

Découverte d'une forte dissipation d'énergie à l'intérieur de Saturne

-Ou comment notre vision du système de Saturne est appelée à radicalement changer-

Valéry Lainey¹, Stéphane Mathis², Françoise Remus^{3,1,2}, Sébastien Charnoz², Özgür Karatekin⁴, Josselin Desmars^{5,1}, Jean-Paul Zahn³, Jean-Eudes Arlot¹, Nikolai Emelyanov^{6,1}, Christophe Le Poncin-Lafitte⁷, Gabriel Tobie⁸

¹IMCCE-Observatoire de Paris, UMR 8028 du CNRS, UPMC, Université Lille 1, 77 Av. Denfert-Rochereau, 75014, Paris, France; ²Laboratoire AIM Paris-Saclay, CEA/DSM – CNRS – Université Paris Diderot, IRFU/SaP Centre de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France; ³LUTH-Observatoire de Paris, UMR 8102 du CNRS, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon Cedex, France; ⁴Royal Observatory of Belgium, Avenue Circulaire 3, 1180 Uccle, Bruxelles, Belgium; ⁵Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, 200030 Shanghai, P.R.China; ⁶Sternberg Astronomical Institute, 13 Universitetskij Prospect, 119992 Moscow, Russia; ⁷SyRTE-Observatoire de Paris, UMR 8630 du CNRS, 77 Av. Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France; ⁸Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes, Université de Nantes, CNRS, UMR 6112, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3, France.

Observés depuis le milieu du XVII^e siècle, on pensait le mouvement des principaux satellites de Saturne parfaitement connu. Pourtant, en utilisant plus d'un siècle d'observations précises, une équipe internationale menée par des chercheurs de l'IMCCE/Observatoire de Paris, de l'UPMC, du CEA/IRFU et de l'Université Paris Diderot a mis en évidence de petites accélérations associées aux effets de marées produits par chacun des satellites sur Saturne. Jusqu'alors considérés comme faibles, ces effets de marées s'avèrent dix fois plus forts que prévu, expliquant probablement l'origine des geysers observés par la mission CASSINI sur le satellite Encelade. Mais ces résultats ébranlent du même coup certaines de nos connaissances concernant ce système, telles que les mécanismes physiques en action à l'intérieur de la planète ou encore le processus de formation même des satellites. Ces résultats sont publiés dans les numéros de juin 2012 des revues *The Astrophysical Journal* et *Astronomy & Astrophysics* et dans le numéro de décembre de la revue *Icarus*.

L'astrométrie est la discipline astronomique qui s'intéresse à déterminer avec une précision maximale les positions des corps célestes dans l'espace. Si pour certains des principaux satellites de Saturne (nommés par ordre croissant de distance à la planète Mimas, Encelade, Téthys, Dioné, Rhéa, Titan, Hypérion et Japet), les premières mesures datent du milieu du XVII^e siècle, il faudra attendre l'avènement de grands instruments équipés de micromètres et des premières plaques photographiques pour espérer obtenir une précision de l'ordre du millier de kilomètres sur leur position. Aujourd'hui, les observations astrométriques les plus précises de ce système sont données par la sonde Cassini (en orbite autour de Saturne depuis 2004) et permettent de contraindre le mouvement des lunes de Saturne dans une fourchette de dix kilomètres environ. Voilà de quoi laisser planer le doute sur la nécessité d'utiliser aujourd'hui encore des observations très anciennes. Pourtant, leur utilisation par l'équipe internationale baptisée ENCELADE, en référence au satellite éponyme, a permis de

mettre en évidence la signature des marées levées par Encelade, Téthys, Dioné et Rhéa sur leur planète.

