

## Les marées au sein des systèmes de planètes géantes

Valéry Lainey, IMCCE, Observatoire de Paris, PSL

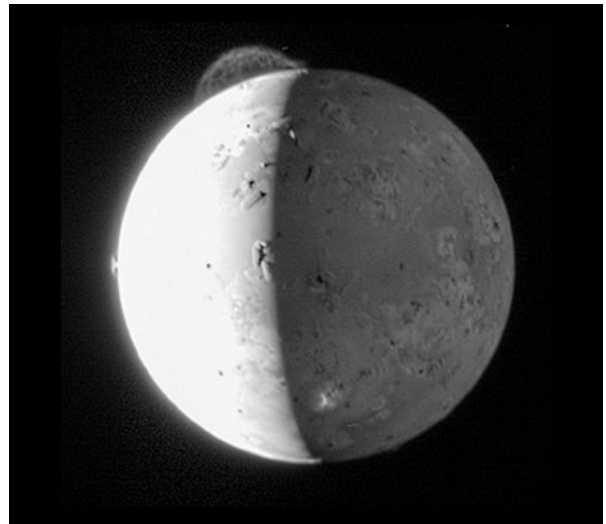
*L'influence des forces gravitationnelles de marées varie fortement en fonction des distances et des masses. Une planète géante comme Jupiter, dont la masse est environ mille fois celle de la Terre, induit sur ses lunes des effets puissants qu'il est difficile d'imaginer. Cet article en rend compte de manière précise.*

À première vue, les effets de marées au sein des systèmes de planètes géantes ne sont guère différents de ceux agissant sur la Terre et la Lune. Comme la Lune sur la Terre, les lunes des planètes géantes exercent une attraction plus forte sur la partie de leur planète leur faisant face que sur celle opposée. En résulte alors une infime déformation de la planète en ballon de rugby, avec laquelle les diverses lunes vont pouvoir interagir. Ce qui rend les effets de marées intéressants tient au fait que la planète met un certain temps à répondre à l'attraction qu'elle reçoit. Il en résulte deux conséquences cruciales pour l'évolution du système. D'une part, l'intérieur de la planète s'échauffe suite à la friction engendrée. D'autre part, les bourrelets de marées se trouvent en léger décalage par rapport à la lune qui les crée, induisant à leur tour un mouvement bien particulier sur la trajectoire de celle-ci. La réciproque est naturellement vraie. Les lunes subissent le même processus sous l'action gravitationnelle de leur planète.

### Io, un satellite au volcanisme incessant

Puisque les effets de marées chauffent l'intérieur des objets, où part donc cette chaleur ? Et bien elle est évacuée à la surface. Sur Terre, la chaleur engendrée par les marées lunaires et solaires est bien inférieure à celle libérée par la désintégration des éléments radioactifs dans la croûte et le manteau terrestre. Il en va tout autrement du satellite Io, satellite le plus proche de Jupiter parmi les quatre gros satellites dits galiléens (car découverts par Galilée en 1610). Les mouvements périodiques de marées à la surface de Io atteignant la centaine de mètres d'élévation, une formidable chaleur est ainsi produite à l'intérieur de cette lune. Une telle chaleur doit être évacuée coûte que coûte, quitte à transformer la surface de ce satellite en un enfer volcanique, en perpétuelle activité.

Il est à noter que la distance Io-Jupiter est quasi similaire à celle séparant la Terre de la Lune. La différence fondamentale ici est que Jupiter est environ mille fois plus massive que la Terre, produisant ainsi une force de marées sur Io absolument titanesque.



