

Chapitre 5
Des satellites glacés
aux comètes

À la découverte des objets glacés

À côté du Soleil, de la Lune et des cinq premières planètes, les comètes sont les seuls petits objets du système solaire observés depuis la haute Antiquité. Leur extraordinaire spectacle a captivé l'attention et multiplié les interprétations, les faisant annonciatrices de présages néfastes ou heureux suivant les croyances. La nature et l'origine de ces astres sont restées longtemps mystérieuses du fait de leurs apparitions apparemment imprévisibles, de leurs déplacements inhabituels dans le ciel et de leurs aspects changeants. Elles n'ont commencé à s'éclaircir qu'au milieu du XX^e siècle lorsque Fred Whipple émis l'hypothèse qu'une comète était un corps de taille kilométrique constitué essentiellement de glaces et de roches.

Malgré l'observation de satellites autour des planètes depuis 1610, il fallut attendre 1957 pour que la glace d'eau soit détectée directement et pour la première fois à la surface de deux objets du système solaire : les satellites Galiléens Europa et Ganymède. Le développement des grands télescopes, suivi des missions d'exploration planétaires, permit ensuite de découvrir progressivement des objets de plus en plus petits et lointains, d'en déterminer les orbites, puis la couleur, avant d'être capable d'identifier les glaces et autres matériaux présents à leur surface. Une nouvelle catégorie d'objets du système solaire, appelée « objets glacés », en opposition aux « objets rocheux » et « objets gazeux », était née. À la fin des années 1980, elle

comprenait essentiellement les noyaux cométaires, les satellites des planètes géantes et Pluton.

Par la suite, d'autres familles d'objets supposés glacés ont été détectées aux environs de Jupiter et jusqu'aux confins du système solaire suscitant une recherche active pour en déterminer la composition et l'origine.

L'avènement des missions d'exploration spatiale a permis d'obtenir des observations rapprochées de certains de ces objets glacés, en particulier les satellites des planètes géantes grâce aux missions Pioneer-10 et 11 (NASA, 1973, 1974), Voyager 1 et 2 (NASA, 1979-1989), Galileo (NASA, 1997-2001) et Cassini (ESA - NASA, 2004). Elles ont révélé l'étonnante variété de la géologie de leurs surfaces, même pour les plus petits d'entre eux que l'on considérait jusqu'alors comme de gros cailloux gelés, criblés de cratères, gris et ennuyeux... Cette nouvelle vision a révolutionné les théories sur l'origine et l'évolution des satellites et a permis de prendre conscience de la très grande diversité des processus à l'œuvre sur ces objets : cratérisation et fracture de leur surface par des impacteurs de diverses tailles, collisions catastrophiques avec fragmentation et éventuellement réaccrétion, différenciation de leur structure interne, échauffement interne par effet de marée et volcanisme de glace, formation ou accrétion de matière carbonée ou organique en surface...

La première mission spatiale ayant croisé un noyau cométaire est la sonde ICE (NASA) en 1985. L'année suivante, le sur-

vol du noyau de la comète de Halley par les sondes Vega (URSS) et Giotto (ESA) a fortement fait évoluer notre vision de ces objets considérés comme très primitifs.

Les différentes familles

Si l'on exclut les quelques corps du système solaire dont les glaces forment une partie mineure de la surface, comme la Terre, Mars, Io (chapitres III et IV) ou du volume comme certains astéroïdes de la ceinture principale (chapitre I), les objets glacés du système solaire gravitent exclusivement autour et au-delà de Jupiter. On peut expliquer cette limite des glaces par la température régnant dans la nébuleuse solaire au cours de la formation du système solaire. C'est seulement loin du Soleil, au-delà de plusieurs fois la distance Terre-Soleil, que la température était suffisamment basse pour permettre aux molécules simples formées des éléments relativement légers et abondants (carbone, azote, oxygène, hydrogène...) de se condenser sous forme de glaces et de se maintenir sous cette forme durant plusieurs milliards d'années, jusqu'à nos jours. La molécule d'eau étant la moins volatile d'entre elles et la plus abondante elle domine la plupart des objets glacés. À plus grande distance des molécules beaucoup plus volatiles comme le dioxyde de carbone, l'azote moléculaire, le méthane ou le monoxyde de carbone peuvent se maintenir à l'état solide. C'est le cas sur Triton, Pluton, dans les noyaux cométaires et probablement pour certains objets glacés au-delà de l'orbite de Saturne.

Outre la distance au Soleil, de nombreux autres paramètres conditionnent la présence de ces glaces à la surface des objets du système solaire : leur lieu de formation, leurs histoires dynamique, géologique et thermique, la taille de l'objet, sa gravité, sa température... L'un d'eux donne des indications spécifiques sur leur composition. Il s'agit de la fraction de la lumière solaire arrivant sur l'objet qui est réfléchi par la surface vers l'espace : on l'appelle l'albédo.

C'est de préférence sur la base de leurs orbites que ces objets ont été classés en quelques grandes familles dynamiques. La première famille est celle des satellites des planètes géantes. La seconde est constituée des Centaures, une famille d'objets orbitant entre Jupiter et Neptune. La troisième comprend les objets transneptuniens dont les orbites, comme leur nom l'indique, sont situées au-delà de Neptune. La dernière inclut les comètes dont l'intrusion de quelques-unes d'entre elles dans le système solaire interne n'est que sporadique.

