

flottait sur de l'eau liquide. Dans cette hypothèse, les effets de marées pomperaient de la chaleur à la base de la couche, où la glace est proche de sa température de fusion et plus facile à déformer. La glace chaude, moins dense que la glace froide située au-dessus, tend à monter. Si la couche gelée est suffisamment épaisse, la poussée d'Archimède peut vaincre la résistance visqueuse (qui diminue avec la profondeur). Comme l'huile montant dans une lampe à lave, les diapirs de glace chaude montent vers la surface, où ils peuvent engendrer les *lenticulae* visibles. Selon ce modèle, la couche de glace aurait une épaisseur d'au moins dix kilomètres.

Le terrain qui apparaît moucheté sur les images contient l'une des caractéristiques les plus spectaculaires d'Europe : les régions de «chaos». Dans ces zones désordonnées, de petits vestiges glacés d'anciennes plaines ridées semblent avoir joué des coudes dans une matrice mamelonnée – comme des icebergs se déplaçant dans une mer de glace partiellement fondue. La disposition initiale de ces icebergs peut être reconstruite comme un puzzle : c'est ce que l'on a fait pour la région du Chaos de Conamara (voir la figure 8). Si ces régions se sont formées lorsque de l'eau située sous la surface a coulé à travers la croûte glacée d'Europe et a regelé, l'analogie avec les icebergs est sans doute appropriée.

Une autre possibilité serait qu'un ou plusieurs diapirs aient jailli et chauffé la glace proche de la surface, créant un lit de glace partiellement fondue et de liquide sur lequel les blocs de glace brisés et délogés auraient glissé. Quelle que soit l'explication de leur genèse, les régions de chaos témoignent d'une «subsurface» chaude et d'une fusion au moins partielle.

Les petits cratères d'impact sont étrangement absents dans ce terrain moucheté : la surface d'Europe doit être jeune. En se fondant sur les estimations de Shoemaker, les planétologues ont modélisé les comètes et les astéroïdes du Système solaire pour

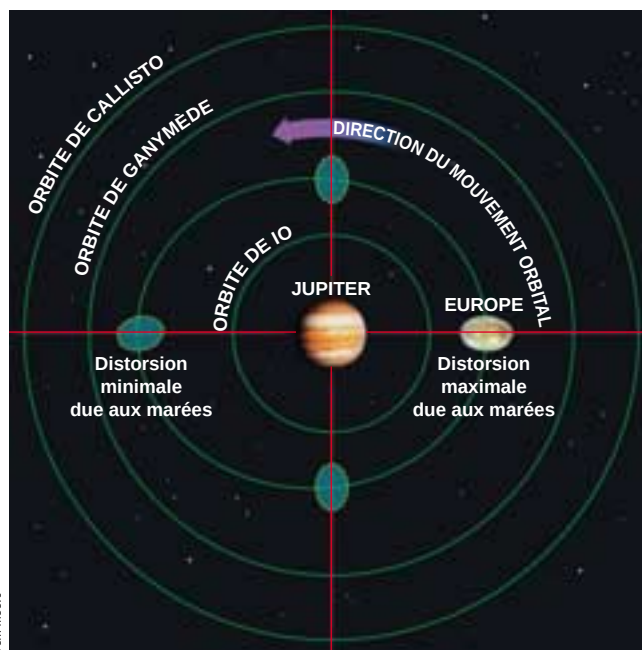
comprendre leur taux de collision avec Europe. Ils ont ainsi confirmé l'idée initiale de Shoemaker : les comètes sont les principaux projectiles qui chutent sur les satellites de Jupiter, les astéroïdes étant trop peu nombreux. Les estimations récentes

conduisent à un âge, pour le paysage aux cratères clairsemés d'Europe, compris entre 10 et 250 millions d'années, très bref à l'échelle géologique. Ainsi, il est probable qu'Europe soit toujours active aujourd'hui, même si on n'a pas découvert de volcans qui éjectent de grands panaches, comme ceux qui couvrent Io.

Les quelques cratères que compte la surface d'Europe sont révélateurs de la croûte de glace. Contrairement aux cratères d'impact en forme de bol ou à fond plat sur d'autres mondes, les deux structures d'impact les plus grandes sur Europe se composent d'une dépression centrale lisse entourée d'anneaux concentriques (voir la figure 6). Les collisions qui ont engendré ces structures ont dû pénétrer dans la glace rigide proche de la surface jusqu'à une couche inférieure plus malléable. Comme la couche malléable ne pouvait conserver la forme d'un cratère, de la glace partiellement fondue a rapidement comblé celui-ci, entraînant en profondeur la glace proche de la surface et fracturant la surface en anneaux concentriques. Les anneaux sont comme les ronds gelés d'une pierre jetée dans un étang, une énorme pierre dans un étang gigantesque. À partir des cicatrices visibles, les planétologues ont estimé les dimensions de l'impact initial : la couche malléable se situerait entre 6 et 15 kilomètres de profondeur. On a ainsi corroboré la théorie de l'échauffement par les marées et le modèle des bulles. Toutefois, selon des planétologues, certaines zones de la croûte de glace



