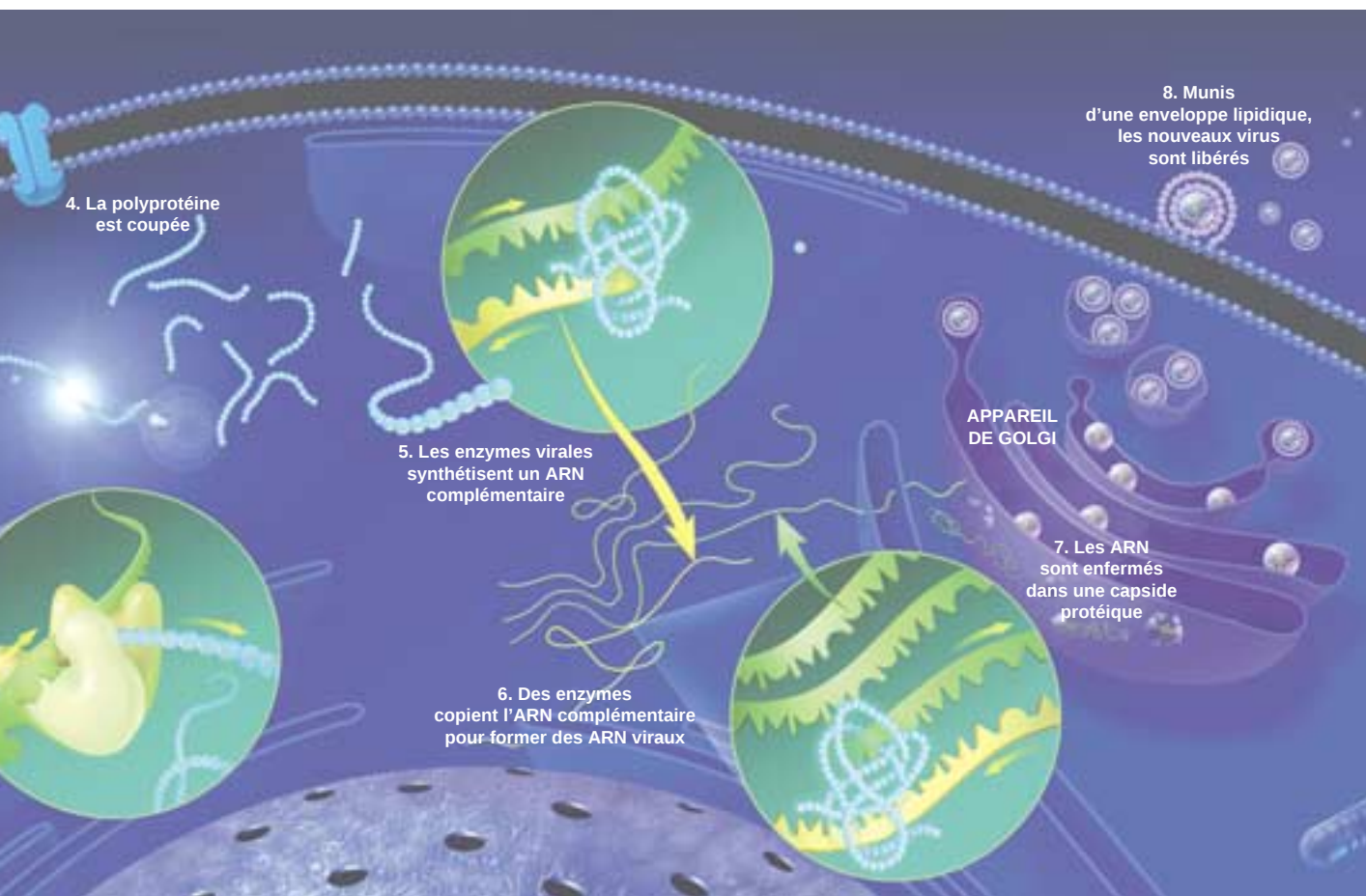




Keith Kasrot, d'après Charles M. Rice, Washington University School of Medicine

élucidée par cristallographie aux rayons X ; cette analyse permet la conception rationnelle d'inhibiteurs de ces enzymes. Plusieurs sociétés, notamment *Schering-Plough*, *Agouron Pharmaceuticals*, *Eli Lilly* et *Vertex Pharmaceuticals*, mettent aujourd'hui au point des inhibiteurs de la protéase et de l'hélicase de l'hépatite C. Les essais cliniques commenceront sans doute dans quelques années. La polymérase, dont on a très récemment identifié la structure tridimensionnelle, est également une cible possible.

En 1999, à Mayence, Ralf Bartenschlager et ses collègues ont étudié une molécule d'ARN qui comporte les régions codant les enzymes du virus ; cette structure qui se reproduit dans des lignées de cellules hépatiques cancéreuses sera sans doute utile pour tester des médicaments ciblés contre ces enzymes. Cependant, le virus ne développera-t-il pas une résistance vis-à-vis de ces différents agents thérapeutiques ?

On traiterait également les malades si l'on parvenait à bloquer l'activation des cellules hépatiques étoilées : on inhiberait ainsi la fibrose.

L'activation de ces cellules est commandée par des cytokines, des molécules qui agissent comme des signaux chimiques, que des cellules du foie nommées cellules de Kupffer libèrent quand elles sont stimulées par les lymphocytes. L'inhibition de ce mécanisme empêcherait la plupart des conséquences néfastes d'une infection par l'hépatite C.

