

La plupart des grains du panache vont retomber à la surface sous forme de neige, mais ceux qui sont animés des vitesses les plus grandes échappent à Encelade pour aller s'accumuler dans l'anneau E. Là, du gaz ionisé érode les grains de glace et libère les nanoparticules de silice. Celles-ci accumulent alors une charge électrique communiquée par le gaz ionisé et les électrons libres, et sont alors à la merci des très intenses champs électromagnétiques de Saturne. Enfin, accélérées par les vents solaires, certaines des nanoparticules atteignent des vitesses allant jusqu'à un million de kilomètres à l'heure (environ 0,1 % de la vitesse de la lumière) et filent vers les confins du Système solaire. Il est même possible qu'une

l'intérieur d'Encelade serait aujourd'hui complètement gelé.

La petite taille de la lune et sa faible gravité lui confèrent également une dynamique interne très différente de celle de planètes aussi grosses que la Terre : au sein d'Encelade, les plus basses pressions et les températures plus modérées limitent la compaction et la consolidation du matériau qui constitue son noyau, ce qui permet à l'eau de circuler à travers la roche poreuse et de produire des processus hydrothermaux au cœur même de la lune. Ce tableau est bien différent de celui de la Terre, où la rapide augmentation de la pression et de la température avec la profondeur a pour effet de restreindre la circulation de l'eau aux derniers kilomètres de croûte avant la surface.

Le chauffage de marée est peut-être assez puissant pour porter localement l'eau à plus de 100 °C dans le noyau poreux d'Encelade

petite fraction des échappées atteigne l'espace intersidéral.

Pour élaboré, élégant et, à notre avis, véridique que soit ce scénario, il ne résout pas ce qui est devenu le mystère central d'Encelade : quelle est la source de la chaleur interne nécessaire au maintien de son océan dynamique ? Cette chaleur, qui est essentielle pour que l'eau reste liquide, ne peut clairement pas être fournie par le Soleil. Les rayons de cet astre sont environ 99 % plus faibles sur Encelade qu'au voisinage de la Terre, ce qui confère à la lune glacée une température de surface proche de celle de l'azote liquide (−196 °C).

La moitié environ de la chaleur interne de la Terre provient de la lente désintégration des isotopes radioactifs de l'uranium, du thorium et du potassium. Ce chauffage radiogénique entretient depuis des milliards d'années des températures de plusieurs milliers de degrés à l'intérieur de la Terre. Bien qu'Encelade contienne probablement des concentrations comparables d'éléments radiogéniques, avec seulement 500 kilomètres de diamètre, cette minuscule lune perd sa chaleur interne beaucoup plus efficacement que la Terre. En l'absence d'une source complémentaire de chaleur,

On pourrait s'attendre à ce que le lessivage du noyau d'Encelade accélère son refroidissement, évacuant toute chaleur radiogénique et interdisant les hautes températures nécessaires à la formation de nanoparticules de silice. Mais il y a encore une source possible d'énergie, en dehors du chauffage dû à la radioactivité, qui pourrait expliquer l'activité hydrothermale en cours sur Encelade : le chauffage par les marées.

De la même façon que les marées océaniques de la Terre résultent de l'attraction exercée par la Lune et le Soleil sur notre planète, l'intérieur d'une planète ou d'une lune qui suit une orbite excentrique non circulaire se déforme périodiquement au fil de son déplacement. Ces déformations, dues à la variation des forces gravitationnelles subies par le corps en orbite, créent une friction dans ses couches internes, friction qui à son tour produit de la chaleur.

Le chauffage de marée serait particulièrement puissant dans le noyau poreux et imprégné d'eau d'un corps tel qu'Encelade. Et effectivement, les données de *Cassini* indiquent clairement que les forces de marée exercées par Saturne ont une forte influence sur la minuscule lune : la luminosité de ses jets, donc la quantité de



matériau éjecté, varient périodiquement au fil de la révolution d'Encelade autour de la planète aux anneaux. À l'évidence, les fissures-cheminées qu'emprunte la vapeur d'eau chargée de fines particules liquides et solides pour traverser la glace ont elles-mêmes leurs parois tour à tour resserrées et écartées par les effets de marée, ce qui engendre aussi des quantités notables de chaleur.

Océan éphémère ou persistant ?

Ce que nous ignorons, c'est si l'océan observé aujourd'hui est un phénomène transitoire limité à quelques dizaines de millions d'années, ou une caractéristique persistante de la lune présente depuis des centaines de millions, voire des milliards, d'années. Tout dépend depuis combien de temps l'action des marées chauffe l'intérieur d'Encelade, ce qui dépend à son tour de la façon dont la



© Ron Miller

lune interagit avec Saturne ainsi qu'avec sa lune voisine Dioné.