6. LE SITE D'IMPACT DE TYRE MACULA, l'un des rares grands cratères d'Europe, semble indiquer la présence d'eau liquide sous la glace. La dépression centrale a un diamètre d'environ 40 kilomètres. Les anneaux concentriques sont des fractures qui ont été créées lorsque le cratère s'est effondré vers l'intérieur. Des petits cratères secondaires, créés par les éjectats, criblent la surface. Les lignes noires indiquent des données manquantes.



7. LA DANSE ORBITALE des principaux satellites de Jupiter impose à Europe une orbite allongée. De ce fait, les forces de marées solides exercées par Jupiter, qui étirent Europe en une forme oblongue, sont plus intenses en certains points de l'orbite qu'en d'autres (l'échelle n'est pas respectée).

Un lac oublié par le temps

Le lac Vostok, dans l'Antarctique, est réellement un trou perdu. Pour s'y rendre, il faut d'abord rejoindre une base scientifique russe, et affronter un climat considéré comme le pire au monde. Ensuite, il faut creuser la glace sur quatre kilomètres de profondeur. Là, isolé du monde depuis plusieurs millions d'années, s'étend un réservoir d'eau pure d'une superficie deux fois égale à celle de la Corse et profond de 600 mètres. C'est le meilleur analogue terrestre de l'océan que l'on cherche sur Europe.

Les premiers signes de l'existence du lac perdu remontent aux années 1970 ; ils furent donnés par des sondages aériens par radar ! Le signal radar traverse la glace et se réfléchit sur la roche ou sur l'eau sous-jacentes. L'intensité du signal réfléchi et la géométrie plate de la surface située sous la glace révélaient un lac, ce qui fut confirmé par un réexamen d'anciennes données sismiques russes. Toutefois, les géologues n'ont compris la véritable étendue du lac qu'en 1996, après un sondage de sa couverture de glace par le satellite ERS. Personne n'a encore foré jusqu'au lac.

Le sommet de la glace culmine à 3 700 mètres d'altitude, et la surface du lac se trouve juste sous le niveau de la mer. D'après les contours du socle rocheux environnant, le bassin du lac serait une fosse tectonique – une zone de rupture de la terre, comme celles qui sont comblées par le lac Baïkal et la mer Rouge. Pourquoi y trouve-t-on de l'eau plutôt que de la glace ? Certains indices géologiques indiquent la présence d'un point chaud semblable (mais plus petit) à celui qui a créé les îles d'Hawaii. La surface de glace agit comme bouclier thermique, ce qui permet à la chaleur des entrailles de la terre de s'accumuler. La température locale, sous la glace, serait ainsi supérieure à la température de fusion de l'eau. De fait, les lacs subglaciaires ne sont pas rares dans l'Antarctique ; Vostok est simplement le plus grand.

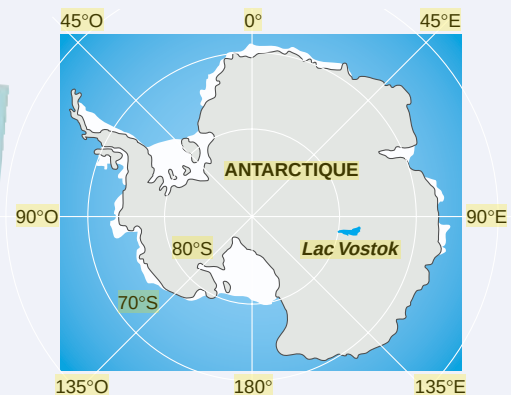
Les eaux pures du lac Vostok intéressent beaucoup les biologistes qui étudient l'évolution des micro-organismes. Depuis des années, on détecte des micro-organismes dans des environnements hostiles qui ont en commun la présence d'eau : autour

d'événements volcaniques sous-marins, dans des lacs de l'Antarctique moins profonds et couverts de glace. Quand la sonde *Galileo* a trouvé qu'Europe pouvait abriter un océan sous la glace, les biologistes, qui ne pouvaient explorer Europe, se sont rabattus sur le lac Vostok. L'épaisseur de la couche de glace au-dessus du lac et sur Europe est similaire ; excepté les pressions inférieures sur Europe (la gravité à la surface est sept fois plus faible que celle à la surface de la Terre), les conditions y sont comparables. Si la vie a colonisé le lac Vostok, pourquoi n'aurait-elle pas trouvé une niche sur Europe ?

