

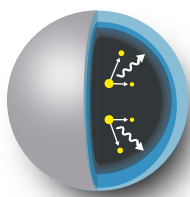


CARTOGRAPHIER L'INTÉRIEUR D'UNE LUNE

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.

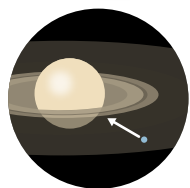
COMBIEN DE TEMPS L'OCÉAN PEUT-IL PERDURER ?

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.



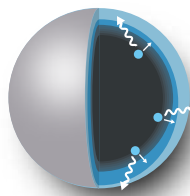
Chauffage par la radioactivité

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.

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