Afin de comprendre ces interactions de marée, on peut considérer le système familier Terre-Lune, qui présente des ressemblances avec celui de Saturne et Encelade. La Lune provoque des marées sur Terre, et Encelade en fait de même sur Saturne. Dans l'océan terrestre, ces écoulements de marée dissipent progressivement leur énergie sous l'effet des frottements sur les littoraux et le plancher océanique, ce qui ralentit la rotation de la Terre sur elle-même de façon mesurable. Dans une centaine d'années, le jour terrestre sera ainsi 2 millisecondes plus long qu'il ne l'est aujourd'hui, et la Terre aura dissipé suffisamment d'énergie de marée lunaire pour que l'orbite de la Lune soit repoussée de près de 4 mètres.

De la même façon, les frottements de marée à l'intérieur de Saturne modifient de façon infinitésimale la rotation de la planète géante tout en augmentant la

LES FLUIDES HYDROTHERMAUX

qui percolent à travers l'intérieur chaud d'Encelade pourraient former des dépôts minéraux sur le plancher océanique, comme sur cette vue d'artiste.

distance d'Encelade à Saturne et l'excentricité de son orbite. Des excentricités plus grandes se traduisent par des effets de marée plus prononcés (et donc plus de chauffage) sur Encelade. En contrepartie, la dissipation au sein d'Encelade tend à réduire progressivement l'excentricité orbitale. Les premières estimations théoriques suggéraient qu'Encelade ne provoquerait qu'une faible friction de marée sur Saturne, ce qui aurait pour conséquence que son orbite perdrait son excentricité et donc que la durée de vie de l'océan, maintenu au chaud par les marées, ne dépasserait pas le million d'années.

Récemment, Valéry Lainey, de l'observatoire de Paris, et ses collègues (dont Gabriel Tobie) ont analysé en détail les mouvements des lunes de Saturne afin de poser des contraintes plus précises sur l'ampleur des frottements de marée à l'intérieur de la planète géante. Ils ont trouvé que ces frottements au sein de Saturne sont au moins 10 fois supérieurs à ce que prédisent les modèles simples. Si elle est exacte, cette valeur plus élevée signifierait que l'excentricité de l'orbite d'Encelade est stable et durable, et que les marées seraient assez fortes pour maintenir un océan pendant des dizaines de millions d'années au moins, et potentiellement bien plus longtemps. Or plus l'océan d'Encelade peut persister longtemps, plus grande est la probabilité que la vie puisse y émerger et prospérer.

Une autre source de chaleur : la serpentinisation

En dehors du chauffage de marée, une seconde source possible de chaleur est à considérer. Quand l'eau percole à travers la roche silicatée, elle peut hydrater et changer la nature cristalline de certains minéraux, ce qui libère d'importantes quantités de chaleur par un processus dit de serpentinisation. Renforcée par la circulation aisée de l'eau à travers le noyau rocheux et poreux riche en silicates d'Encelade, la serpentinisation pourrait dégager une puissance de plusieurs gigawatts et constituer une part importante du bilan calorifique interne d'Encelade.

Tant qu'il y a de nouveaux minéraux intacts en contact avec l'eau qui circule, cette source de chaleur va persister. Mais

au bout de quelques millions d'années, quand la roche finit par être complètement serpentinisée, elle cesse de produire de la chaleur et, en l'absence d'autres influences telles que les frottements de marée, devrait se refroidir. Il semble donc que la serpentinisation ne soit pas, à elle seule, en mesure de maintenir un océan global assez longtemps pour qu'une chimie prébiotique puisse voir le jour.

La serpentinisation pourrait tout de même contribuer à de possibles milieux biologiques dans les profondeurs d'Encelade. Sur Terre, les scientifiques ont observé des processus de serpentinisation qui alimentent les événements hydrothermaux de la Cité perdue et d'autres sites sous-marins. En plus de produire de la chaleur, ces réactions produisent de l'hydrogène, du méthane et d'autres composés organiques qui assurent la subsistance des microbes formant la base de la chaîne alimentaire de leurs écosystèmes isolés et privés de rayonnement solaire. En étudiant de tels organismes, certains chercheurs se sont demandé si la vie a vraiment besoin du Soleil.