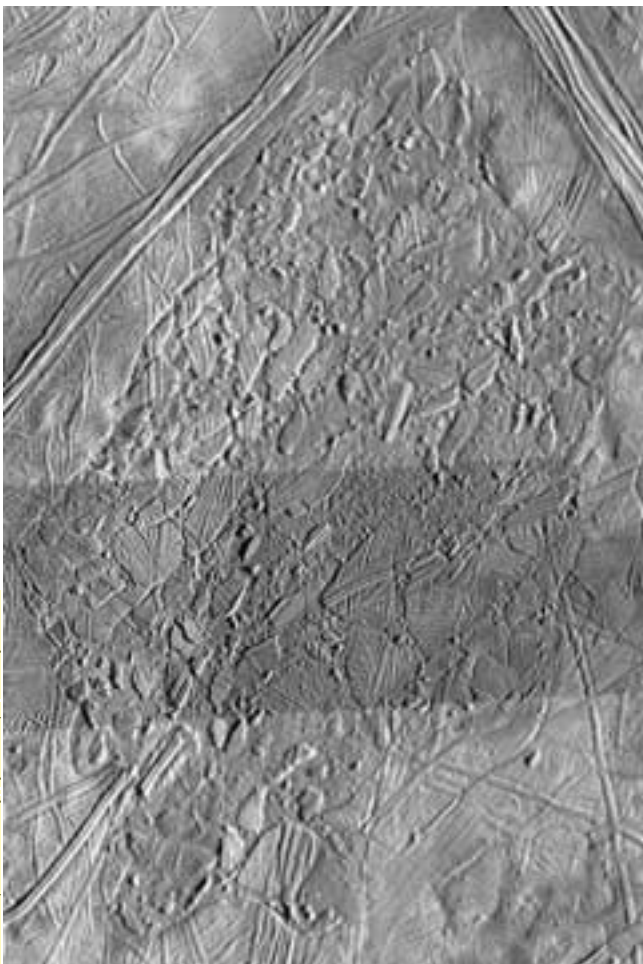
Avec d'autres membres du Laboratoire américain de propulsion spatiale (JPL), nous avons proposé l'exploration parallèle du lac Vostok et d'Europe : l'exploration du lac bénéficierait des techniques mises au point pour Europe, et un robot explorateur d'Europe ferait ses preuves sur Terre. On envisage deux systèmes complémentaires : un « cryorobot » s'enfoncerait dans la glace en faisant fondre son chemin de devant lui, et un petit sous-marin, ou « hydrobot », chercherait des traces de vie et effectuerait des analyses chimiques du milieu.

Seul un gros robot blindé supporterait les pressions élevées des mers de subsurface d'Europe. Un tel système sera difficile à expédier sur Europe. L'hydrobot doit être autonome et capable de réagir à un environnement complexe de fissures, de rochers, etc. Ses capteurs doivent étudier l'environnement et rechercher des micro-organismes, même s'ils sont très probablement différents de ceux qui sont vus ailleurs. De surcroît, les deux dispositifs doivent être totalement stériles, afin de ne pas contaminer l'eau avec des micro-organismes terrestres. On ne sait pas, aujourd'hui, construire un tel système, mais les progrès sont rapides. On envisage de commencer l'exploration de Vostok en 2003, et de rechercher l'océan d'Europe dix ans plus tard.

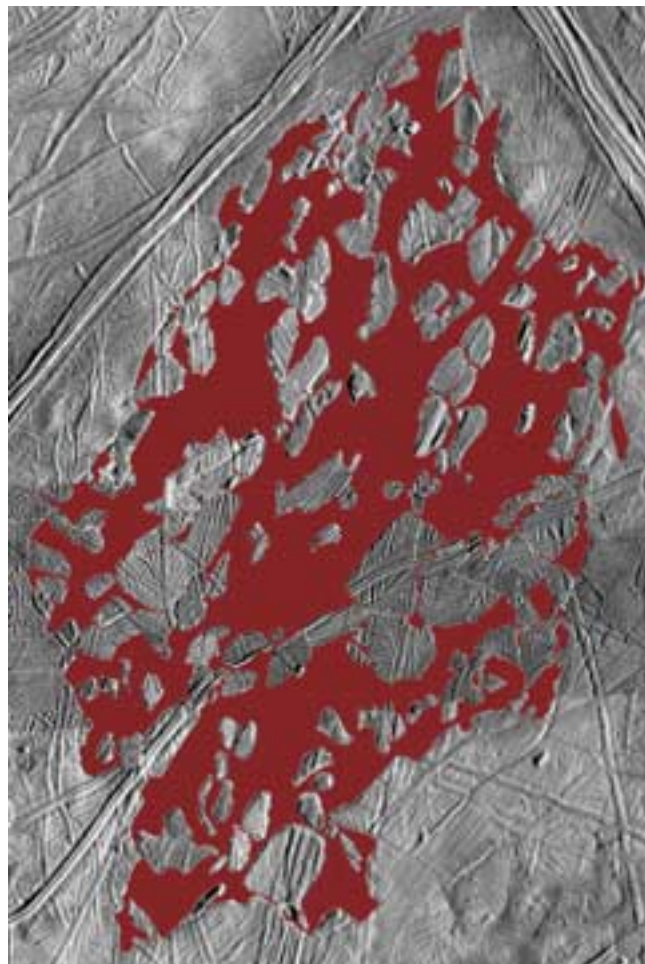
Frank CARSEY et Joan HORVATH
dirigent le projet Europe/Lac Vostok
au Laboratoire américain de propulsion spatiale (JPL),
à Pasadena.