Par ailleurs, la Société *Ribozyme Pharmaceuticals* met au point des ribozymes, c'est-à-dire de courts fragments d'ARN qui coupent des séquences particulières des petites zones terminales du génome viral. Cependant, on doit aujourd'hui administrer beaucoup de ribozymes pour qu'une quantité suffisante arrive dans les cellules infectées. C'est aussi le cas d'autres traitements novateurs, notamment la thérapie génique, destinée à rendre les cellules du foie résistantes à l'infection par l'administration d'un ARN « antisens », susceptible d'inhiber des gènes précis, ou par l'injection de protéines qui activent un mécanisme cellulaire d'autodestruction quand elles sont coupées par la protéase de l'hépatite C.

En France, le Plan de lutte contre l'hépatite C, prévu sur quatre ans, dispose d'un budget d'environ 90 millions de francs, répartis entre le renforcement de l'accès au dépistage, l'amélioration de la prise en charge, la réduction des risques de contamination, la recherche et la surveillance épidémiologique. Les autorités ont conscience de l'enjeu : l'amélioration des thérapies et la mise au point d'un vaccin en dépendent.

Adrian DI BISCEGLIE est professeur de médecine à l'École de médecine de l'Université de Saint Louis. Bruce BACON dirige le Département de gastro-entérologie et d'hépatologie de l'École de médecine de l'Université de Saint Louis.

Christian BRÉCHOT et Stanislas POL, *Hépatites virales*, ESTEM AUPELF-UREF, 1993.

Hépatites virales : dépistage, prévention, traitement, INSERM, 1997.

Jill-Patrice CASSUTO et Brigitte REBOULOT, *Les hépatites*, Odile Jacob, 1998.

Secrétariat d'État à la Santé et à l'Action sociale, *Les chiffres clés : SIDA et hépatite C*, Flammarion, 1999.

L'océan caché d'Europe

R. PAPPALARDO • J. HEAD • R. GREELEY

De nombreuses structures sur la fascinante surface d'Europe, le satellite glacé de Jupiter, laissent penser qu'un océan d'eau liquide se cache sous la surface. Comment en avoir la preuve ?

La vie est-elle apparue ailleurs que sur Terre dans le Système solaire ? Après trois décennies d'exploration des planètes et de leurs satellites naturels, les havres possibles de la vie restent peu nombreux. Le plus intrigant est sans doute Europe, un satellite de Jupiter couvert de glace.

Depuis sa découverte par Galilée en 1610 et jusqu'au milieu du XX^e siècle, Europe n'est qu'une tête d'épingle lumineuse, voisine de Jupiter, même dans les télescopes les plus puissants. Dans les années 1960, les études spectroscopiques montrent que le satellite, comme bien d'autres corps situés aux confins du Système solaire externe, est couvert de glace. À des températures superficielles de 110 kelvins (–163 °C) près de l'équateur et de 50 kelvins (–223 °C) aux pôles, cette glace doit être aussi dure que la roche. Toutefois, les astronomes n'ont alors aucun moyen de sonder plus profondément ce corps céleste et ils ne s'attendent d'ailleurs pas y trouver grand-chose.

Les images transmises par les sondes spatiales, depuis une vingtaine d'années, ont révélé une surface jeune et incroyablement déformée. Quelque part sous la croûte gelée, il y aurait un intérieur chaud et mobile. Est-ce de la glace ? Ou les entrailles d'Europe sont-elles suffisamment chaudes pour abriter un océan d'eau liquide ? Dans ce dernier cas, la vie serait-elle apparue au sein de ces abysses obscurs ?