Une réflexion renouvelée sur les possibilités de vie extraterrestre

À la fin des années 1980, Michael Russell, alors à l'université de Strathclyde en Écosse, a avancé avec des collègues l'hypothèse que des sources hydrothermales alcalines pourraient avoir été le berceau des premiers organismes vivants sur la jeune Terre. Même si l'on n'en connaissait aucun sur Terre à cette époque, Michael Russell affirmait que de tels sites offriraient un environnement relativement clément et néanmoins riche en énergie où la chimie prébiotique aurait pu former les précurseurs des membranes, des métabolismes et des molécules autoreproductrices modernes.

Peu de personnes avaient pris l'idée suffisamment au sérieux pour l'examiner ou en débattre en dehors de cercles universitaires très restreints. Mais la découverte de la Cité perdue a ravivé l'intérêt envers l'hypothèse de Michael Russell, la catapultant au premier plan des débats contemporains sur l'origine de la vie. Désormais, la découverte d'un environnement similaire au sein d'Encelade (et la possibilité qu'il en existe sur

d'autres lunes glacées, telles qu'Europe, autour de Jupiter) modifie une nouvelle fois notre réflexion sur les possibilités de vie ailleurs dans le Système solaire. La vie n'est plus nécessairement confinée aux surfaces chaudes et humides de planètes rocheuses éclairées par le Soleil : elle pourrait s'épanouir dans un éventail beaucoup plus large d'environnements, en étant alimentée pour tout ou partie par la chaleur des radio-isotopes, de la serpentinisation et des forces de marée.

Encelade et Europe pourraient n'être que la partie émergée de l'iceberg, car selon divers indices, il pourrait aussi exister des océans souterrains sur Ganymède et Callisto (des lunes de Jupiter), ainsi que sur Titan et Mimas (des lunes de Saturne), et même sur la planète naine Pluton. Les chercheurs qui, comme nous, s'intéressent à la vie extraterrestre ne font que commencer à s'atteler à ces possibilités spéculatives et à leurs implications, mais il semble de plus en plus probable que nous ayons jusqu'à présent largement sous-estimé la fécondité biologique de l'Univers.

Pour l'heure, nous n'avons pas la certitude que l'intérieur des lunes glacées ait vraiment tous les ingrédients nécessaires à une habitabilité extraterrestre. La durée et l'intensité de l'activité hydrothermale au sein d'Encelade restent une question ouverte, et la possibilité d'une activité hydrothermale au sein d'Europe n'est guère plus qu'une spéculation. La Nasa comme son homologue l'ESA, l'Agence spatiale européenne, explorent activement ces questions et programment des missions vers les lunes glacées de Jupiter, qui pourraient partir à la recherche de panaches semblables à celui d'Encelade à la fin des années 2020 ou au début des années 2030.

Cassini va continuer à étudier Encelade jusqu'à la fin de sa mission en 2017, quand elle s'écrasera dans les profondeurs de Saturne afin de ne pas risquer de contaminer Encelade ou une autre lune glacée avec des formes de vie terrestre. À terme, nous pourrions y envoyer une nouvelle génération de sondes qui se poseront sur Encelade et y effectueront des analyses *in situ*, voire y prélèveront des échantillons pour les rapporter sur Terre. Pour l'instant, de telles missions n'existent que dans les espoirs et les rêves des astrobiologistes, mais peut-être plus pour très longtemps. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

V. Lainey *et al.*, New constraints on Saturn's interior from *Cassini* astrometric data, *Icarus*, vol. 281, pp. 286-296, 2017.

O. Čadež *et al.*, Enceladus's internal ocean and ice shell constrained from *Cassini* gravity, shape, and libration data, *Geophysical Research Letters*, vol. 43(11), pp. 5653-5660, 2016.

B. J. Travis et G. Schubert, Keeping Enceladus warm, *Icarus*, vol. 250, pp. 32-42, 2015.

H.-W. Hsu *et al.*, Ongoing hydrothermal activities within Enceladus, *Nature*, vol. 519, pp. 207-210, 2015.

M. Běhouňková *et al.*, Tidally-induced melting events as the origin of south-pole activity on Enceladus, *Icarus*, vol. 219, pp. 655-664, 2012.

C. Porco, Le monde tumultueux d'Encelade, *Pour la Science*, n° 376, février 2009.

La science-fiction passée au crible de la science !



PAR LES
CHRONIQUEURS
DE LA RUBRIQUE
SCIENCE & FICTION
DE **SCIENCE**

Un ouvrage idéal pour découvrir les sciences qui gouvernent notre monde... en compagnie de Godzilla, Superman et des extraterrestres !

Belin:

Inscrivez-vous à la newsletter sciences sur editions-belin.com