*Fig.1. Une image de Io prise par la sonde New Horizons en 2007, lors de sa rencontre avec le système jovien. On y voit clairement un jet de matière s'élevant à plusieurs centaines de kilomètres de hauteur. Il s'agit essentiellement de composés soufrés, ici projetés en l'air à partir du volcan Tvashtar.*

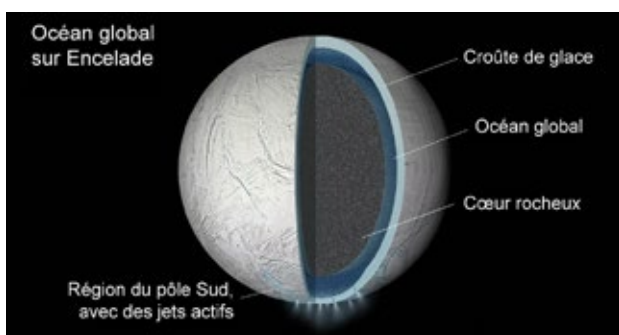
Se pourrait-il que les autres satellites galiléens subissent une activité semblable ? La distance augmentant, les lunes suivantes (par ordre de distance croissante Europe, Ganymède et Callisto) ne présentent pas d'activité volcanique. D'ailleurs leur densité plus faible reflète bien la grande quantité de glace d'eau visible à la surface de ces derniers. Toutefois, les effets de marées levées par Jupiter restent assez forts pour maintenir la présence d'un océan d'eau liquide, sous toute la surface gelée du satellite Europe. Il est possible que Ganymède (voire, même si cela semble moins probable, Callisto) puisse accueillir en son sein un océan d'eau liquide similaire.

## Encelade, simple lune de glace ?

Les effets de marées sont d'autant plus forts que les objets concernés sont grands. Les satellites galiléens étant de gros objets (Ganymède est plus grand que Mercure), les marées qu'ils subissent sont donc, nous l'avons vu, conséquentes. En revanche, on s'attendrait à un chauffage négligeable pour des objets dix fois plus petits. Le système de Saturne nous révèle pourtant quelques surprises.

À la différence du système de Jupiter, Saturne ne compte qu'un seul gros satellite, Titan. Celui-ci se situe toutefois à plus d'un million de kilomètres de sa planète, laissant la place à une myriade de satellites plus petits. Constitués essentiellement de glace d'eau, ces petites lunes ont une taille variant typiquement de quelques dizaines de kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres de rayon. Parmi celles-ci, le satellite Encelade apparaît comme une lune très modeste, son rayon étant d'environ 250 kilomètres.

Quelle ne fut donc pas la surprise lorsqu'en 2005, la sonde Cassini, arrivée en orbite peu de temps plus tôt, devait découvrir des geysers en pleine activité au pôle Sud d'Encelade. Un objet perdant d'autant plus vite sa chaleur interne qu'il est petit, la présence actuelle d'eau liquide sous le pôle Sud apparaissait stupéfiante. Une dizaine d'années plus tard, en 2016, des travaux menés à l'Université de Cornell (USA) devaient montrer que c'est un véritable océan global d'eau liquide qui se cache sous toute la surface d'Encelade. Là encore, des études devaient montrer que le mécanisme responsable d'une production de chaleur suffisante pour maintenir liquide cet océan global était bien les marées levées par Saturne sur Encelade.



**Fig.2.** Représentation de l'intérieur du satellite de Saturne, Encelade. Son cœur de silicates est entouré d'un immense océan d'eau recouvrant toute sa surface, lui-même revêtu d'une coquille de glace. La surface présente de nombreuses striures, conséquences d'une action conjointe des effets de marées levées par Saturne et de la remontée d'eau à la surface. Les épaisseurs ne sont pas à l'échelle (d'après © Nasa, JPL-Caltech).