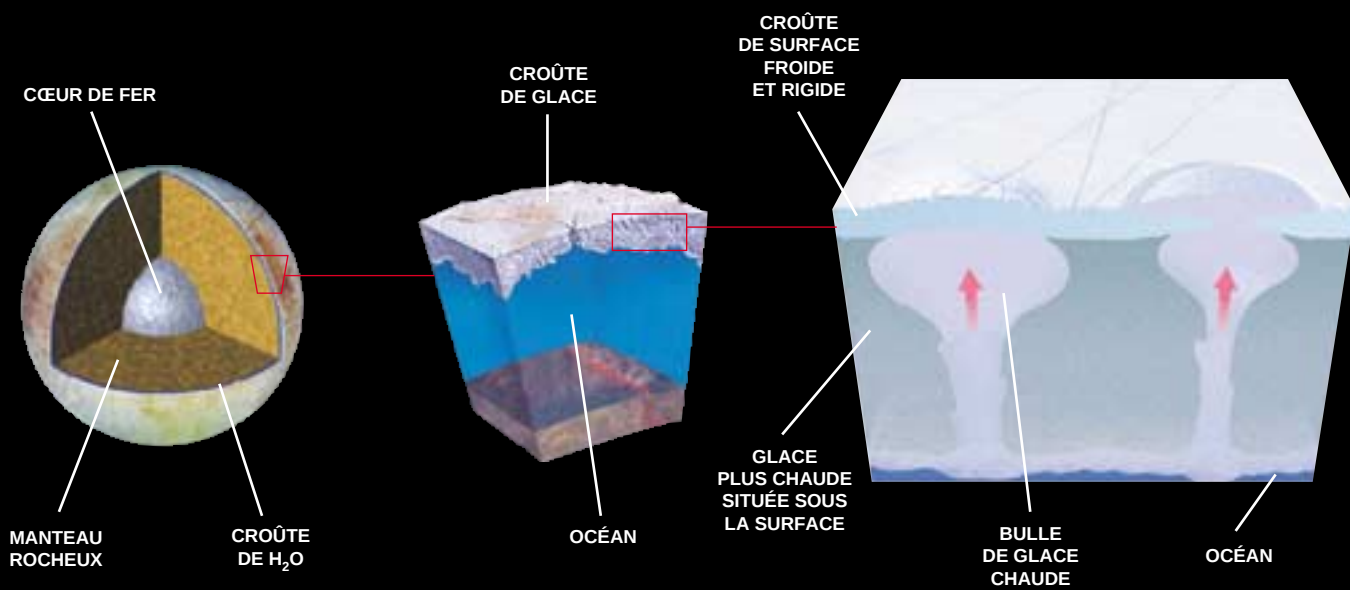
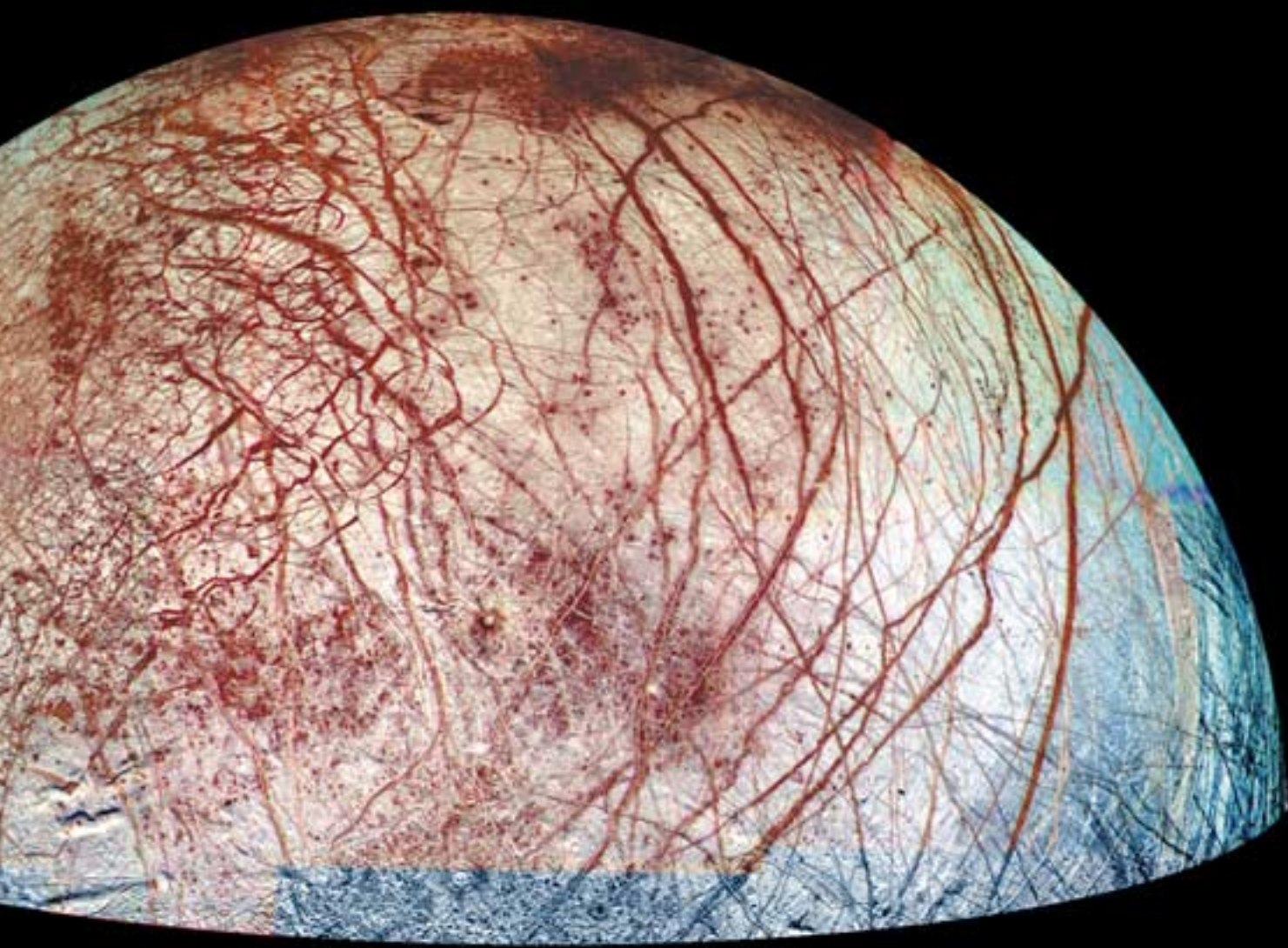
Les planétologues explorent ces questions depuis les survols de Jupiter et de ses satellites par les sondes

Voyager, en 1979 (voir *Les satellites galiléens de Jupiter*, par Laurence Soderblom, *Pour la Science*, mars 1980). En route pour Uranus et Neptune, ces sondes ne s'approchèrent pas beaucoup des satellites joviens, mais les images qu'ils envoyèrent étaient fascinantes. Europe ressemblait à une balle de corde, ses plaines brillantes traversées de bandes et de stries. Les planétologues ont remarqué que les faces opposées de certaines bandes sombres se correspondent parfaitement. D'une manière ou d'une autre, la surface gelée brillante a été violemment arrachée, exposant des matériaux sombres suffisamment fluides pour s'infiltrer dans les ouvertures : ces formations ressemblent aux craquelures pleines de liquide entre des plaques flottantes de banquise terrestre.