Les satellites des planètes géantes

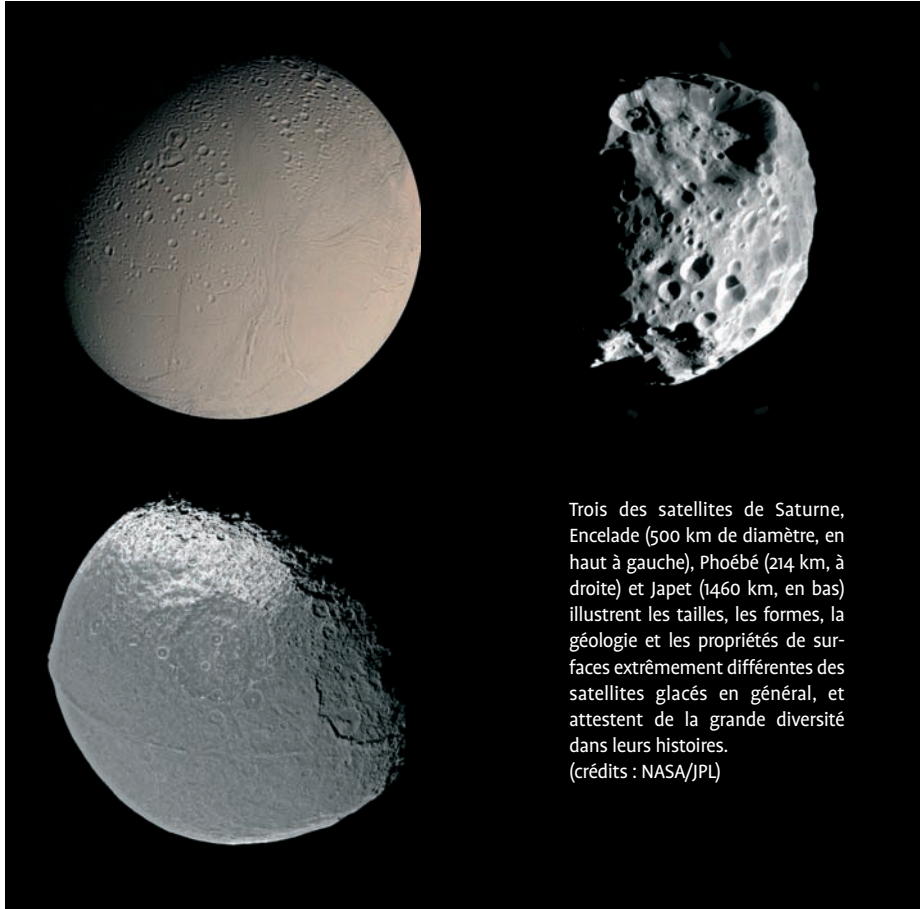
Les observations télescopiques et les missions spatiales (Voyager en particulier) ont mis progressivement en évidence l'existence de systèmes d'anneaux et de satellites autour de chacune des quatre planètes géantes. Le nombre de ces satellites ne cesse d'augmenter au fur et à mesure des missions spatiales et de l'amélioration des performances des télescopes. On en dénombre actuellement 150 (début 2005) dont 63 autour de

Jupiter, 47 pour Saturne, 27 autour d'Uranus et 13 en orbite neptunienne. Leurs observations spatiales rapprochées ont dévoilé une étonnante diversité de tailles, de caractéristiques orbitales, d'états de surface, de géologie et d'évolution. Parfois majoritaire, la glace d'eau semble être présente à la surface ou dans la majorité de ces corps. Les diamètres des deux plus gros satellites Ganymède (5 262 kilomètres) et Titan (5 151 kilomètres) dépassent celui de Mercure (4 880 kilomètres) tandis que les plus petits actuellement observés atteignent à peine un kilomètre de diamètre. Certains satellites sont extrêmement brillants, comme Encelade, d'autres sont très sombres. Parfois, une face est brillante, alors que l'autre est sombre, comme Japet. Ainsi, certains pourraient ne pas comporter de glace en surface, voire seraient essentiellement rocheux. Tous ces satellites montrent une extrême diversité géologique allant de surfaces totalement criblées de cratères de toutes tailles (certains atteignent plus du tiers du diamètre du satellite) à des objets dont la surface remaniée plus récemment est entrecoupée de vallées, de fissures tectoniques et de plaines lisses. Europe, le plus petit des satellites Galiléens, en constitue l'exemple extrême par sa surface exempte de cratère et totalement remaniée par une activité similaire au volcanisme, mais faisant intervenir de la glace et non des roches en fusion.

Malgré cette grande diversité, certaines propriétés orbitales (rayon, excentricité et inclinaison de l'orbite), de taille ou de couleur sont communes à plusieurs de

ces satellites. En particulier l'analyse de la taille des satellites en fonction de la distance à la planète (en rayon planétaire) a montré que l'on pouvait les classer essentiellement en trois sous-familles :

- Les *satellites réguliers* sphériques et de diamètre supérieur à 300 kilomètres tournent autour de leur planète mère dans le même sens que le sens de rotation de celle-ci sur elle-même. Leurs orbites sont quasi-circulaires et quasi-équatoriales à une distance comprise entre 3 et 30 rayons de la planète mère, excepté Japet orbitant à 60 rayons Saturniens. Ces satellites se sont très probablement formés dans la nébuleuse proto-planétaire peu après les planètes elles-mêmes.
- Les *petits satellites internes* sont de tailles inférieures à 200 kilomètres et de formes irrégulières. Ils gravitent très près de la planète mère ou à l'intérieur même des systèmes d'anneaux, et ont la même origine que les précédents. Cependant certains d'entre eux pourraient être des fragments de satellites plus gros détruits par le passé. Quelques-uns de ces fragments tournent aussi sur l'orbite de satellites réguliers, comme Telesto qui précède Téthys (satellite de Saturne) et Calypso qui le suit.
- Les *petits satellites irréguliers externes* (taille inférieure à 300 kilomètres) orbitent au-delà de 100 rayons planétaires soit dans le sens direct soit rétrograde sur des trajectoires allongées (elliptiques) et forte-



Trois des satellites de Saturne, Encelade (500 km de diamètre, en haut à gauche), Phoébé (214 km, à droite) et Japet (1460 km, en bas) illustrent les tailles, les formes, la géologie et les propriétés de surfaces extrêmement différentes des satellites glacés en général, et attestent de la grande diversité dans leurs histoires. (crédits : NASA/JPL)

ment inclinées par rapport à l'équateur de la planète. Ces petits satellites ont tous des formes irrégulières et sont très probablement des objets capturés par la planète après sa formation. Néréide autour de Neptune et Phoébé autour de Saturne en sont les exemples de plus grande taille.

Triton, le plus gros satellite de Neptune (diamètre 2 700 kilomètres), constitue une exception notable car il a toutes les

caractéristiques d'un satellite régulier mis à part sa rotation rétrograde, trahissant son lien de parenté avec la dernière famille, celle des objets capturés. Le seul autre objet ne rentrant pas parfaitement dans l'une de ces trois familles est Hypérior, satellite de Saturne, du fait de sa forme irrégulière malgré sa grande taille, et de son orbite elliptique mais assez proche de la planète.



Comète Hale Bopp. (crédit : Johnny Horne)

Les comètes

Après des millénaires d'observation des comètes on sait maintenant que sous les gigantesques queues de poussière et de gaz cométaires se cache un noyau très sombre dont la taille peut varier de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres. Plus de mille comètes différentes ont été identifiées jusqu'à présent. Depuis la prédiction de Halley sur le retour de la comète de 1682, on sait que certaines ont une orbite elliptique autour du Soleil alors que d'autres semblent venir des confins du système solaire. Les orbites des comètes ont révélé que celles-ci provenaient de deux réservoirs. Un premier en forme de tore, entre 35 et 50 unités astronomiques, est nommé ceinture de Kuiper. Il serait à l'origine des comètes à courte période gravitant près du plan de l'écliptique. Le second, en forme de coquille sphérique, le nuage de Oort, situé à très grande distance du Soleil (vers 50 000 unités astronomiques) en contiendrait des centaines de milliards et serait la source des nouvelles comètes et des comètes à longue période (supérieure à 200 ans).