LE LAC VOSTOK, blotti dans un fossé tectonique de l'Antarctique oriental, est couvert d'une couche de glace de quatre kilomètres d'épaisseur. Au-dessus du lac, la glace flotte comme un iceberg (à gauche) ; pour soutenir une légère montée de la surface de la glace, la surface du lac s'enfonce d'environ 400 mètres, du Sud au Nord. Le fond est peut-être tapissé de sédiments. La station russe Vostok (point rouge) se trouve à la verticale de la pointe Sud (l'échelle verticale est déformée).



8. LE CHAOS DE CONAMARA peut être reconstitué comme un puzzle. La sonde *Galileo* a observé un fatras de blocs de glace enchevêtrés dans un substrat de glace (à gauche). Dans leur reconstruction (à droite), les planétologues ont identifié le substrat (en



rouge) et remis les blocs de glace à leurs positions originales du mieux possible. Plus de la moitié des pièces manquent, transformées dans le substrat. Cette région accidentée témoigne de la vivacité géologique d'Europe.

d'Europe pourraient être sensiblement plus minces que d'autres.

Les bandes de NIMS

En plus de sa caméra, la sonde *Galileo* a emporté un spectro-imageur (l'instrument NIMS), qui analysait les rayonnements infrarouges proches. Ainsi, on a recueilli les rayonnements réfléchis par la surface d'Europe : comme prévu, le spectromètre a détecté des bandes spectrales caractéristiques de l'eau gelée. Toutefois, les bandes sont déformées, comme si une impureté était mélangée à la glace, notamment dans les régions qui apparaissent sombres et rougeâtres aux longueurs d'onde visibles. L'identité du composé qui rougit l'eau reste inconnue, mais on soupçonne des composés du soufre ou du fer. Avant la mission *Galileo*, quelques planétologues avaient prédit que les eaux de l'éventuel océan interne d'Europe seraient salées, car de nombreuses

météorites contiennent des sels. Les matériaux superficiels d'Europe révèlent peut-être la chimie d'un océan saumâtre caché.

Deux autres instruments de *Galileo* ont également étayé l'hypothèse océanique. Le photopolarimètre-radiomètre a mesuré les températures de la surface du satellite. Les hautes latitudes sont anormalement plus chaudes la nuit (d'environ cinq degrés) que les régions équatoriales. Cette différence confirmerait qu'en plus du faible chauffage externe par le Soleil, Europe possède une forte source interne de chaleur : comme nous l'avons vu, on soupçonne le chauffage par effet de marées (on exclut une source de chaleur intrinsèque, car, dans ce cas, Europe serait homogène).

L'équipe qui s'occupe du magnétomètre de *Galileo* a obtenu l'une des informations les plus fascinantes sur l'état actuel de l'intérieur d'Europe. Les satellites galiléens sont plon-

gés dans le puissant champ magnétique de Jupiter. Les mesures du champ ambiant dans le voisinage d'Europe montrent des déviations associées au satellite. Pourquoi ces déviations ? Un champ magnétique intrinsèque à Europe les expliquerait si l'axe magnétique était très incliné par rapport à l'axe de rotation. D'autres solutions sont possibles. Notamment la subsurface d'Europe pourrait être un conducteur électrique où le champ magnétique jovien variable induirait un champ magnétique. Dans cette seconde hypothèse, la conductivité du conducteur interne devrait être au moins celle de l'eau de mer salée.

Le problème n'est pas simple, car le magnétomètre a aussi détecté un champ similaire près de Callisto, un satellite dont la surface couverte de cratères ne donne aucun signe d'un océan sous la surface. Les autres grands satellites du Système solaire posséderaient-ils un océan interne