

pluies inattendues de nanoparticules véloces ont frappé le CDA comme de la grenaille. Des années plus tard, après la découverte du panache, Frank Postberg a examiné la distribution en tailles et en fréquences des nanoparticules dans les données du CDA. Il a remarqué qu'aucune ne dépassait 20 nanomètres et que toutes étaient essentiellement composées de silice (SiO_2), principal composant du quartz et du sable de plage.

Des nanoparticules de silice dans les jets

En utilisant des simulations pour déterminer les trajectoires les plus probables décrites par les nanoparticules de silice, Hsiang-Wen Hsu, de l'université du Colorado à Boulder, a pressenti qu'elles provenaient des parties externes de l'anneau E de Saturne. Et comme nous savions que cet anneau est engendré par Encelade, la découverte suggérait fortement que les nanoparticules avaient pour origine la lune glacée. Leur composition s'est révélée être la preuve patente de l'activité hydrothermale d'Encelade.

De la silice pure éjectée d'Encelade, voilà qui était surprenant : la seule source plausible de ce composé se trouverait en profondeur sous la glace et l'océan, dans le noyau rocheux de la lune, où le silicium se trouve en général chimiquement lié à d'autres éléments tels que le fer et le magnésium. Il est concevable que le broyage par collision de ces minéraux (quand les cailloux s'entrechoquent violemment et se brisent en morceaux de plus en plus petits) puisse créer des nanoparticules de silice. Mais ces particules devraient présenter une fourchette de tailles beaucoup plus large que celle observée par *Cassini*.

Il ne restait qu'une seule autre explication naturelle : les nanoparticules ont pu se cristalliser à partir d'une solution sursaturée d'eau alcaline très chaude et riche en silice s'écoulant à travers des roches, c'est-à-dire sortant de cheminées hydrothermales très semblables à celles que l'on trouve sur Terre dans la Cité perdue.

Sur le site de la Cité perdue, ainsi que probablement sur le plancher océanique d'Encelade, l'eau très chaude (plus de 90-100 °C) absorbe de la silice en remontant à travers les roches silicatées. Lorsqu'elle débouche dans l'océan environnant et se refroidit, sa capacité à transporter les

ENCELADE (au centre), vue d'une distance de deux millions de kilomètres, est en orbite à l'intérieur de l'anneau E de Saturne. Cet anneau est formé par le panache glacé qui s'échappe de la lune.

minéraux absorbés diminue : il s'ensuit la formation de nanoparticules de silice. À ce stade, d'autres molécules pourraient s'attacher aux nanoparticules, ce qui les ferait grossir, les alourdirait et entraînerait ainsi à terme leur dépôt sur le fond – à moins que l'eau ne soit alcaline et pas trop salée. Cette relation entre la taille/longévité des nanoparticules et la température/chimie de leurs berceaux aqueux offre aux chercheurs une fenêtre sans précédent sur les conditions qui règnent dans l'océan d'Encelade.

À la suite de la détection initiale des nanoparticules par *Cassini*, une équipe dirigée par Yasuhito Sekine, de l'université de Tokyo, a effectué des expériences en laboratoire pour confirmer le mécanisme de formation des nanoparticules et révéler les conditions régnant dans les profondeurs d'Encelade. Ces chercheurs ont trouvé que de l'eau à une température supérieure ou égale à 90 °C, ainsi qu'une alcalinité supérieure à celle des océans terrestres assortie d'une salinité légèrement inférieure, seraient optimales pour que se forment de petites nanoparticules de silice de grande longévité.

D'après leurs expériences, l'alcalinité de l'océan d'Encelade doit être comprise

entre celle de l'eau de mer terrestre et celle des produits d'entretien ménager ammoniacés. Si elle était plus alcaline que l'ammoniac, la grande solubilité de la silice qui s'ensuivrait ne permettrait pas aux nanoparticules de se former. Et si l'eau était moins alcaline que l'eau de mer terrestre, il faudrait qu'elle soit extrêmement chaude pour que du dioxyde de silicium se dissolve en quantité suffisante et que se forment des nanoparticules de silice.

