganymède ont confirmé leurs soupçons : ce satellite engendre un champ magnétique dipolaire semblable à ceux des planètes précitées. Aucun autre satellite ne possède un tel champ. Mars ou la Lune ont peut-être possédé naguère un champ magnétique, mais, aujourd'hui, leur champ magnétique est très faible : il ne semble dû qu'à l'aimantation de roches de surface. Au total, le Système solaire serait une poupée gigogne magnétique : Ganymède a une magnétosphère qui est contenue dans la gigantesque magnétosphère de Jupiter, qui est elle-même contenue dans celle du Soleil (voir l'illustration de la page 70).

En stockant en continu les signaux de la sonde, les planétologues ont exploré le champ gravitationnel de Ganymède et, donc, sa structure interne : le satellite possède probablement un noyau dense d'un rayon de 1 500 kilomètres environ, entouré d'un manteau de glace d'une épaisseur de 900 kilomètres et d'une croûte de 200 kilomètres. Les modèles géochimiques indiquent que ce noyau est une sphère constituée de fer ou de sulfure de fer, entourée de roches. Ce noyau interne métallique semble engendrer le champ dipolaire, mais comment ?

L'analogie classique entre les champs magnétiques planétaires et ceux qui émanent de barreaux aimantés est trompeuse : du fer solide au centre d'une planète ou d'un gros satellite serait trop chaud pour conserver un champ magnétique permanent. La génération d'un champ magnétique résulte plutôt des mouvements d'un liquide conducteur, ce que les physiciens nomment l'effet dynamo. Les modélisations de Ganymède montrent que son intérieur peut être assez chaud pour que le fer ou le sulfure de fer de son intérieur soit fondu. Les mêmes modèles montrent que la convection, c'est-à-dire les mouvements verticaux analogues à ceux de l'eau dans une casserole d'eau bouillante, cesse avec le refroidissement progressif du noyau : sans source de chauffage externe, la



NASA Jet Propulsion Laboratory



Pat Davis

convection aurait dû cesser il y a plus de trois milliards d'années, et le champ magnétique devrait être éteint.

L'activité de Ganymède est-elle due aux «résonances» orbitales entre les trois satellites galiléens internes? Io fait précisément quatre fois le tour de Jupiter quand Europe effectue deux révolutions, et Ganymède une. De même qu'une balançoire a des mouvements plus amples lorsque les poussées s'exercent en phase avec son oscillation naturelle, la résonance engendrerait de grands effets à partir de petites forces. Les orbites des satellites, notamment, seraient allongées. La distance qui sépare les satellites et Jupiter changeant continuellement, l'influence de la gravité de Jupiter croît et décroît, de sorte que les marées solides sur ces objets seraient notables. Ce mécanisme de chauffage par effet de marées expliquerait l'intensité du volcanisme sur Io et empêcherait l'océan d'Europe de prendre en glace.

On pensait naguère que ce mécanisme chauffait peu Ganymède, le plus extérieur de ces trois satellites, mais on admet aujourd'hui que les orbites ont pu varier : par le passé, l'effet des résonances était peut-être plus fort, et l'orbite de Ganymède plus perturbée. Les immenses failles qui parcourent sa surface seraient la trace de cette période révolue de chauffage intense. Dans cette hypothèse, Ganymède se refroidirait

encore, et son noyau liquide, soumis à des courants de convection, produirait encore un champ magnétique.

Vieux, mais pas terne

Comparé aux éblouissantes Europe, Io et Ganymède, le satellite galiléen le plus extérieur, Callisto, avait toujours semblé assez ennuyeux. Les images que nous en avait données *Voyager* correspondaient exactement au stéréotype du satellite de glace : une vieille boule de boue gelée et grêlée. Toutefois, les observations de *Galileo* nous dévoilent une histoire fort mouvementée.

Callisto est couverte de marques d'impacts de tailles variées : certains cratères ont quelques kilomètres de large, tandis que le «palimpseste Valhalla» a un diamètre qui atteint 1 500 kilomètres. Sa surface date du déluge de météorites et de comètes qui a suivi la formation des planètes et de leurs satellites, il y a plus de quatre milliards d'années. En ce sens, Callisto a un terrain très ancien. En l'examinant de plus près, on s'aperçoit que Callisto est recouvert de débris sombres, très fins. Les petits cratères, abondants sur la plupart des autres corps célestes, sont quasi absents de la surface du satellite. Les reliefs semblent atténués par l'érosion. Quels mécanismes plus récents ont-ils remodelé la surface? Une lévitation électrostatique de la poussière fine l'a-t-elle fait s'écouler sur la

surface? Ou bien l'évaporation de glaces de surface a-t-elle laissé des dépôts de matériaux plus sombres et moins volatils? Aucune explication n'est encore complètement satisfaisante.