Un des intérêts majeurs de l'étude des comètes réside dans le fait qu'elles ont probablement conservé de la matière primitive du système solaire. Leur étude permet ainsi de remonter aux conditions physico-chimiques ayant prévalu dans certaines zones du système solaire lors de sa formation.

Les objets transneptuniens

Après la découverte de Pluton en 1930, la recherche de la dixième planète resta sans succès jusqu'à la découverte en 1992 d'un objet de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre orbitant bien au-delà de Neptune. À la différence des planètes géantes, ces corps sont solides et de dimensions plus modestes. Des glaces ont été détectées à leurs surfaces. Depuis, près de 800 nouveaux objets de ce type ont été observés (début 2005), certains atteignant des tailles supérieures à 1 000 kilomètres. Leur nombre total pourrait dépasser la centaine de millions et quelques-uns pourraient dépasser les 2 000 kilomètres de diamètre. Trois principales familles orbitales ont été distinguées pour ces objets appelés transneptuniens : les « classiques », les « résonnants » et les « diffusés ».

Ces découvertes ont révolutionné la nomenclature des planètes car il a été démontré que Pluton, dont l'orbite très excentrique et inclinée ne cessait d'intriguer, ainsi que son satellite Charon appartenaient bien à cette famille des objets transneptuniens. D'autres satellites des planètes géantes pourraient aussi être d'anciens membres de la famille des transneptuniens, déviés puis capturés par ces planètes. Triton, le plus

gros satellite de Neptune, dont l'orbite rétrograde atteste de sa capture, en serait l'exemple le plus marquant. Ces objets sont aussi considérés comme la source de certaines comètes à courte période ainsi que de la famille des « astéroïdes » Centaures.

Les Centaures

Il s'agit d'une famille d'objets de taille comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres et dont les orbites, elliptiques, sont situées entre Jupiter et Neptune. On en connaît actuellement près de 150, mais ils pourraient être plusieurs milliers, certains pouvant probablement dépasser le millier de kilomètres de diamètre. Les Centaures ont des orbites instables à l'échelle de quelques millions d'années et sont donc probablement des objets transneptuniens échappés « récemment » de la ceinture de Kuiper par le jeu de perturbations planétaires. Le membre le plus connu de cette famille est sans conteste Chiron, qui présente la particularité d'être entouré d'une faible chevelure, à l'instar des comètes. Cela laisse penser que les Centaures sont des corps intermédiaires entre les objets transneptuniens et la famille des comètes à courte période issue de ces objets.

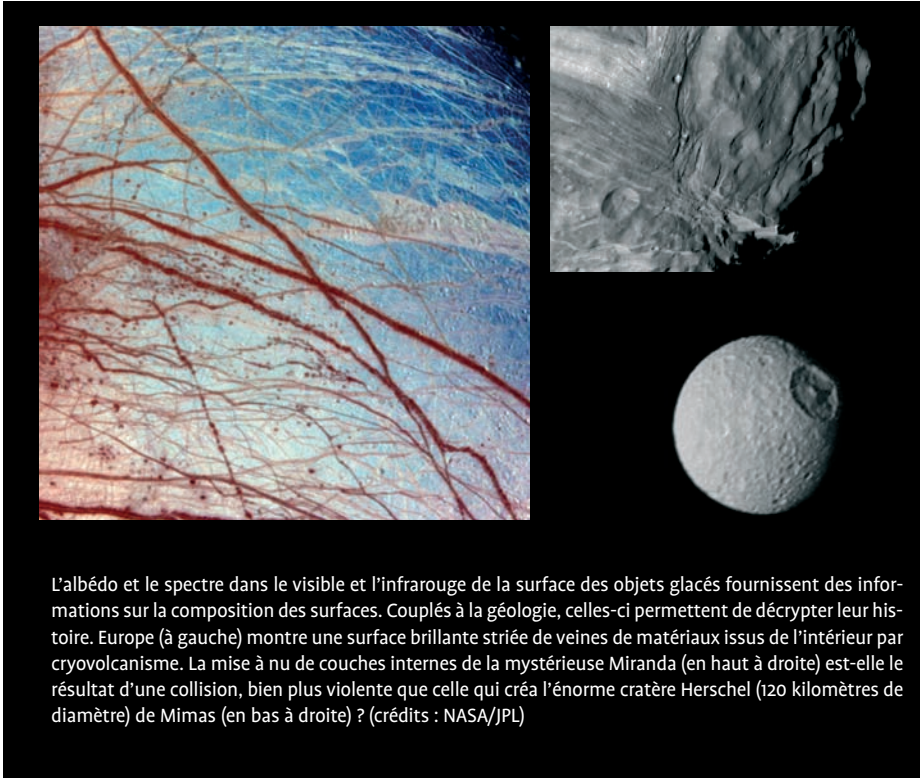
Propriétés physiques

Tous ces différents objets possèdent donc une très grande variété d'orbites, allant de trajectoires quasi-circulaires et équatoriales autour des planètes géantes (satellites réguliers et internes) à des

orbites très allongées et fortement inclinées sur le plan équatorial de ces mêmes planètes (satellites externes). Les petits objets glacés en orbite autour du Soleil (Centaures, objets transneptuniens, comètes) ont quant à eux pratiquement tous des orbites elliptiques plus ou moins inclinées sur le plan de l'écliptique.

Mais ces objets glacés montrent aussi d'importantes différences de taille, forme, densité, structure interne, géologie, couleur et composition. Certains comme Titan, Triton et Pluton, retiennent même une atmosphère ou produisent des émissions transitoires de gaz et de poussières comme les comètes et certains Centaures.

Malgré la présence de glaces dans ces objets, l'albédo de leur surface varie de « blanc comme neige » à « noir comme suie » en passant par divers tons de gris ou plus fréquemment des tons rougeâtres plus ou moins sombres. Ces tons et couleurs ont encore une origine mal expliquée mais ils proviendraient de la composition plus ou moins minérale, carbonée ou organique des poussières mélangées aux glaces. Ils seraient étroitement liés à l'origine et à l'histoire de l'objet depuis sa formation. C'est pour cette raison que l'albédo de la surface et différents indices de couleur dans le visible et l'infrarouge sont fréquemment utilisés pour rechercher des liens génétiques entre familles dynamiques ou pour tenter de séparer en sous-familles distinctes des objets ayant des orbites similaires.