À la surprise générale, les sondes *Voyager* ont trouvé peu de grands cratères d'impact sur Europe. Or, la surface d'une planète accumule lentement les cratères, à mesure que les débris de comètes et d'astéroïdes la percutent. L'absence de cratères visibles indique donc que des événements volcaniques ou tectoniques ont façonné sa surface dans un passé relativement récent. Compte tenu du nombre de comètes croisant l'orbite de Jupiter, Eugene Shoemaker a estimé qu'un cratère de diamètre supérieur à dix kilomètres devait se former en moyenne tous les 1,5 million d'années. À partir des quelques cratères connus sur Europe, les astronomes estiment qu'Europe aurait sur sa surface 45 cratères de cette

1. EUROPE apparaît comme une coquille d'œuf fracturée. Une matière rougeâtre a suinté dans les crevasses ouvertes par les forces de marées dues à Jupiter. La rareté des cratères indique que la surface est géologiquement jeune. Les couleurs de cette photographie prise par la sonde *Galileo* sont réelles, mais accentuées. D'autres instruments de la sonde ont découvert que l'intérieur d'Europe est principalement rocheux, avec une couche externe d'eau (liquide ou solide) d'environ 100 kilomètres d'épaisseur (en bas à droite). L'essentiel de cette eau doit être liquide ou semi-liquide pour expliquer les formations superficielles, tels les tertres circulaires soulevés par des bulles ascendantes de glace relativement chaude (extrême droite), qui perforeront de temps en temps la surface.





taille. Sa surface serait alors âgée d'à peine 30 millions d'années, un clin d'œil aux échelles géologiques. Évidemment, les grands cratères d'Europe se seraient progressivement aplatis si l'intérieur était chaud. Dans cette hypothèse, le satellite pourrait encore être actif aujourd'hui.

Ces suppositions demandaient à être confirmées, car les images de *Voyager* étaient trop imprécises ; on ne voyait pas les cratères plus petits. À certains endroits, on voyait un terrain moucheté, plein de taches sombres, de tertres et de fosses, mêlé aux plaines brillantes. Des cratères se cacheraient-ils dans ces régions curieuses, auquel cas la surface du satellite serait plus ancienne ? Du reste, comment un corps aussi petit serait-il encore actif ? Des corps de taille similaire, comme la Lune, ne sont que des sphères rocheuses inertes, depuis longtemps dépourvues de leur chaleur interne, d'origine radioactive. En toute logique, Europe devrait être maintenant froide et inerte.

Pourtant les astronomes ont découvert qu'une autre source de chaleur pouvait chauffer Europe : les effets de marées alimentent le volcanisme de Io, la voisine d'Europe. Des quatre grands satellites de Jupiter – Io,

Europe, Ganymède et Callisto –, les trois premières font partie d'une valse orbitale élégante nommée résonance de Laplace. Avec la régularité d'une horloge, chaque fois que Ganymède effectue une révolution autour de Jupiter (avec une période de 7,2 jours terrestres), Europe parcourt deux orbites (3,6 jours de période) et Io quatre orbites (1,8 jour de période). Sur leurs orbites allongées, au cours de chaque révolution orbitale, elles s'approchent, puis s'éloignent de leur planète parente. Ces forces de gravitation provoquent alors des marées hautes et basses sur chaque satellite, c'est-à-dire des déformations de ces corps, avec des frottements qui se dissipent en chaleur.

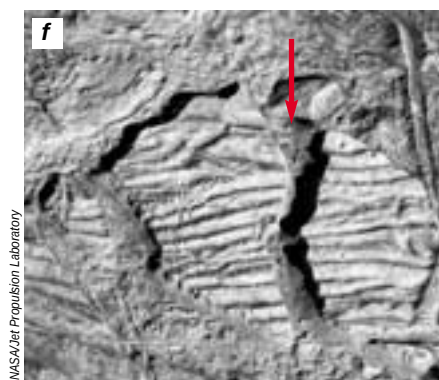
Des marées qui chauffent

Les effets de ces marées se ressentent surtout sur Io, plus proche de Jupiter. La température interne de Io, chauffée par cette dissipation, atteint le point de fusion de la roche, ce qui déclenche des éruptions volcaniques continues. Sur Europe, plus éloignée, le chauffage est moindre. Cependant, des calculs récents indiquent que son intérieur pourrait demeurer suffisamment

chaud pour fondre la glace à une profondeur de 10 à 30 kilomètres. Ainsi, sous la surface de glace, un océan couvrirait la planète.

Après les sondes *Voyager*, les astronomes ont dû attendre 20 ans avant une nouvelle exploration des satellites joviens. L'engin spatial *Galileo* s'est mis en orbite autour de Jupiter en décembre 1995. Depuis, sa trajectoire l'a conduit tous les quelques mois à proximité de l'un des satellites galiléens.

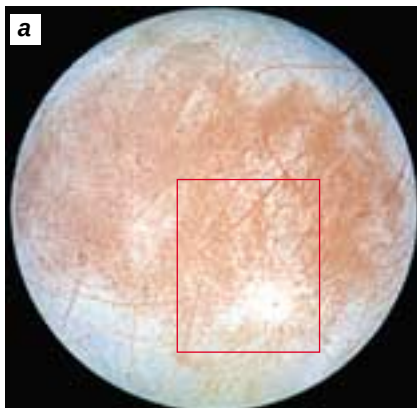
Même sans images, les informations récoltées sont primordiales. À chaque survol, les ingénieurs et les scientifiques ont enregistré le signal radio de l'astronave, afin de mesurer le champ gravitationnel d'Europe. Un satellite en rotation et déformé par effet de marée est légèrement aplati aux pôles, de sorte que le champ gravitationnel n'est pas symétrique. Cette irrégularité engendre de petits décalages de la fréquence du signal de *Galileo*, grâce auxquels les chercheurs ont calculé l'aplatissement du satellite et, par suite, la répartition de sa masse interne : à une vitesse de rotation et à masse égales, un satellite où la masse est plus concentrée est moins aplati qu'un satellite dont la masse est uniformément répartie.



