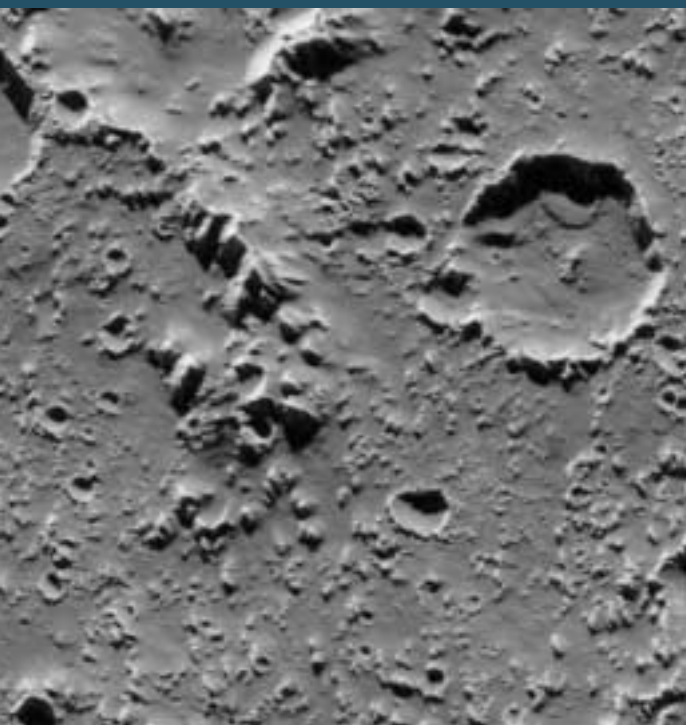
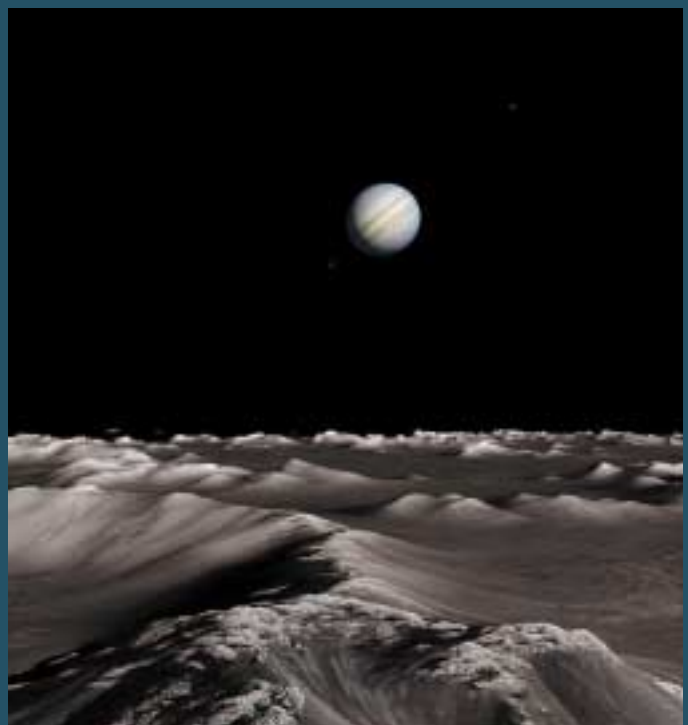




NASA Jet Propulsion Laboratory



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.