L'albédo et le spectre dans le visible et l'infrarouge de la surface des objets glacés fournissent des informations sur la composition des surfaces. Couplés à la géologie, celles-ci permettent de décrypter leur histoire. Europe (à gauche) montre une surface brillante striée de veines de matériaux issus de l'intérieur par cryovolcanisme. La mise à nu de couches internes de la mystérieuse Miranda (en haut à droite) est-elle le résultat d'une collision, bien plus violente que celle qui créa l'énorme cratère Herschel (120 kilomètres de diamètre) de Mimas (en bas à droite) ? (crédits : NASA/JPL)

Les liens entre ces familles d'objets

À mesure que des observations ont montré que certains objets d'une famille présentaient des caractéristiques ou des comportements propres à une autre famille, la frontière, précédemment bien tranchée, qui séparait astéroïdes, comètes et satellites s'est émoussée. En particulier des liens de parenté très forts se dessinent entre certaines familles de comètes, les Centaures et les objets transneptuniens. Même la famille des planètes a été atteinte par cette révolution, Pluton, la seule planète glacée,

ayant été déchu de son statut pour régner, peut-être plus pour longtemps, sur la grouillante famille des objets transneptuniens.

L'abondance des glaces a été initialement utilisée pour séparer *a priori* les objets glacés (supposés clairs) des objets supposés rocheux (sombres). Mais il est apparu que la couleur de la surface, ou son albédo, sont des caractéristiques trompeuses. Le cas le plus probant est celui de la comète de Halley : la sonde Giotto a constaté que son noyau, très riche en glaces, était aussi sombre que la surface des astéroïdes les plus sombres.



Hypérion, un gros satellite de Saturne mais de forme irrégulière (taille : 370 x 280 x 225 kilomètres), en révolution sur une orbite elliptique mais proche de la planète et soumis à une rotation erratique : une exception remarquable dans la famille des satellites. Sa surface « spongieuse » révélée par Cassini rajoute encore au mystère de son origine et de son évolution. (crédit : NASA/ESA/JPL).

L'accumulation des observations montre qu'il existe une transition progressive en terme de quantité relative de glace entre ces différentes familles. En définitive, la notion même « d'objet glacé » et « d'objet rocheux », encore maintenue dans ce livre, est en train de disparaître.

D'autre part, depuis l'observation de l'apparition d'une coma autour de Chiron, la notion de « comète » tend à revenir à sa définition première en se rattachant plus à l'observation d'une « activité de type cométaire » (léger dégazage) de l'objet plutôt qu'à son origine. Cette activité ayant pour origine la sublimation des glaces en surface, c'est donc leur abondance couplée à la proximité du Soleil qui seront déterminants.

Une nouvelle définition de familles d'objets prenant aussi en compte leur com-

position et leur histoire dynamique commence donc à se dessiner.

Les grandes questions

D'où viennent ces objets ? Comment se sont-ils formés ? Qu'est-ce qui détermine leurs orbites et leur physionomie actuelles ? Quels objets sont susceptibles de contenir de la matière organique et quelle en est l'origine ? Certains objets sont-ils susceptibles d'abriter des environnements prébiotiques ?

Toutes ces questions générales et les nombreuses autres spécifiques aux objets glacés qui en découlent attendent une réponse à travers les observations des différentes familles d'objets glacés et leurs comparaisons.

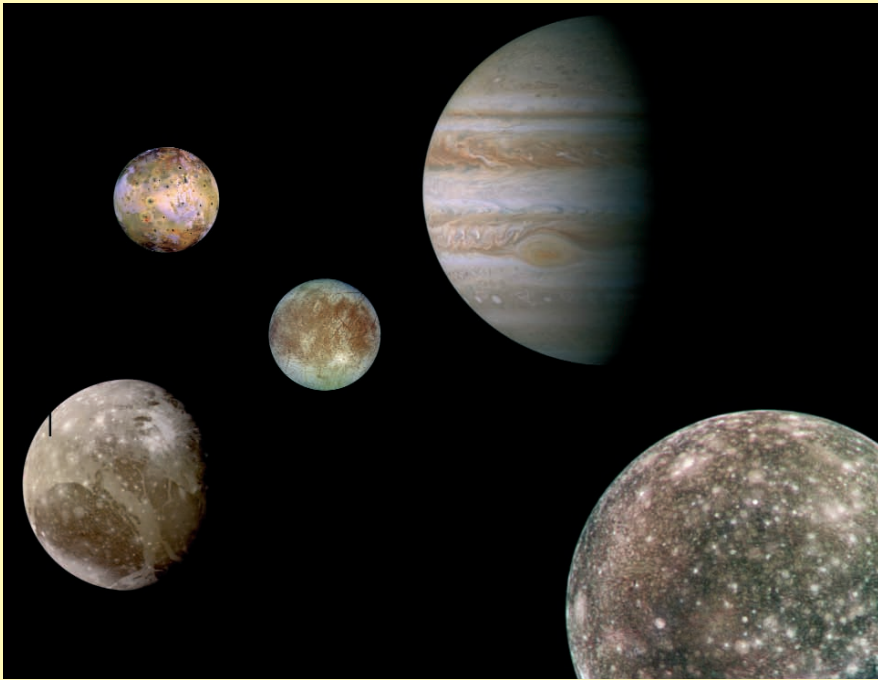
Leur découverte

En 1610 l'astronome et physicien italien Galileo Galilei pointe la lunette astronomique qu'il vient de concevoir vers Jupiter. On imagine le choc ressenti par le savant à la première observation. Grâce au surcroît de lumière recueilli par l'instrument et à sa capacité de grossissement, la planète réduite jusqu'alors à un point de lumière aux yeux des Hommes se révèle. Les carnets d'observation de Galileo nous permettent aujourd'hui encore d'appréhender la vision qui s'offre à lui : un disque brillant légèrement aplati entouré de petites « étoiles » presque alignées. Les nuits qui suivent la découverte montrent que ces quatre astres non résolus se rapprochent et s'éloignent de Jupiter périodiquement. Galileo comprend bientôt qu'il observe là quatre lunes (baptisées lunes médicéennes) en révolution autour de la Planète Mère avec une période d'autant plus courte que le rayon de la trajectoire est petit. Cette déduction difficilement réfutable justifie définitivement aux yeux de Galileo la vision de l'Univers récemment proposée par l'astronome Copernic. Jupiter est la reproduction à une échelle plus modeste du système solaire. Comme les lunes médicéennes, les planètes (y compris Jupiter) se meuvent autour d'un astre central beaucoup plus massif, en l'occurrence le Soleil. Poursuivons cette analogie comme l'aurait fait Galileo lui-même ou un de ses contemporains. Si les planètes et les lunes sont de même nature, alors ces dernières doivent aussi constituer des mondes tout comme notre Terre

avec leurs environnements, leurs paysages et, qui sait, leurs habitants. L'imagination s'emballe et la fascination naît. Quels visages nous offriraient les lunes médicéennes si nous pouvions les approcher d'assez près pour en distinguer la surface?