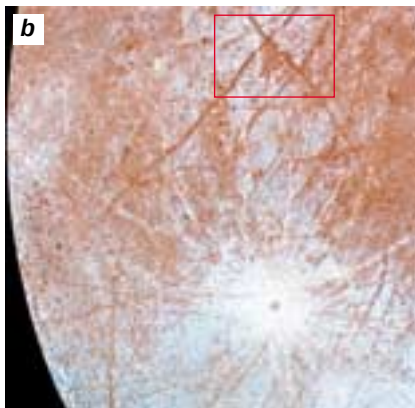
1 KILOMÈTRE

2. DES BLOCS DE GLACE GÉANTS de la taille d'une petite ville apparaissent progressivement sur cette série d'images de *Galileo*. Un colossal X formé de deux rides (a, b, c) marque l'endroit, alors que les images font un zoom avant sur une tache sombre nommée «Chaos de Conamara» (d, e) et ensuite sur des blocs individuels de type iceberg (f). De la glace plus chaude que celle de surface, une bouillie glacée ou de l'eau, ont jadis comblé la «mer» où les blocs sont maintenant immobiles. Une vue d'artiste (à droite), donne un point de vue à quelques centaines de mètres au-dessus de la surface (flèche dans l'image supérieure).





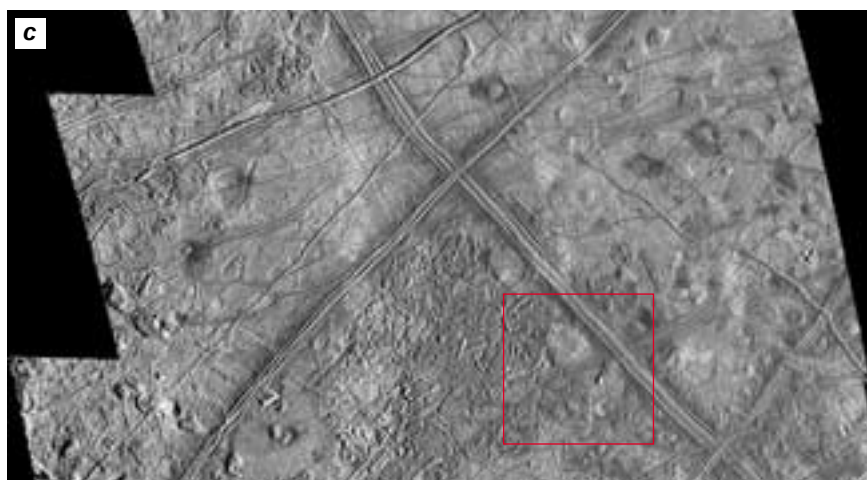
EUROPE



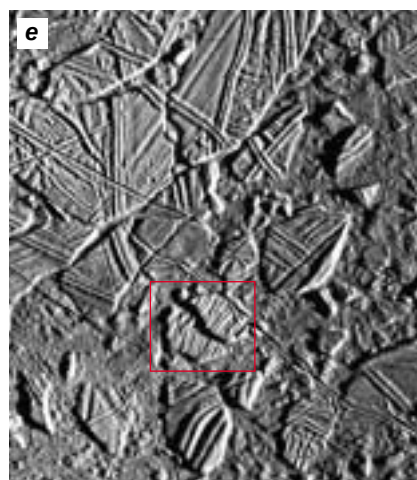
100 KILOMÈTRES



10 KILOMÈTRES



20 KILOMÈTRES



5 KILOMÈTRES

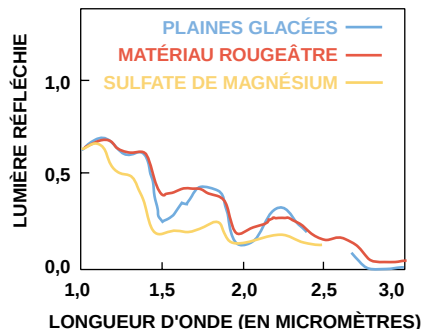
NASA/Jet Propulsion Laboratory



Alfred T. Kanajian



NASA/Jet Propulsion Laboratory



S. Donelson, d'après T.B. McCord, University of Hawaii

3. UNE TACHE ROUGEÂTRE indique l'endroit où un liquide salin s'est répandu sur la surface d'Europe (à gauche). Des mesures spectrales (à droite) ont montré que les plaines brillantes environnantes (courbe bleue) se composent principalement d'eau gelée. Le matériau rougeâtre (courbe rouge) a un spectre lumineux qui semble être celui du sulfate de magnésium (courbe jaune).

Tapisseries et soutènement hydraulique

Avec une densité moyenne de 3,04 grammes par centimètre cube, Europe est certainement un corps rocheux. Les données gravimétriques indiquent que la roche s'intercale entre un noyau central de fer et une croûte externe d'eau ou de glace. L'épaisseur de cette croûte est comprise entre 80 et 170 kilomètres, selon les densités possibles pour le noyau de fer et pour le manteau rocheux, avec 100 kilomètres comme valeur la plus probable. Si une partie notable de cette croûte est liquide, son volume est supérieur à celui de tous les océans terrestres. Toutefois les données gravimétriques sont insuffisantes pour savoir si l'eau est liquide ou solide. L'examen des photographies en dit-il plus ?

L'équipe d'imagerie de *Galileo* a découvert un monde à nul autre pareil. Sa surface forme un entrelacs compliqué de fractures, de rides, de bandes et de taches. Les fractures sont sans doute nées quand les forces de marées ont déformé la surface gelée jusqu'à ce qu'elle cède. Les rides, également très nombreuses, courent en surface par paires, séparées par une vallée étroite. Les planétologues envisagent une résurgence d'eau liquide ou de glace chaude le long des fractures. Un « magma » aqueux ou verglacé a pu forcer le passage sous de la glace rigide, proche de la surface, la gauchissant en une double ride. Une bouillie glacée a aussi pu jaillir en surface et se solidifier aussitôt en forme de ride. Par endroits, les rides parallèles sont nombreuses : on suppose que le mécanisme de formation de doubles rides s'est répété. Les plus larges sont en général flanquées de

raies sombres, rougeâtres, aux bords diffus : la bouffée de chaleur associée à la formation des rides a-t-elle tracé ces frontières assombries, par volcanisme de glace partiellement fondue ou par sublimation de la surface sale gelée ? Quel que soit le mécanisme exact de formation, les rides révèlent une histoire dynamique d'Europe. L'échauffement par effet de marées engendre des structures particulières, et explique certaines fissures et rides les plus récentes. Toutefois, les contraintes responsables des fissures semblent s'être aussi déplacées.

