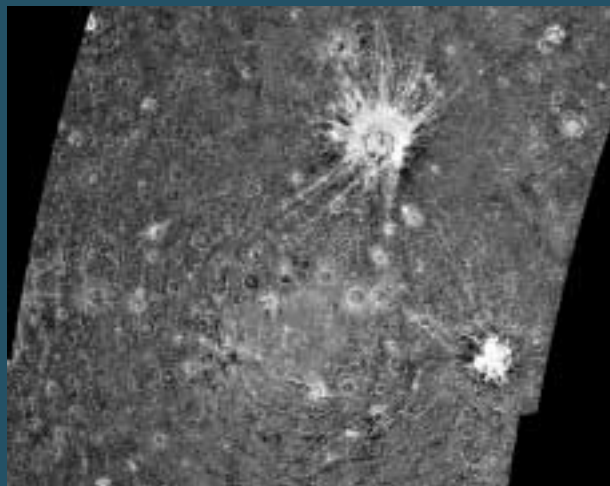


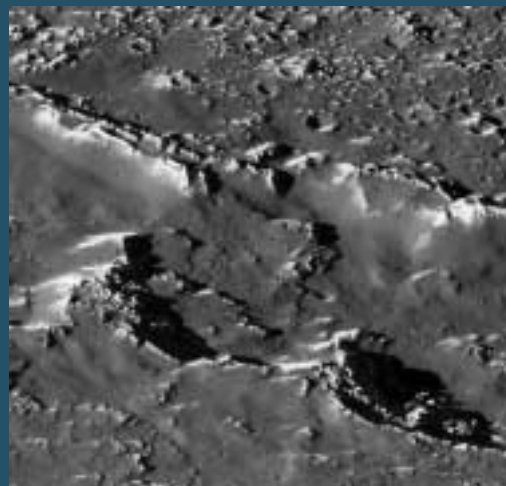


Une surface cratérisée : Callisto

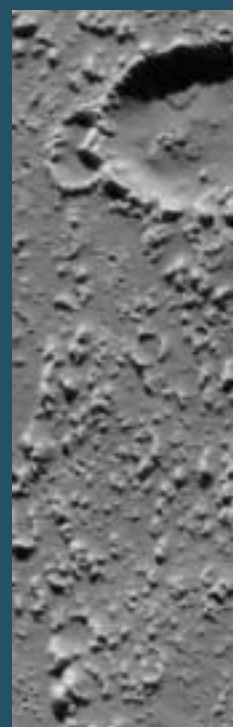
Callisto est le plus déroutant des satellites galiléens. Sa surface est criblée de grands cratères, comme le *Valhalla*, énorme structure d'impact à plusieurs anneaux (à gauche). Pourtant, le satellite est relativement dénué de petits cratères, et ceux-ci ont des contours flous (image de droite), ce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

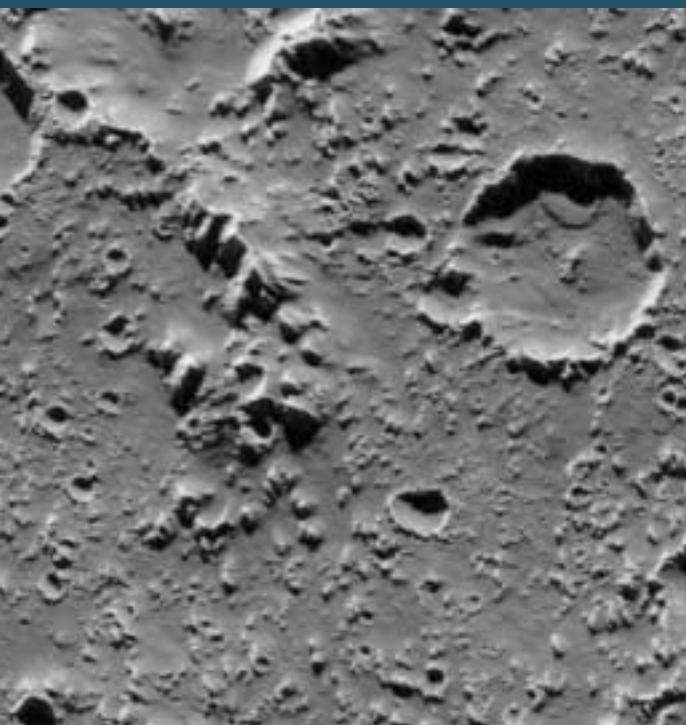
L'une des principales découvertes de *Galileo* a été faite lors de sa première rencontre orbitale avec Ganymède, le

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.

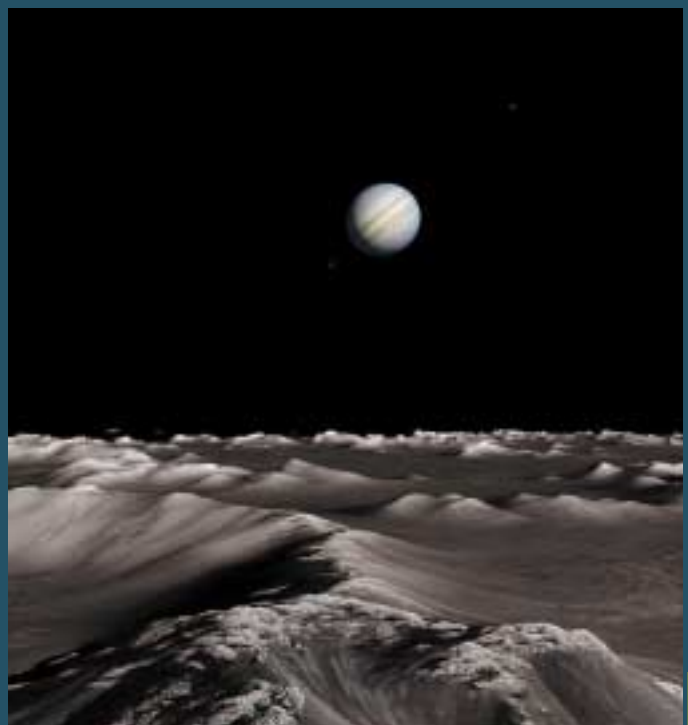
Les physiciens des plasmas avaient déjà observé de pareils signaux lorsque les vaisseaux spatiaux entraient et sortaient des magnétosphères de la Terre, de Jupiter, de Saturne, d'Uranus et de Neptune. Deux survols ultérieurs de Ganymède ont confirmé leurs soupçons : ce satellite engendre un champ magnétique 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/JPL Propulsion Laboratory



Ken 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.