Caractéristiques générales

Il a fallu attendre les deux survols de Jupiter par les sondes Voyager pour distinguer les traits principaux des lunes médicéennes rebaptisées satellites Galiléens. Io, dont le rayon atteint 1831 kilomètres, gravite à proche distance, 5,88 rayons de la planète géante (RJ). En nous éloignant, nous trouvons à 5,38 RJ Europe, petite sphère (1565 kilomètres de rayon) blanche et marbrée de brun clair. Puis surviennent deux des plus gros satellites du système solaire comparables en taille à la planète Mercure. Ganymède (2634 kilomètres de rayon) apparaît à 15 RJ comme une grosse boule à dominante marron mais avec par endroits des zones de couleur crème. Enfin Callisto (2403 kilomètres) à 26 RJ exhibe un manteau sombre ponctué de taches blanches. À l'occasion des survols, la masse de ces objets a pu être déterminée et, par conséquent, leur masse volumique qui est inférieure, à l'exception de Io, à celle des planètes telluriques (typiquement 3500 kilogrammes par mètre cube). Des matériaux plus légers que des roches silicatées composent donc en partie les 3 satellites galiléens externes. De façon remarquable leur masse volumique décroît au fur et à



Montage photographique montrant la planète Jupiter (en haut à droite) et son cortège de satellites galiléens. Par ordre d'éloignement : Callisto, Ganymède, Europe et Io. (crédit : Galileo, NASA)

mesure que l'on s'éloigne de Jupiter : 3010 kilogrammes par mètre cube pour Europe, 1940 kilogrammes par mètre cube pour Ganymède et 1830 kilogrammes par mètre cube pour Callisto. Par conséquent la proportion des matériaux légers — comme la glace d'eau — par rapport aux roches doit augmenter d'Europe à Callisto.

L'orbiteur Galileo de la NASA a exploré le système jovien de décembre 1995 à novembre 2001, frôlant l'un des quatre satellites Galiléens à chaque orbite autour de Jupiter. Ainsi chacun d'eux a bénéficié d'une bonne dizaine de survols

au cours desquels une batterie d'instruments a été activée : caméra, spectromètre-imageur, radiomètre thermique, etc. (chapitre VII). Peu à peu, les structures géologiques, la composition chimique et la température de la surface sur Io (fiche IV-1), Europe (fiche V-2), Ganymède (fiche V-3) et Callisto (fiche V-4), nous sont devenus plus familières. L'enregistrement de la force de gravité exercée par les satellites sur Galileo et la mesure de leur magnétisme lors des survols ont permis d'appréhender leur structure interne.

Callisto est le plus éloigné des satellites galiléens autour de Jupiter. Il a un aspect sombre assez uniforme, ponctué d'innombrables cratères d'impact de toutes tailles. Nous avons apparemment affaire à un objet qui n'a quasiment pas évolué depuis sa formation, il y a 4 à 4,5 milliards d'années. En l'absence d'activité géologique notable qui aurait pu les effacer, la surface a conservé toutes les traces du bombardement auquel elle a été soumise.

Les palimpsestes

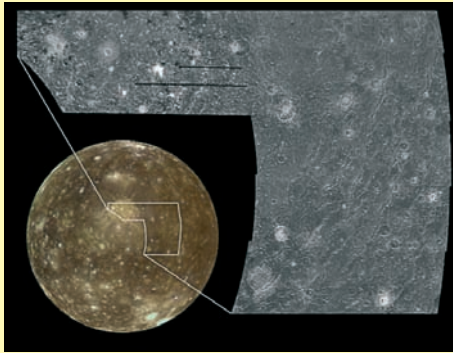
Une observation plus attentive révèle par endroits la présence de grands réseaux de fossés en arcs de cercle de plusieurs milliers de kilomètres de diamètre et de centaines de kilomètres de longueur. Parfois il est possible de déterminer le centre autour duquel semblent tourner ces failles. Il s'agit le plus souvent d'une région un peu plus claire, assez plate et de forme circulaire. Ce type de structure résulte probablement de collisions colossales entre des astéroïdes de quelques dizaines à centaines de kilomètres de diamètre et Callisto, tôt dans son histoire. Ces collisions ont engendré à chaque fois des ondes de pression qui se sont propagées à l'intérieur et à la surface de Callisto, une sorte de Tsunami solide qui a disloqué la croûte par endroits pour former les failles concentriques.

Mais pourquoi le cratère gigantesque qui n'a pas manqué de se former à l'endroit de l'impact s'est-il ensuite comblé ne laissant qu'une vague empreinte appelée palimpseste ?

Pour comprendre le phénomène, il faut connaître la nature des matériaux qui composent la croûte. Callisto présente la masse volumique la plus faible des quatre satellites galiléens, 1850 kilogrammes par mètre cube. D'autre part les observations spectroscopiques montrent que la lumière solaire dans le proche infrarouge est très absorbée, particulièrement autour de la longueur d'onde 3 microns. Autant d'indices prouvant la prédominance de la glace d'eau dans le corps du satellite. Aux températures régnant actuellement à sa surface (-108 °C au maximum), la glace est extrêmement rigide et se comporte comme une roche. La couleur du satellite est brun sombre car l'eau solide est mélangée à 50 % en moyenne avec une poussière minérale très sombre. Cette dernière provient de la fragmentation des multiples objets qui ont heurté Callisto pendant des milliards d'années. Après sa formation, la température interne demeurait assez élevée pour que la glace d'eau soit proche de son point de fusion et donc beaucoup plus plastique qu'aujourd'hui. Les remparts des plus gros cratères ont littéralement coulé, flué comme des glaciers pour venir combler en quelques millions d'années la dépression centrale adjacente. Ainsi se formèrent les palimpsestes.