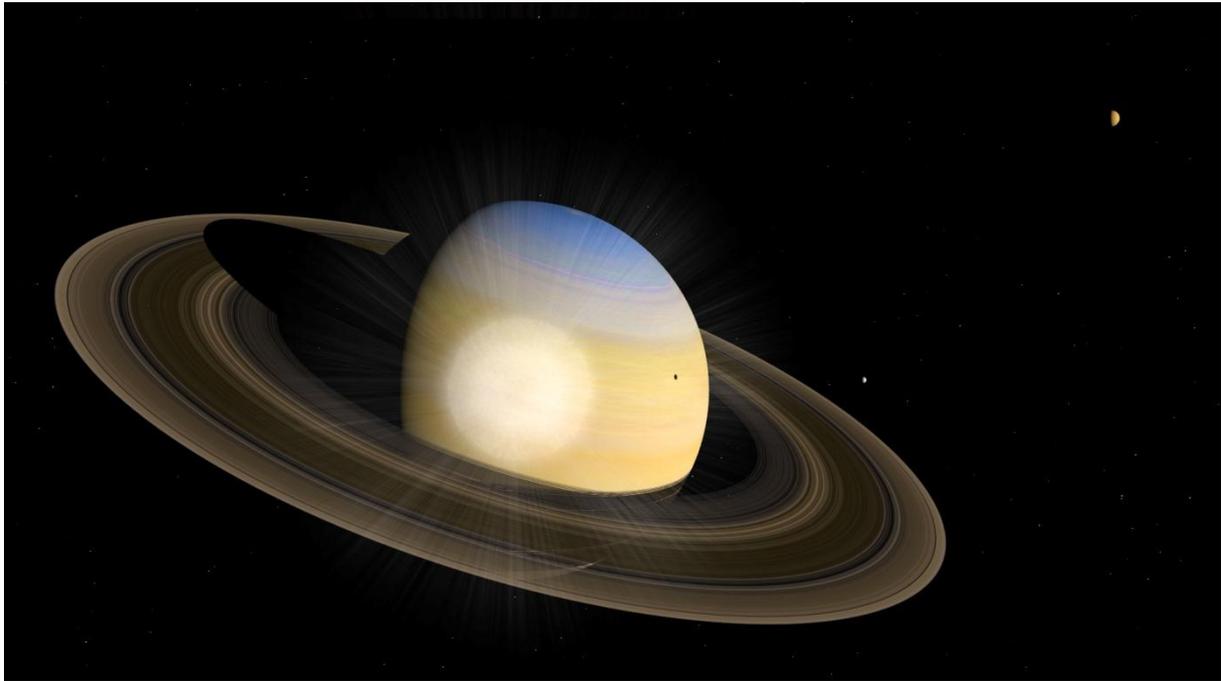


Fig. 1 : *Vue d'artiste représentant la forte dissipation d'énergie à l'intérieur du cœur de Saturne induite par les marées levées par chaque satellite* (© Y. Gominet/IMCCE-Observatoire de Paris/CNRS).

Les effets de marées sont un effet différentiel entre l'attraction exercée par un corps sur les différentes portions d'un autre. Le corps subissant ces marées va alors prendre une forme ellipsoïdale, un peu comme celle d'un ballon de rugby. En pratique, le corps se déforme avec un certain retard, car il dissipe une partie de l'énergie de déformation du fait de phénomènes de friction interne sous forme de chaleur. En raison des mouvements relatifs, les bourrelets de marées ne pointent donc pas exactement vers le corps attracteur. Du fait de ce décalage, et tout comme pour le système Terre-Lune dont la distance augmente de 3 à 4 centimètres par an, les satellites de Saturne vont s'éloigner de leur planète, décélérant ainsi sur leur orbite. En utilisant des observations astrométriques allant de 1886 à 2009, les chercheurs du groupe ENCELADE ont ainsi réussi à quantifier la décélération orbitale de quatre des huit principaux satellites de Saturne. La surprise était de taille, la valeur obtenue étant de dix fois supérieure à celle attendue. Après un travail minutieux de vérification, il fallait se rendre à l'évidence : les estimations antérieures, toutes basées sur la distance maximale qu'auraient pu parcourir les satellites depuis leur formation, n'étaient pas vérifiées par l'observation. Loin d'être anecdotique, ce résultat appelait les chercheurs à reconsidérer le système de Saturne et sa structure interne sous un angle nouveau.