À partir des enchevêtrements de fractures et de rides apparemment aléatoires, les astronomes ont essayé de comprendre les mécanismes responsables de l'étirement et de la déformation d'Europe. L'échauffement par effet de marées engendre des structures particulières, et explique certaines fissures et rides les plus récentes. Toutefois, les contraintes responsables des fissures semblent s'être aussi déplacées.

Cette particularité s'explique si la surface d'Europe a tourné plus vite que son intérieur. La plupart des satellites naturels du Système solaire sont en rotation synchrone : sous l'action du couple des forces de marées, ils tournent sur eux-mêmes exactement une fois par révolution orbitale, montrant toujours la même face à leurs planètes parentes (c'est pour cette raison que nous voyons toujours la même face de la Lune). Si la surface gelée d'Europe était découplée – séparée mécaniquement – de son manteau rocheux, la gravité de Jupiter engendrerait une rotation de la surface d'Europe légèrement plus rapide que celle du noyau. Un océan sous la surface agirait comme un lubrifiant et permettrait à la couche de glace de tourner de manière asynchrone.

Rien ne permet d'affirmer que la rotation asynchrone d'Europe se poursuit aujourd'hui ou que la sur-

face enregistre un ancien motif d'alignements structuraux, aujourd'hui inactifs. Les planétologues ont comparé les positions de certaines structures dans les images de *Galileo* à leurs positions dans les images de *Voyager* et n'ont trouvé aucun changement mesurable sur cette période de 20 ans. Aujourd'hui, on sait seulement que la différence de vitesse de rotation entre la surface et l'intérieur, si elle existe, est inférieure à un tour tous les 10 000 ans.

La caméra de *Galileo* a aussi visé les bandes sombres en forme de coin, où les images imprécises de *Voyager* indiquaient que les bandes parsemées de rides étaient séparées. Des analyses récentes ont confirmé que les faces opposées de ces bandes se correspondent parfaitement. La matière sombre entre ces bandes est finement striée avec, en général, une rainure prononcée et un certain degré de symétrie (voir la figure 5). Ces bandes sont peut-être les équivalents gelés des dorsales océaniques terrestres, où les plaques tectoniques s'écartent et où du magma sort, formant de nouvelles roches. Si c'est le cas, la glace sous la surface a dû être mobile et chaude lors de la formation des structures. Sur Terre, la tectonique des plaques impose un bilan de matière nul : la matière qui s'épanche en surface est compensée par de la matière qui plonge dans les zones de subduction. Aucune zone de ce genre n'a encore été identifiée sur Europe.

L'apparition de bulles

Le mystérieux terrain moucheté fournit d'autres indices sur l'intérieur d'Europe. Les images que *Galileo* en a prises ont 10 à 100 fois plus de détails que celles de *Voyager*. Les images montrent un terrain criblé de structures circulaires et elliptiques que l'équipe d'imagerie a nommées *lenticulae*, mot latin qui signifie « taches de rousseur ». Beaucoup de ces structures sont des dômes, certaines sont des fosses, d'autres sont des taches sombres lisses ; d'autres encore ont une texture rugueuse et brouillée. Les sommets des dômes ressemblent à des parties de plaines ridées, plus anciennes, signe que les dômes ont dû se former lors du soulèvement de plaines.

La diversité des *lenticulae* s'explique si l'on suppose que la couche gelée

d'Europe s'est comportée comme une lampe à lave planétaire : des bulles de glace chaude montent à travers de la glace de surface plus froide (dans les lampes à lave, des bulles d'huile montent et descendent dans de l'alcool).

Les dômes se sont alors formés lorsque les bulles ont poussé contre la base de la surface. Les textures rugueuses correspondent peut-être aux endroits où les bulles ont disloqué et détruit les plaines ; les plaques sombres et lisses

seraient alors, sans doute, de l'eau de fonte libérée par les bulles et rapidement regelée.

Les bulles – diapirs, en langage technique – se formeraient naturellement si la couche gelée d'Europe



4. CETTE TEXTURE RIDÉE est l'un des paysages les plus étranges du Système solaire. La région de *Thera* (partie gauche de la mosaïque) contient des plaques de glace brillantes et détachées. La région de *Thrace* (partie droite) est allongée, couverte de monticules, et son

altitude est supérieure. Elle se jette dans une bande grise, *Linea Libya*, vers le Sud. Ces régions chaotiques se sont peut-être formées quand un océan souterrain a dissous la croûte glacée du satellite ou quand des bulles ascendantes de glace plus chaude ont disloqué la surface.



Max Coon, Northwest Research Associates

5. LES FRACTURES DANS LA GLACE sur Terre (à gauche) ressemblent superficiellement à celles que l'on voit sur Europe (à droite). Dans les mers polaires terrestres, la banquise se brise et expose de l'eau liquide, plus sombre, qui gèle rapidement. Les fissures peuvent se refermer et soulever des rides. Sur Europe, les bandes sombres et les rides appariées résultent probablement de mécanismes de tectonique. L'échelle est très différente : la brèche dans la glace de mer est large de 100 mètres, tandis que la bande sombre sur Europe mesure plus de 15 kilomètres de largeur.