L'érosion sur Callisto

L'analyse de nombreuses images de la sonde Galileo (NASA) a montré qu'à l'échelle du kilomètre, les cratères et autres formes de relief modelant la surface de Callisto sont assez dégradés. Pics,



Un hémisphère de Callisto et un zoom sur les terrains sombres. Cratères d'impact et réseaux de fossés (failles) en arcs de cercle. (crédits : Galileo, NASA)

remparts, talus, etc. apparaissent souvent désagrégés en larges blocs présentant des cavités. Les plaines entre les cratères sont lisses et sombres. Les agents d'érosion classique que nous connaissons sur Terre, les précipitations, le gel/dégel, la végétation n'existent pas sur Callisto. Aussi, les planétologues ont dû être imaginatifs et trouver un mécanisme plausible. Ils suspectent que les roches d'eau glacée rigide contiennent un peu d'ammoniaque ou du dioxyde de carbone. Dans ces conditions, ces dernières peuvent très lentement mais inexorablement se volatiliser en phase vapeur et former des reliefs dégradés.

L'hypothèse de l'océan interne

Les mesures magnétiques effectuées par Galileo au voisinage de Callisto ont révélé un magnétisme propre. Cette propriété étonnante, pour un corps en apparence figé, résulte de l'existence d'une couche liquide conductrice située en profondeur. Les océans terrestres constitués d'eau salée sont conducteurs grâce aux ions

libres de sodium, potassium, chlore, etc. qu'ils contiennent. Il faudrait enfouir au sein de Callisto une coque sphérique de 10 kilomètres d'épaisseur remplie de cette eau océanique pour expliquer son magnétisme. Cependant cet océan enfoui doit contenir en plus des sels un puissant antigel. En effet depuis sa naissance, la température interne de Callisto est descendue bien plus bas que $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, la température de fusion de l'eau pure pour les pressions régnant à l'intérieur du satellite. De l'ammoniaque mélangée en petites quantités avec l'eau permettrait à cette dernière de rester liquide. L'ammoniac a été détecté en quantités substantielles dans l'atmosphère des planètes géantes et se trouvait certainement dans la nébuleuse protojovienne. L'hypothèse d'un réservoir interne d'eau salée et ammoniacquée, aussi séduisante soit-elle pour expliquer le magnétisme de Callisto, n'en est pas moins en contradiction avec l'absence d'activité géologique notable au cours de l'histoire du satellite.

Les deux visages de Ganymède

Sur les images globales prises par la sonde Galileo (NASA), Ganymède, satellite galiléen de Jupiter, montre deux visages bien distincts. Les terrains brun sombre qui occupent 40 % environ de sa surface sont en tous points semblables à la surface de Callisto. Ils forment des plaines poussiéreuses, sans grand relief et ponctuées de cratères d'impact qui se superposent les uns aux autres à toutes les échelles. Les terrains clairs, peu cratérisés, ont un aspect bien différent surtout si on les étudie sur des images à haute résolution. Ils apparaissent alors marqués d'innombrables lignes parallèles les unes aux autres, alternativement claires et sombres, sur des centaines de kilomètres. Ces lignes s'interrompent assez brutalement au contact des terrains sombres, ce qui dessine des frontières très nettes. Quelquefois les terrains sombres sont distendus par des fractures émanant des terrains clairs. Il a fallu reconstruire le relief tridimensionnel de ceux-ci grâce à des paires d'images stéréoscopiques pour percer le mystère de leur gravure si singulière. Ils sont formés d'un empilement de blocs géants taillés dans la croûte rocheuse d'eau solide et basculés comme des dominos. Les arêtes supérieures des blocs forment des crêtes brillantes de glace vive débarrassées de leur poussière. Les blocs principaux peuvent eux-mêmes être fracturés en compartiments plus petits.

L'origine des terrains clairs

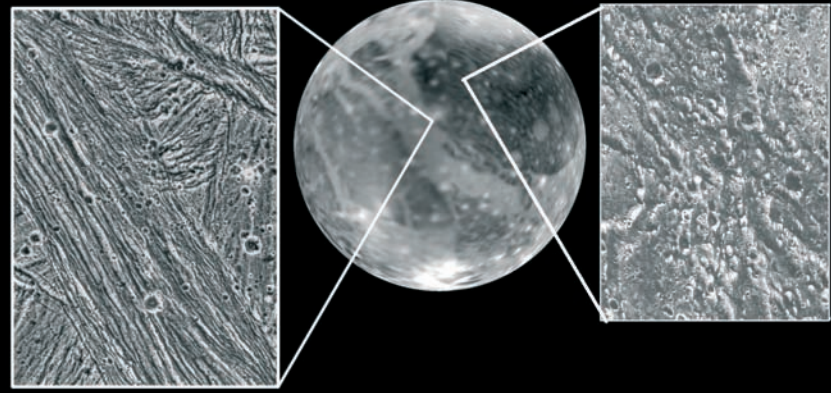
L'analyse géologique détaillée des structures a permis de construire un scénario

de formation. À une époque difficile à déterminer, mais plus récente que 3 milliards d'années, des mouvements d'extension ont fracturé les terrains sombres anciens en blocs qui ont glissé les uns sur les autres. Comme le montre la déformation de certains cratères, le taux d'allongement excède parfois 50 %. Ceci a été permis par l'existence d'une couche plastique ou liquide en profondeur. La croûte de Ganymède ne montre pas de signes de raccourcissement comme des montagnes ou des zones de subduction (descente de la croûte à très grandes profondeurs) au niveau des terrains sombres, ni à leurs frontières. Il a donc fallu admettre qu'à un certain point de son histoire Ganymède a subi une augmentation globale de volume. Ce gonflement (1 à 2 % du rayon au maximum) a entraîné l'extension et donc le rajeunissement d'une partie de sa surface qui ressemblait fort auparavant à celle de Callisto.

Callisto et Ganymède : deux évolutions différentes

Pourquoi Callisto et Ganymède qui partagent des traits communs n'ont-ils pas évolué de la même manière ? La réponse réside certainement dans l'intérieur de ces deux corps qui a pu être indirectement sondé par Galileo grâce aux mesures de gravité.

La structure interne de Ganymède est bien organisée en pelures d'oignons : au centre, un noyau de fer jusqu'à 1300 kilomètres de rayon, puis un manteau de roches silicatées, et enfin une croûte de



Principales structures géologiques de Ganymède. Le zoom montre une zone frontière entre terrains sombres et clairs à gauche, et sur les terrains sombres à droite. (crédits : Galileo, NASA)

glace solide de 800 kilomètres d'épaisseur environ. Les matériaux issus de l'accrétion primordiale, principalement des métaux, des silicates et de la glace, se sont organisés suivant leur densité.

Par contre, à l'intérieur de Callisto ces matériaux sont moins bien triés. La différenciation du satellite n'a donc été que limitée. Le tri des matériaux nécessite que le fer se sépare des roches, qui elles-mêmes se séparent de la glace. Par conséquent, que l'objet en formation ait subi une fusion au moins partielle. Nous pouvons donc en déduire que Ganymède était plus chaude et plus liquide en moyenne que Callisto au cours de sa formation.