Un océan habitable ?

Mis bout à bout, les travaux de Frank Postberg, de Hsiang-Wen Hsu et de l'équipe de Yasuhito Sekine laissent penser que les riches écosystèmes de la Cité perdue et d'autres cheminées hydrothermales terrestres auraient des chances de survivre et prospérer si on les déménageait dans les profondeurs d'Encelade. En d'autres termes, l'océan de cette lointaine lune glacée semble potentiellement habitable.

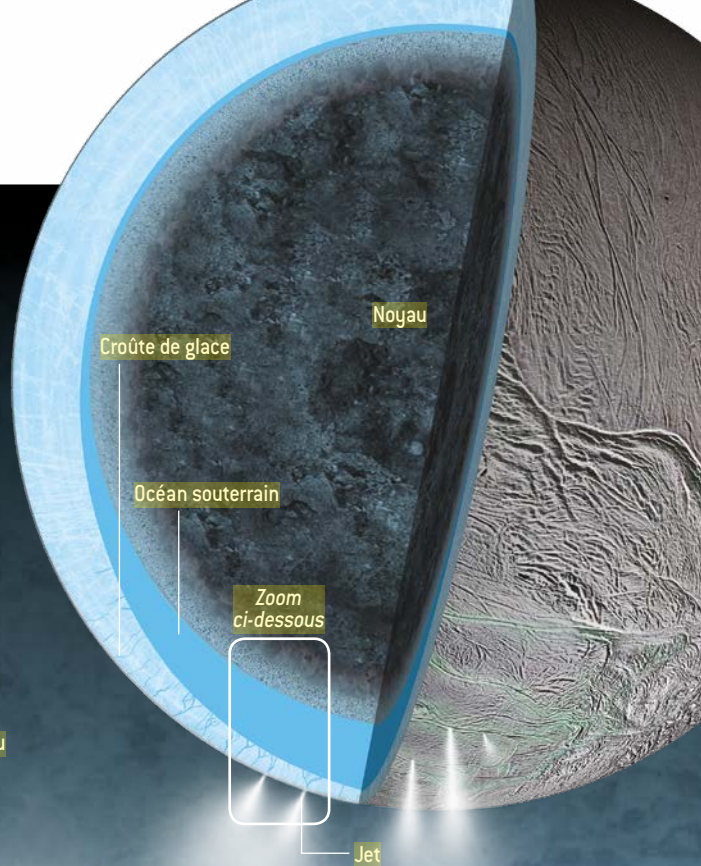
Bien sûr, il se peut qu'Encelade soit aujourd'hui inhospitalière et que les nanoparticules de silice détectées par *Cassini* ne soient que les vestiges d'une activité hydrothermale ancienne ayant pris fin depuis longtemps. Mais les travaux de Yasuhito Sekine et d'autres collaborateurs suggèrent que tel n'est pas le cas.

En effet, dans les expériences de laboratoire et les modélisations numériques, les particules de silice fraîchement formées

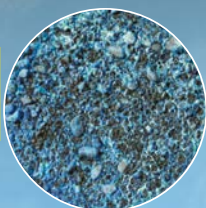


PLONGÉE DANS LES PROFONDEURS D'ENCELADE

Les scientifiques considèrent Encelade, la lune glacée de Saturne, comme un havre potentiel de vie extraterrestre depuis que, en 2005, la sonde *Cassini* a vu des jets de vapeur d'eau émanant du pôle sud de la lune. Des études ultérieures au moyen de *Cassini* ont établi que ces jets sont liés à un océan souterrain (à droite) et qu'ils contiennent des minéraux lessivés du noyau rocheux de la lune, ainsi que des particules de silice vraisemblablement formées par des événements hydrothermaux situés sur le plancher océanique (ci-dessous). Sur Terre, de tels événements ont peut-être abrité les premières formes de vie ; aujourd'hui, ils constituent des écosystèmes particuliers dans les profondeurs océaniques privées de lumière. Les scientifiques se demandent s'il n'en est pas de même sur Encelade. Même s'il se révèle un jour que les événements hydrothermaux de cette lune sont dépourvus de toute vie, ils auront fourni de nouvelles pistes pour étudier les processus internes de ce corps céleste glacé.