Tout d'abord, la cause mystérieuse des geysers observés au pôle Sud d'Encelade trouvait une explication naturelle. En effet, il était admis que la source de chaleur nécessaire pour maintenir en activité le cryovolcanisme observé sur ce satellite ne pouvait que provenir des puissants effets de marées levées cette fois par Saturne sur le satellite. Mais ces effets,

proportionnels à l'excentricité de l'orbite du satellite, n'étaient supposés pouvoir durer que peu de temps, l'excentricité d'Encelade diminuant à mesure que son intérieur se réchauffait sous l'effet de la friction interne produite durant les déformations. Toutefois, ces différents calculs avaient été réalisés en supposant une dissipation d'énergie dans la planète dix fois inférieure à celle que venaient d'obtenir les chercheurs par l'astrométrie. En reprenant ces calculs avec leur nouvelle valeur, les chercheurs réalisèrent que désormais un état d'équilibre dynamique et thermique était possible, de sorte que la chaleur dégagée à la surface par les geysers d'Encelade soit directement compensée par celle produite par les déformations de marées, le tout en permettant à l'excentricité d'Encelade de ne pas varier dans le temps.

Une autre surprise de taille était de constater que l'énergie dissipée dans la planète n'était que peu dépendante du satellite engendrant la déformation de marée (fig. 2).