Rappelons que le premier satellite est plus volumineux et possède une proportion de roches plus importante que le second (masse volumique moyenne plus élevée). En conséquence, l'énergie d'accrétion et les éléments radioactifs naturellement contenus dans les roches

étaient plus abondants dans le cas de Ganymède, ce qui explique un chauffage et donc une différenciation plus efficace.

Dans l'état non différencié, la glace située à grande profondeur est soumise à des forces de pression considérables à cause du poids des couches supérieures. Les molécules d'eau qui composent cette glace s'agencent alors suivant une forme solide plus dense que celle que nous connaissons à la surface de la Terre. Dans l'état différencié, la glace se situe principalement en surface à de faibles pressions, c'est-à-dire dans l'état normal. Ganymède a donc essentiellement connu au tout début de son évolution de la glace dense qui a fusionné, puis est remontée sous forme liquide avant de se solidifier de nouveau en croûte de glace peu dense. Une augmentation globale de volume a résulté de toutes ces transformations et expliquerait les mouvements d'extension qui ont rajeuni une partie de la surface de Ganymède.

Europe, le plus petit des satellites galiléens fait partie des puzzles géologiques les plus fascinants soumis à notre perspicacité. Ses traits principaux sont une surface brillante couleur crème, marbrée par endroits de rouge brunâtre et parcourue d'innombrables veines de la même teinte. Les images révèlent peu de cratères d'impact de taille kilométrique, donc la surface est jeune, quelques dizaines de millions d'années. Le satellite est donc géologiquement actif ou l'a été jusqu'à très récemment. Les structures relevées à la surface sont d'une grande diversité et se superposent parfois les unes aux autres. Pour se retrouver dans ce foisonnement, les géologues ont défini quelques grands types de terrains.

Les plaines striées

Ce sont des zones particulièrement plates sillonnées de veines rougeâtres qui s'étendent sur des milliers de kilomètres et s'entrecroisent parfois. Sur les images à haute résolution, les veines apparaissent comme des stries en relief qui reposent sur une matrice elle-même constituée de l'enchevêtrement chaotique d'un nombre incalculable de stries plus modestes de toutes les formes. Des paires d'images stéréoscopiques ont permis de reconstruire le modelé tridimensionnel des stries principales : deux lèvres parallèles, protubérantes et arrondies, séparées par un fossé de quelques dizaines de mètres de hauteur.

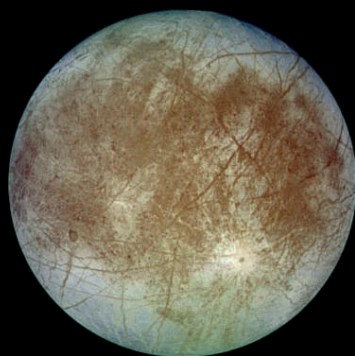
De telles structures se rencontrent couramment sur la banquise de l'océan

Arctique de notre Terre. Peut-être le mécanisme de formation est-il similaire : ouverture d'une croûte de glace flottant sur un océan d'eau liquide selon une fracture longiligne suivie d'une solidification du liquide exposé au vide quasiment spatial et formation d'une mince couche de glace jeune. Si la fracture se referme par rapprochement des deux compartiments adjacents, cette glace nouvellement formée est compressée par pincement et crée un bourrelet à la surface. Une réouverture ultérieure de la fracture peut dissocier le bourrelet en deux lèvres plus ou moins symétriques séparées par une dépression de glace jeune. Les plaines striées seraient donc une sorte de banquise fracturée à de multiples reprises dans des directions variées.

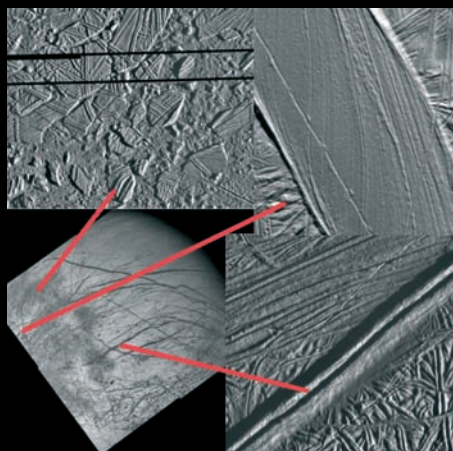
Des études ont démontré que les stries principales ne s'arrangent pas par hasard mais en faisceaux curvilignes centrés sur certains points remarquables du satellite. Ces différentes pistes indiquent que les stries ont principalement été formées par les forces gravitationnelles qu'exerce Jupiter sur Europe. Ces forces évoluent périodiquement au gré des révolutions du satellite autour de la planète géante. Elles déforment en bourrelet la croûte de glace rigide superficielle qui parfois se brise en fractures « concentriques » autour du centre du bourrelet.

Les bandes

Ce sont des zones rougeâtres longilignes à bords parallèles ou en fuseaux qui par-



Un hémisphère marbré d'Europe avec plaines brillantes et zones de chaos rougeâtres. (crédits : Galileo, NASA)



Principales structures géologiques d'Europe. Zoom sur une strie (en bas à droite), sur une bande (en haut à droite) et sur une zone de chaos (en haut à gauche). (crédits : Galileo, NASA)

courent les plaines comme les veines mais sur de plus petites distances. Elles sont parfois groupées en réseaux et peuvent se croiser. Un examen plus détaillé révèle une fabrique faite d'une alternance de dizaines ou de centaines de crêtes et de sillons parallèles de faible ampleur verticale.

Poursuivant l'analogie précédente avec la banquise terrestre, les bandes pourraient résulter non pas d'un épisode d'extension, de remplissage et de compression d'une même fracture, mais d'une succession de multiples événements du même type.

La comparaison avec la situation terrestre suggère d'autres mécanismes de formation potentiels. Les bandes pourraient s'apparenter aux rifts (chapitre III), avec toutefois une extension spatiale beaucoup plus limitée. Dans ce cas, la montée de glace ou d'eau profonde « chaude » associée aux cellules de

convection brassant le manteau fracture régulièrement la croûte et injecte constamment de nouveaux matériaux qui viennent compresser les anciens. Ceux-ci sont repoussés latéralement et s'éloignent donc du rift. Ce modèle se heurte à deux problèmes. Premièrement la physionomie des bandes ne ressemble que très grossièrement à un rift terrestre qui possède une dépression centrale marquée, bordée de deux crêtes saillantes. Deuxièmement l'eau étant plus dense que la glace, elle ne peut que difficilement atteindre la surface à travers la croûte solide.