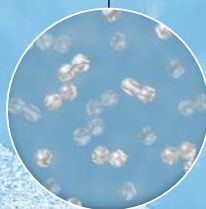
L'eau s'écoule à travers le noyau rocheux et poreux



Noyau

Événement hydrothermal

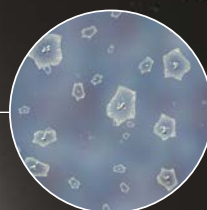
Océan souterrain



Croûte de glace

Fissure

Jet



Vapeur d'eau et grains microscopiques contenant des inclusions de silice

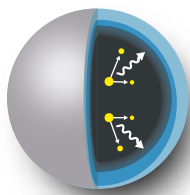
NÉES DANS LA MER, PROPULSÉES DANS L'ESPACE
Les particules de silice observées par *Cassini* précipiteraient au sein de fluides très chauds et riches en minéraux entrant en contact avec de l'eau froide. Les particules se formeraient dans des eaux légèrement plus alcalines que celles des mers terrestres (de l'eau beaucoup plus salée ou moins alcaline entraverait leur formation ou leur ascension). Une fois formées, les particules remontent à travers l'océan avant de percoler dans la croûte glacée d'Encelade et traverser ses fissures et ses cavités. À mesure que l'eau en ascension s'approche de la surface exposée au vide, la pression diminue et la fait pétiller comme du champagne, expulsant des jets de grains de glace chargés en particules. Une partie des grains échappent à la gravité de la lune et s'érodent en orbite autour de Saturne, libérant les particules de silice dans l'espace interplanétaire.

CARTOGRAPHIER L'INTÉRIEUR D'UNE LUNE

En se fondant sur son activité hydrothermale supposée, ainsi que sur les observations du champ gravitationnel d'Encelade, de sa rotation, du relief de sa surface et de la composition de ses jets, les chercheurs ont établi un tableau assez détaillé de l'intérieur du corps céleste. L'océan souterrain s'étend partout, pris en sandwich entre un noyau rocheux poreux et une croûte gelée dont l'épaisseur varie de 35 kilomètres à l'équateur à moins de 5 kilomètres au pôle sud. Au total, il représenterait une quantité d'eau équivalant à un dixième de l'océan Indien. On ne sait pas encore exactement comment cette minuscule lune produit suffisamment de chaleur pour maintenir cet océan à l'état liquide.

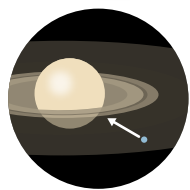
COMBIEN DE TEMPS L'OCÉAN PEUT-IL PERDURER ?

Pour que la vie telle que nous la connaissons existe sur Encelade, son océan doit être là depuis longtemps. S'il s'agit au contraire d'un océan transitoire, qui ne persiste que quelques dizaines de millions d'années ou qui passe par des cycles successifs de gel et de dégel, la lune a peu de chances d'abriter des formes de vie. La longévité de l'océan est intimement liée à la source de chaleur responsable de l'activité hydrothermale de la lune. Les planétologues ont identifié trois sources possibles de chaleur pour Encelade, chacune ayant des conséquences différentes sur la longévité de l'océan.