NASA/Jet Propulsion Laboratory ; Roland Wagner, German Aerospace Research Agency

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

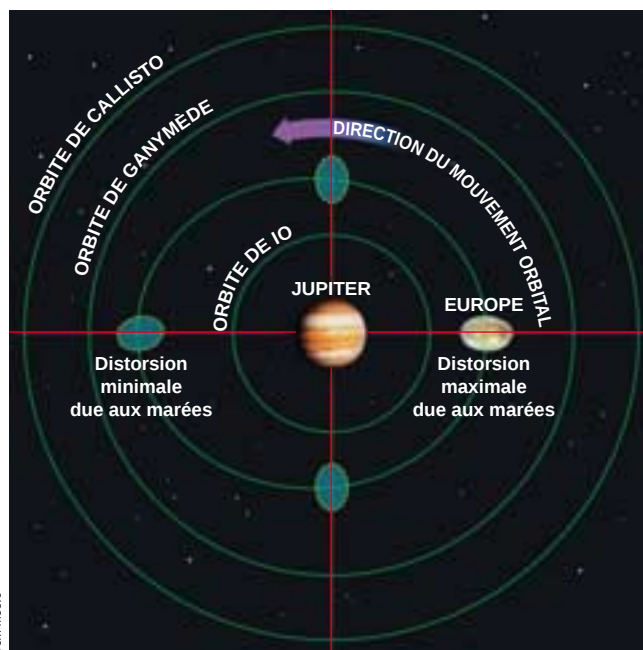
comprendre leur taux de collision avec Europe. Ils ont ainsi confirmé l'idée initiale de Shoemaker : les comètes sont les principaux projectiles qui chutent sur les satellites de Jupiter, les astéroïdes étant trop peu nombreux. Les estimations récentes

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.

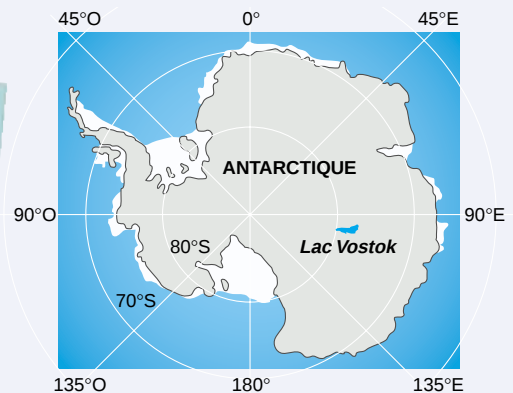
Les eaux pures du lac Vostok intéressent beaucoup les biologistes qui étudient l'évolution des micro-organismes. Depuis des années, on détecte des micro-organismes dans des environnements hostiles qui ont en commun la présence d'eau : autour

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 ?

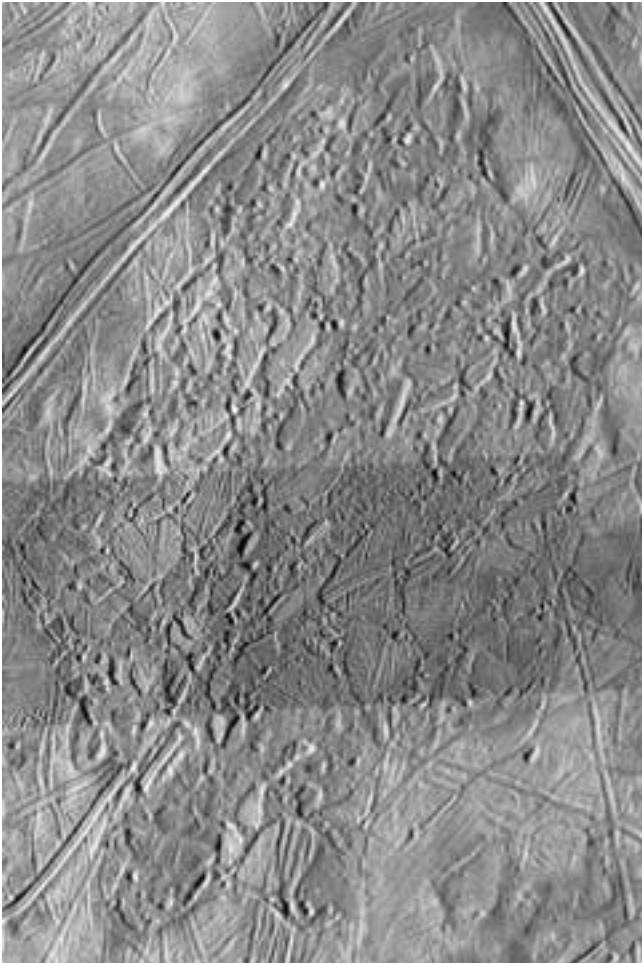
Avec d'autres membres du Laboratoire américain de propulsion spatiale (JPL), nous avons proposé l'exploration parallèle du lac Vostok et d'Europe : l'exploration du lac bénéficierait des techniques mises au point pour Europe, et un robot explorateur d'Europe ferait ses preuves sur Terre. On envisage 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.