Curieusement, les spectres en proche infrarouge révèlent, en plus de la glace d'eau et des minéraux hydratés attendus, quatre motifs d'absorption inhabituels, à une longueur d'onde voisine de quatre micromètres. Le premier proviendrait de dioxyde de carbone piégé dans la surface. Deux autres motifs spectraux correspondent vraisemblablement à du soufre qui proviendrait des éruptions volcaniques de Io. Le quatrième système de raies spectrales est le plus étrange. Sa longueur d'onde correspond à des liaisons chimiques entre un atome de carbone et un atome d'azote. On retrouve ces caractéristiques spectroscopiques avec des molécules organiques complexes qui ont été nommées «tholins» par Carl Sagan et qui ressemblent aux constituants organiques de la nébuleuse solaire (les nuages de grains de glaces interstellaires ont des spectres comparables). L'ensemble de ces données fournit la première preuve directe que les satellites de glaces contiennent les composés à base de carbone, d'azote et de soufre que l'on trouve habituellement dans les comètes et dans les météorites primitives. Ces matériaux ont peut-être contribué au développement de la vie sur la Terre.

La structure interne de Callisto est aussi paradoxale que sa surface : le grand âge et la jeunesse s'y côtoient. Contrairement aux autres satellites galiléens, sa densité semble relativement homogène, signe que la majeure partie des glaces et des roches qui le constituent sont mélangées : le satellite n'a pas de noyau. Selon cette hypothèse, l'intérieur de Callisto n'a jamais été chauffé beaucoup, ni par des désintégrations radioactives ni par des marées solides. À l'inverse des autres satellites galiléens, ce satellite ne subit les effets d'aucune résonance orbitale.

Pourtant Callisto est loin d'être un corps inerte. Le magnétomètre de *Galileo* a détecté que le satellite perturbe le champ magnétique jovien d'une façon très particulière. Cette perturbation, différente de celle de Ganymède, s'apparente à ce que l'on observe dans les expériences de physique lorsque l'on soumet une sphère de cuivre creuse à un champ magnétique variable : ces champs provoquent la circulation de courants électriques dans l'enveloppe conductrice de la sphère, ce qui engendre ensuite un champ magnétique exactement opposé au champ imposé. Le champ magnétique de Callisto serait induit d'une manière analogue.

Quelle serait la composition de la couche conductrice d'électricité ? Les roches, la glace et les particules ionosphériques sont de mauvais conducteurs. Reste une possibilité qui aurait semblé farfelue il y a peu : un océan d'eau salée couvrirait la surface du satellite. On a calculé qu'une couche d'eau de mer d'une épaisseur de quelques dizaines de kilomètres expliquerait les mesures magnétiques. Cette coexistence d'un intérieur relativement indifférencié et d'un océan de surface intrigue les théoriciens. Callisto doit être assez chaude pour abriter un océan, mais pas trop chaude, sans quoi les matériaux lourds et légers se dissocieraient.

La couche aqueuse pourrait se trouver en sandwich entre un intérieur chauffé par la radioactivité, où les maté-

riaux resteraient mélangés par convection, et un mince manteau de glace, où un cycle de convection différent refroidirait l'océan.

Bien que la mission *Galileo* se soit concentrée sur l'étude des satellites galiléens, l'orbiteur n'a pas négligé les membres moins importants de la famille jovienne. Ses capteurs ont enregistré des images des quatre petits satellites intérieurs : Métis, Adrasteé, Amalthée et Thébé, par ordre de distances croissantes à Jupiter. D'après les images, ces petits satellites sont directement responsables des anneaux de Jupiter. Une série de photographies, prises alors que la sonde se trouvait dans l'ombre de Jupiter, a montré les minuscules particules de poussières de ces anneaux éclairées par la lumière solaire arrière. Ces images montrent les anneaux principaux et l'anneau ténu et filamenteux déjà observés par *Voyager* en 1979. Elles révèlent aussi la structure complexe de l'anneau filamenteux. Il est constitué de nombreuses couches directement reliées aux orbites de Thébé et d'Amalthée. Ainsi, les anneaux sont probablement constitués de débris microscopiques expulsés de ces satellites par les impacts de minuscules météorites.

Les données recueillies par *Galileo* ont radicalement modifié la vision que l'on avait du système jovien. Le système semblait simple ; on sait maintenant qu'il a une complexité comparable à celle du Système solaire tout entier. Avec les survols de *Voyager*, on avait connu l'excitation du premier regard sur un monde inconnu, mais seule l'étude détaillée faite par *Galileo* pouvait en faire découvrir toutes les nuances, et montrer les limites des catégories simplistes comme les «nuages porteurs d'orages» et les «satellites de glace». Bientôt, nous découvrirons le système de Saturne : une autre sonde, *Cassini-Huygens*, l'atteindra en 2004. Là encore, les planétologues s'attendent à obtenir quelques réponses, et beaucoup de questions...

Torrence JOHNSON travaille au Laboratoire pour la propulsion spatiale à Pasadena, en Californie.

Thérèse ENCRENAZ, *Les planètes géantes*, Belin, 1996.

Galileo Orbiter, section spéciale de *Science*, vol. 274, pp. 377-413, 18 octobre 1996.

Remote Sensing of the Galileo Orbiter

Mission, numéro spécial d'*Icarus*, vol. 135, n° 1, septembre 1998.

André BRAHIC, *Enfants du Soleil*, Odile Jacob, 1999.

The New Solar System, quatrième édition, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Peterson et Andrew Chai-kin, Sky Publishing, 1999.