Les chaos

Ce sont des plaines striées de quelques centaines de kilomètres carrés, fragmentées en plaques éparses de différentes tailles. Après séparation, elles ont parfois été déplacées, mises en rotation et dégradées par fonte ou glissement de

terrains. Elles semblent avoir flotté dans une soupe liquide remplie de petits fragments solides qui s'est par la suite immobilisée par solidification en une matrice rugueuse. Certains chaos sont maculés par des taches brunâtres à rougeâtres, certains étant isolés, d'autres étant en coalescence. À proximité des chaos, on observe fréquemment des dômes, des dépressions et des coulées lobées figées.

Autant de structures qui pourraient avoir une origine volcanique. Cependant, ce ne sont pas des laves à haute température qui émergent des profondeurs et s'épanchent à la surface, mais des torrents d'eau liquide qui, en refroidissant, se solidifient. Si les matériaux chauds souterrains dépassent un certain volume (en kilomètres cubes), alors l'énergie thermique apportée peut littéralement faire fondre, partiellement ou complètement, des portions de croûte. Les contraintes engendrées par les courants d'eau liquide sous-jacente brisent la glace en radeaux flottant qui dérivent sur cette mer éphémère. Quand l'activité cesse, la température de l'eau de surface diminue rapidement exposée au vide de l'espace et tout se fige. Ainsi auraient été élaborés les chaos d'Europe à une époque indéterminée mais récente à l'échelle géologique : quelques dizaines de millions d'années.

L'océan interne

De nombreux traits de la géologie d'Europe peuvent donc être expliqués simplement par la présence d'un vaste océan d'eau liquide à quelques dizaines

ou centaines de kilomètres sous la surface. Les mesures du champ magnétique à proximité d'Europe indiquent qu'une couche liquide conductrice pourrait effectivement se trouver en profondeur. Plus exactement au sein du manteau de glace de 80 à 200 kilomètres d'épaisseur qui entoure un manteau de silicates, lui-même enrobant un noyau métallique de 400 à 800 kilomètres de rayon. Europe est complètement différenciée et pourrait être encore active géologiquement, même si aucun changement notable n'a été constaté en 17 ans sur les formes de relief.

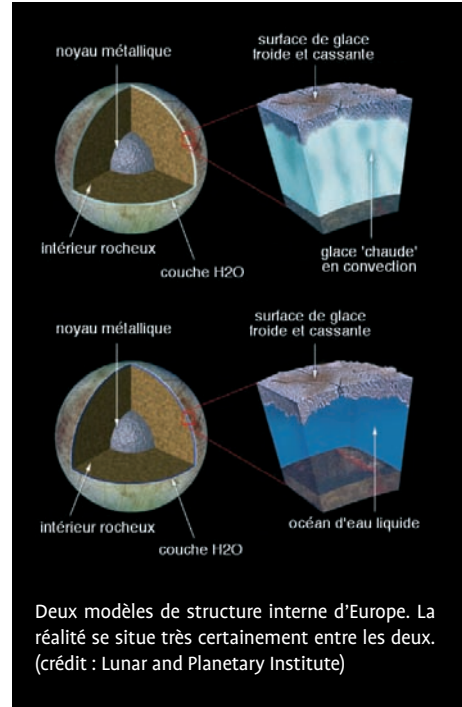
Les tatouages d'Europe

À travers l'étude des structures géologiques, nous avons vu que la surface a dû être en contact direct ou indirect avec l'océan au cours de l'histoire d'Europe. Les teintes brunâtres à rougeâtres omniprésentes au niveau des stries, bandes et chaos semblent être une autre marque indélébile laissée par cette relation. La sonde Galileo (NASA) a pu analyser la composition chimique des matériaux rouges, composition qui s'est révélée être assez uniforme et très insolite : un mélange solide d'acide sulfurique hydraté, de soufre, de dioxyde de soufre avec peut-être dans certains cas des sulfates et des carbonates. En dehors des zones teintées, la glace d'eau domine largement mais avec des traces de soufre et de dioxyde de soufre. La composition des stries, bandes et chaos est certainement liée à celle de l'océan interne bien qu'elle puisse être différente. En effet le bombardement incessant de la surface d'Europe par les particules énergétiques

de la magnétosphère de Jupiter (chapitre VI) induit des réactions chimiques qui génèrent de nouvelles molécules. Il est vraisemblable que l'acide sulfurique hydraté provient de l'océan interne, par contre le soufre et le dioxyde de soufre seraient synthétisés par irradiation à partir du premier composant.

Qu'est-ce qui anime Europe ?

Le fait qu'Europe possède très certainement un océan est bien intrigant au premier abord car elle a une taille beaucoup plus modeste que celle de Callisto. En général, les corps planétaires se refroidissent avec une vitesse inversement proportionnelle à leur rayon (fiche III-1). Europe devrait donc être un corps géologiquement mort depuis des milliards d'années. Même un puissant antigel comme l'ammoniac n'aurait pas suffi à enrayer la solidification de la couche liquide et la paralysie du satellite dans son ensemble. Qu'est-ce qui a insufflé à Europe l'énergie nécessaire au maintien de son activité jusqu'à une période sans doute très récente et peut-être même encore jusqu'à aujourd'hui ? La réponse aujourd'hui privilégiée est : la planète Jupiter, qui déforme régulièrement son satellite par action gravitationnelle. L'effet n'est pas seulement superficiel (création de stries) mais également profond avec des mouvements de friction entre matériaux qui dissipent de la chaleur. Cette chaleur serait suffisante pour maintenir en état la couche liquide. Bien plus, et nous rentrons là dans le spéculatif, elle pourrait alimenter une activité volcanique sous-marine à l'interface entre le manteau de roches et l'océan. À



Deux modèles de structure interne d'Europe. La réalité se situe très certainement entre les deux. (crédit : Lunar and Planetary Institute)

l'image de ce qui se déroule le long des rifts océaniques terrestres, cette activité se traduirait par l'émission de laves silicatées à hautes températures (~ 900-1000 °C) et par l'existence de circulations géothermales génératrices de toute une chimie complexe. Ce type d'activité volcanique induite par Jupiter s'exprime toujours à la surface de Io, sans eau cette fois, où elle a été pleinement observée et étudiée grâce à Galileo. Une caractéristique significative de ce volcanisme est l'émission de grandes quantités de soufre sous forme native ou d'oxyde (voir fiche IV-1). Or, ces molécules réagissent avec l'eau liquide pour donner de l'acide sulfurique, composant que l'on retrouve au niveau des structures géologiques d'Europe.