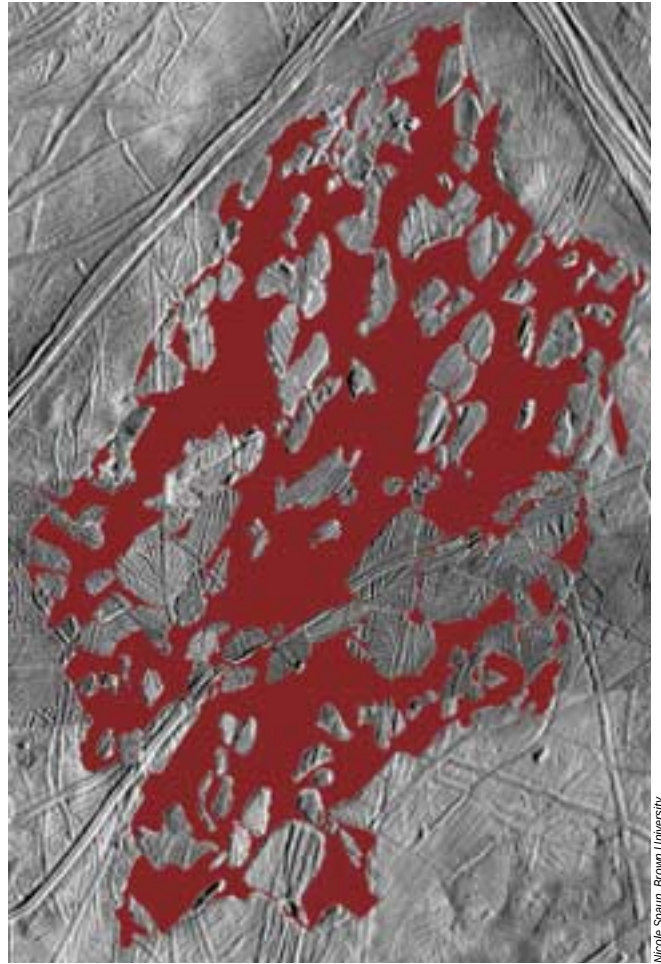
Frank CARSEY et Joan HORVATH
dirigent le projet Europe/Lac Vostok
au Laboratoire américain de propulsion spatiale (JPL),
à Pasadena.



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

salé, vestige de leurs passés plus chauds? Lors du dernier survol d'Europe, le 3 janvier 2000, le magnétomètre a mesuré un champ magnétique variable avec un pôle Nord magnétique qui se déplace. Ce dernier résultat corrobore l'hypothèse d'un champ induit et d'une surface à la conductivité analogue à celle de l'eau salée.

Les arguments théoriques et expérimentaux en faveur d'un océan global situé sous la surface d'Europe s'accumulent. Pourtant, la présence de cet océan n'est pas démontrée : la présence de glace chaude, sous la surface, conduirait à de nombreux effets analogues à ceux qui apparaîtraient si un océan est caché sous la glace de surface. Bien que la surface du satellite ait peu de cratères et qu'elle soit probablement jeune, on n'a pas la preuve que le satellite soit encore le siège d'une activité géologique. Europe aurait eu naguère un océan, qui serait aujourd'hui complètement gelé. La seule manière de s'en assurer sera de placer un engin spatial en orbite autour d'Europe.

La sonde *Europa Orbiter* de la NASA devrait quitter la Terre en 2003 et se mettre en orbite autour de Jupiter quatre ans plus tard. Après deux autres années, elle tournera autour d'Europe à une altitude moyenne de 200 kilomètres. En suivant précisément sa trajectoire et son altitude, on explorera le champ gravitationnel et la forme d'Europe avec suffisamment de détails pour détecter les marées solides, lors de l'orbite du satellite autour de Jupiter. Si Europe possède une mer interne, sa surface devrait monter et descendre de 30 mètres à chaque orbite de 3,6 jours ; sans océan, le renflement ne serait que de un mètre. Ainsi *Europa Orbiter* dénouera la question de l'existence d'un océan.

Entre-temps, une caméra embarquée photographiera le satellite, et un radar sondera la subsurface en quête de zones de fonte peu profondes. On espère que les ondes radar pénétreront dans la croûte de glace d'Europe, détecteront un océan sous-jacent, de la même manière que le lac Vostok, dans l'Antarctique, a récemment été découvert par radar, sous quatre kilomètres de glace froide (voir l'encadré de la page 51).

La vie semble nécessiter trois ingrédients fondamentaux : l'énergie, le carbone et l'eau liquide. Europe pourrait posséder les trois. Les effets de marées chaufferaient le manteau rocheux et

conduiraient à du volcanisme au fond de l'océan d'Europe. Dans les régions volcaniques des fonds océaniques terrestres, l'eau circule à travers la roche chaude et arrive dans la mer, enrichie en substances chimiques nutritives. Des communautés biologiques prospèrent autour de ces sources chaudes. Cependant, elles dépendent pour une grande part de l'écosystème de surface ; plus particulièrement, l'oxygène dissous dans l'eau de mer provient de la photosynthèse (voir *Les sources chaudes des fonds océaniques*, par John Edmond et Karen von Damm, *Pour la Science*, juin 1983). Sur Europe, une vie abyssale serait autonome. Les ressources d'énergie chimique disponibles seraient très limitées. Une vie microbienne pourrait sans doute se développer, mais pas des organismes biologiquement complexes et variés comme ceux qui peuplent les océans terrestres.

Si la mission *Europa Orbiter* confirme l'existence d'un océan de subsurface, on voudra l'explorer. Un petit module d'atterrissage automatique pourrait analyser un échantillon de glace à la recherche de composés organiques. Un robot sous-marin pourrait se frayer un chemin à travers la croûte de glace et explorer les eaux salines d'Europe afin de répondre à la lancinante question : sommes-nous seuls dans le Système solaire?

Robert PAPPALARDO et James HEAD sont chercheurs à l'Université Brown. Ronald GREELEY est professeur de planétologie à l'Université d'Arizona. Ils travaillent tous les trois dans l'équipe d'imagerie de *Galileo*.

Baerbel K. LUCCHITTA et Laurence A. SODERBLOM, *Geology of Europa*, in *Satellites of Jupiter*, sous la direction de David Morrison, University of Arizona Press, 1982.

Michael H. CARR et al., *Evidence for a Subsurface Ocean on Europa*, in *Nature*, vol. 391, pp. 363-365, 22 janvier 1998.

Ronald GREELEY et al., *Europa : Initial Galileo Geological Observation*, in *Icarus*, vol. 135, pp. 4-24, septembre 1998.

The New Solar System, 4^e édition, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen et Andrew Chaikin, Cambridge University Press, 1998.

Une liste de sites sur Europe se trouve à l'adresse : www.pourlascience.com/numeros/pls-268/europe.htm