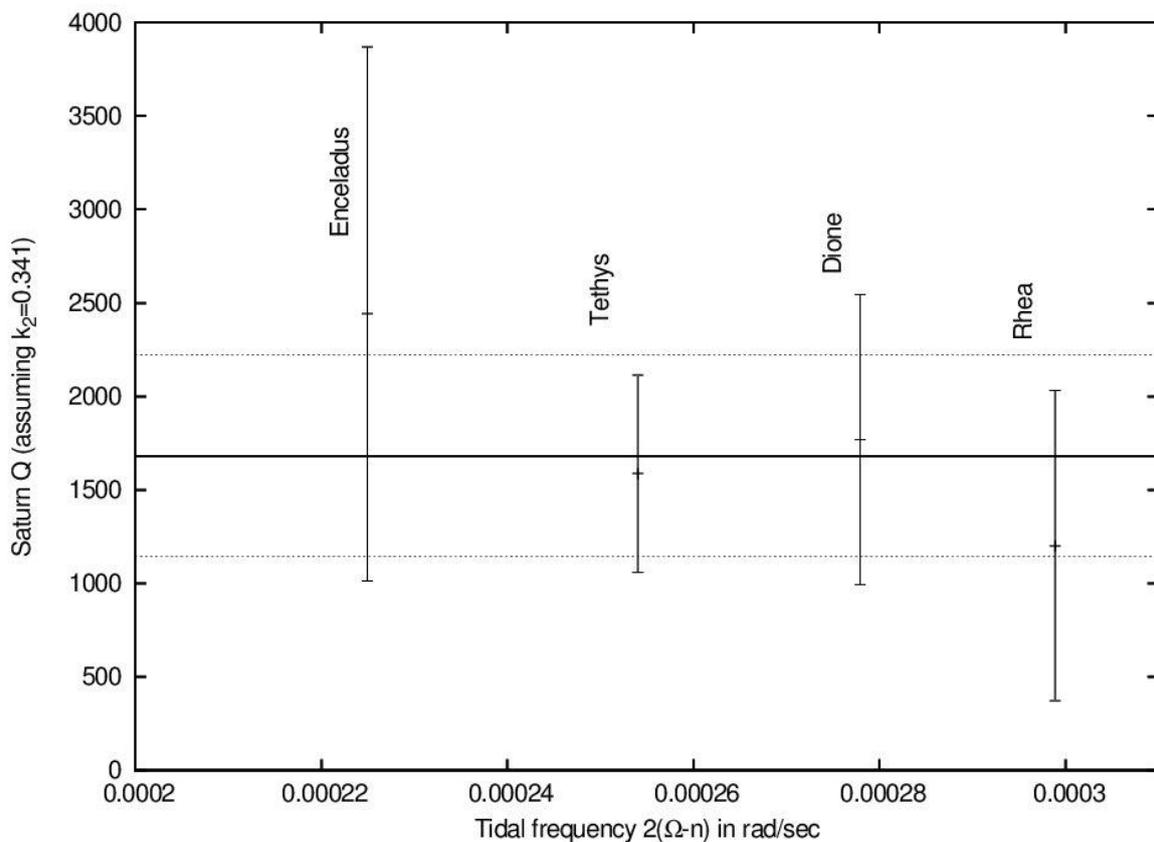


Fig. 2 : Variation de l'amplitude des effets de marées dans la planète Saturne en fonction du satellite levant la marée (Ω et n sont respectivement la vitesse de rotation de Saturne et le moyen mouvement du satellite) (Lainey et al. *The Astrophysical Journal*).

Il fallait donc comprendre les possibles origines d'un tel phénomène et son intensité en examinant la structure interne de Saturne. Schématiquement, celle-ci est constituée d'une large enveloppe gazeuse externe entourant un noyau central composé d'éléments rocheux et de glaces dont la masse peut atteindre 18 fois celle de la Terre ($M_{\oplus} = 5.9736 \times 10^{24}$ kg) (la masse totale de la planète étant de $95.159 M_{\oplus}$). Or les régions rocheuses constituent d'excellents agents de dissipation d'énergie, tandis que tous les modèles de friction de marées établis jusqu'alors pour les planètes géantes ne prenaient en compte que la déformation et la

dynamique de l'enveloppe fluide. Ainsi, les chercheurs du groupe ENCELADE décidèrent de modéliser de manière cohérente la dissipation des marées dans de tels cœurs planétaires situés sous de profondes enveloppes fluides. Les résultats obtenus démontrèrent alors que la dissipation visqueuse de la réponse élastique de ces cœurs (fig. 3), amplifiée par la charge de la partie fluide, permettait de reproduire la forte dissipation observée, mais aussi sa faible dépendance à la fréquence d'excitation de marée. Ceci démontrait donc la nécessité actuelle de réviser les modèles ne prenant en compte que les enveloppes externes des planètes géantes pour aller vers des modèles complets allant de la surface de la planète jusqu'à son cœur. Dans ce cadre, il devient désormais crucial d'entreprendre de nouvelles recherches pour comprendre l'état de la matière de ce dernier dans les conditions extrêmes de température et de pression de l'intérieur des planètes géantes.

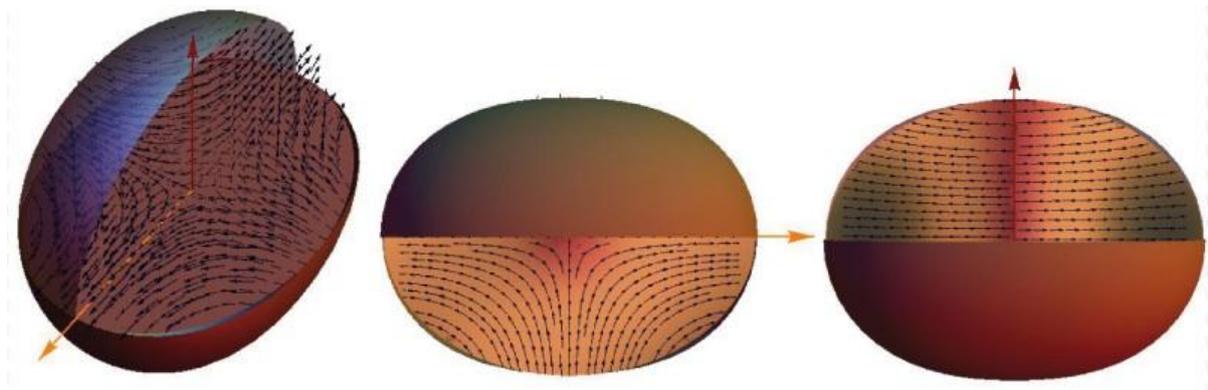


Fig. 3 : (Gauche) Représentation tridimensionnelle du déplacement induit par la marée dans une région planétaire solide. La flèche rouge est l'axe de rotation de la planète tandis que la direction du satellite perturbateur est indiquée par la flèche orange. (Milieu et droite): Vues dans les plans équatoriaux et méridiens. (Remus et al. *Astronomy & Astrophysics*)

Cependant, une telle dissipation d'énergie, active depuis la formation du Système solaire (environ 4,5 milliards d'années), aurait dû repousser les principaux satellites de Saturne à des distances bien plus élevées que celles observées aujourd'hui (en particulier pour Mimas, satellite massif le plus proche). Cette épine dans le pied allait être le point de départ d'un scénario alternatif pour la création des satellites de Saturne compris entre Mimas et Rhéa. Des effets de marées aussi puissants ont donc des implications directes pour la formation des satellites de Saturne.