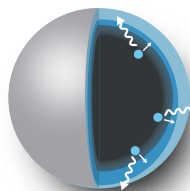
Chauffage par la radioactivité

Les isotopes radioactifs libèrent de la chaleur en se désintégrant. Encelade semble comparable à la Terre en termes d'abondance des isotopes, mais cette lune est tellement petite que cette source s'épuiserait vite et que sa chaleur s'évacuerait en peu de temps : l'océan aurait gelé depuis longtemps.



Chauffage par effets de marée

L'attraction gravitationnelle de Saturne et des lunes voisines provoque des marées qui déforment l'intérieur d'Encelade. Les frottements ainsi induits pourraient en principe chauffer la lune des milliards d'années durant. Mais l'influence de Saturne pourrait aussi modifier l'orbite de la lune de telle façon que le chauffage interne s'en trouve réduit, et Encelade se serait complètement refroidie en un million d'années ou moins.



Chauffage par serpentinisation

Les réactions de « serpentinisation » entre l'eau et la roche peuvent libérer de la chaleur, mais, comme avec le chauffage radioactif, cette chaleur diminue à mesure que la roche est transformée par les réactions chimiques. Cependant, les frottements de marée pourraient renforcer et prolonger la serpentinisation en exposant régulièrement de nouvelles roches à l'eau qui percole à travers le noyau poreux de la lune.

font en moyenne 4 nanomètres de diamètre, et ne grossissent que sur des durées de quelques mois au moins à quelques années au plus. Les données du CDA montrent que les nanoparticules d'Encelade ont en général un diamètre compris entre 4 et 16 nanomètres, sans jamais dépasser 20 nanomètres. Par conséquent, les nanoparticules recueillies par *Cassini* ont dû se former peu de temps avant d'être mesurées. Sinon, elles seraient plus grosses qu'observé. C'est à ce jour la meilleure preuve que, à l'heure où vous lisez ces lignes, des événements hydrothermaux sont actifs sur le plancher océanique d'Encelade.

Du plancher océanique aux profondeurs de l'espace

À partir de la mécanique ainsi mise au jour, nous pouvons maintenant reconstituer le voyage d'une nanoparticule depuis le fond de l'océan souterrain d'Encelade jusqu'au Système solaire élargi. Après s'être formée à l'interface entre les fluides riches en silice qui jaillissent des événements et l'océan environnant plus froid, une nanoparticule va passer de quelques mois à quelques années à remonter une épaisseur d'eau d'environ 60 kilomètres.

La surface de l'océan d'Encelade atteinte, la nanoparticule se fraye un chemin vers le haut par les fractures emplies d'eau qui zèbrent les quelques kilomètres de croûte glacée du pôle sud. L'eau de mer étant plus dense que la glace solide environnante, son ascension devrait s'arrêter à moins de un kilomètre sous la surface d'Encelade. Mais là, l'« effet champagne » donne un coup de pouce supplémentaire : tandis que l'eau (qui contient du dioxyde de carbone dissous) monte et que sa pression décroît, des bulles de dioxyde de carbone naissent. Ces dernières aident l'eau à remonter jusqu'à, peut-être, une centaine de mètres de la surface d'Encelade.

Là, nous soupçonnons qu'elle remplit des cavités creusées dans la glace. Si près du vide spatial, les bulles de dioxyde de carbone qui éclatent et les basses pressions mettent ces masses d'eau en effervescence, d'où des projections de nuages de fine brume et de vapeur d'eau. Les gouttelettes de brume gèlent rapidement en formant des grains de glace micrométriques, qui incorporent les nanoparticules de silice comme des raisins dans un petit pain. La masse nuageuse s'élève par des canaux qui traversent la glace superficielle cassante et sèche, comme le long d'une cheminée. Une partie de la vapeur d'eau gèle sur les murs de glace, libérant la chaleur latente que nous voyons sous la forme d'une lueur infrarouge émanant des rayures de tigre de la surface d'Encelade. La vapeur qui ne gèle pas entraîne les grains chargés de particules vers la surface, les projetant dans l'espace comme des fontaines.