L'équipe ENCELADE a ainsi élaboré un scénario alternatif de formation des satellites. Celui-ci présuppose que ce sont les anneaux de Saturne eux-mêmes qui pourraient être les progéniteurs des satellites situés jusqu'à l'orbite de Rhéa. En particulier, les anneaux s'étalant lentement au cours de l'histoire du Système solaire auraient donné progressivement naissance, à leur bord externe, à de nouveaux satellites. Dans ce scénario, les satellites doivent être riches en glace (comme les anneaux), ce qui est en accord avec les observations. De plus, ils se créent progressivement au cours de l'histoire du Système solaire. Ainsi, étant plus jeunes que ce dernier, il est possible de réconcilier leur position actuelle avec de forts effets de marées dans Saturne. À titre d'exemple, le satellite Mimas pourrait avoir 1 milliard d'années de moins que Saturne. Mais ce nouveau scénario de formation appelle une observation plus importante encore. Il était connu de longue date que les masses des satellites de Saturne situés jusqu'à l'orbite de Titan étaient d'autant plus importantes que ceux-ci étaient éloignés de leur

planète. Cette observation devient une conséquence naturelle du mécanisme de formation des satellites. En effet, l'anneau de Saturne devient moins massif à mesure qu'il forme de nouveaux satellites. Il crée ainsi des satellites de masse de plus en plus faible.

Le travail du groupe ENCELADE démontre l'importance d'une recherche pluridisciplinaire en proposant une nouvelle vision du système de Saturne dans sa globalité. Mais bien au-delà de notre Système solaire, il est à prévoir que ce travail aura sûrement des conséquences importantes sur notre compréhension des systèmes exoplanétaires.

Références

Strong tidal dissipation in Saturn and constraints on Enceladus' thermal state from astrometry, V. Lainey, Ö. Karatekin, J. Desmars, S. Charnoz, J.-E. Arlot, N. Emelyanov, C. Le Poncin-Lafitte, S. Mathis, F. Remus, G. Tobie, J.-P. Zahn, *The Astrophysical Journal*, 752, Issue 1 (2012).

Anelastic tidal dissipation in multi-layer planets, F. Remus, S. Mathis, J.-P. Zahn, V. Lainey, *Astronomy & Astrophysics*, 541, (2012).

Accretion of Saturn's mid-sized moons during the viscous spreading of young massive rings: Solving the paradox of silicate-poor rings versus silicate-rich moons, S. Charnoz, A. Crida, J. Castillo-Rogez, V. Lainey, L. Dones, Ö. Karatekin, G. Tobie, S. Mathis, C. Le Poncin-Lafitte, J. Salmon, *Icarus*, Volume 216, Issue 2, p. 535-550 (2011).

Page internet du groupe ENCELADE

<http://www.imcce.fr/~lainey/Encelade.htm>

A voir aussi

Une vidéo décrivant ce processus de formation est visible ici (merci à ANIMEA www.animea.com) :

http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=actu&id_ast=2836

Contacts à l'Observatoire de Paris et l'UPMC

Valéry Lainey, tel.: 01 40 51 22 72, e-mail: lainey@imcce.fr

Françoise Remus, tel.: 01 45 07 78 62, e-mail: francoise.remus@obspm.fr

Contacts à l'AIM (CEA/IRFU et Université Paris Diderot)

Stéphane Mathis, tel : 01 69 08 49 30, email : stephane.mathis@cea.fr

Sébastien Charnoz, tel : 01 69 08 61 30, email : sebastien.charnoz@cea.fr