## Les marées, un acteur majeur de l'évolution des systèmes de satellites

En plus de chauffer les intérieurs, les effets de marées modifient profondément les orbites des lunes. À ce niveau, deux mécanismes entrent en compétition. Les effets de marées dans les lunes tendent à rapprocher ces dernières de leur planète, tout en diminuant l'excentricité de l'orbite. En revanche, les effets de marées dans les planètes ont généralement l'action opposée, à savoir qu'ils augmentent la distance de l'orbite des satellites levant les marées. Si la distance à la planète est un élément important pour l'amplitude de marée, l'excentricité de l'orbite est tout autant cruciale pour induire un effet notable sur les lunes. En effet, la grande majorité des lunes proches de leur planète sont en résonance spin-orbite : tout comme la Lune, elles montrent la même face à leur planète. Il s'agit là d'une autre conséquence des effets de marées. En l'absence d'excentricité orbitale, les marées levées par la planète seraient donc statiques, déformant de façon constante chacune des lunes. Un exemple caractéristique est le système Pluton/Charon, pour lequel les deux objets se font face en permanence. Aucun des deux objets ne produit de chaleur sous l'effet des marées levées par l'autre, et l'orbite des deux objets ne subit pas de variation en conséquence.

La compréhension des phénomènes de marées requiert donc de prendre en compte à la fois les mouvements orbitaux et de rotation des objets considérés. Enfin, une dernière complication provient de la présence de plusieurs lunes en orbite autour de la même planète. Les systèmes de Jupiter et Saturne présentent en particulier de nombreuses lunes dont les fréquences de révolution sont commensurables (i.e. leur rapport peut s'écrire comme le rapport de deux nombres entiers). On parle alors de résonance orbitale. Ainsi, Io effectue deux révolutions autour de Jupiter lorsque Europe en fait une. De même entre Europe et Ganymède. Ce type de configuration arrive également entre les satellites Mimas et Téthys ou encore Encelade et Dioné pour les lunes de Saturne. Loin d'être anodines, ces configurations dynamiques relativement stables ont souvent pour conséquence d'accroître les effets de marées, en augmentant par exemple les excentricités des lunes. À titre d'exemple, Io ne connaîtrait plus de volcanisme aujourd'hui, si son excentricité orbitale n'était pas en permanence maintenue élevée par l'influence gravitationnelle de son proche voisin Europe.

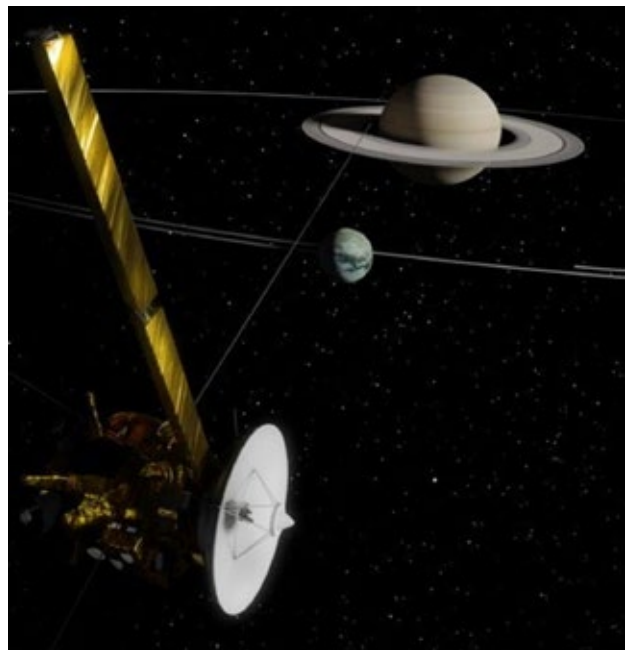
Reste que ces configurations dynamiques résonantes ne sont pas apparues toutes seules. Elles sont au contraire la conséquence d'une migration des lunes au cours du temps. Or c'est précisément sous l'action des marées que les lunes migrent, leur permettant de croiser différentes résonances orbitales, avec dans certains cas un phénomène de capture en résonance. L'observation des configurations orbitales actuelles des lunes est donc riche d'enseignement lorsque l'on souhaite étudier la formation et l'évolution à long terme de ces objets. Il est toutefois difficile de séparer la contribution des marées levées dans la planète à celles levées dans les lunes, puisque les deux effets sont très corrélés. Pour rendre les choses un peu plus complexes encore, il faut savoir que la quantité de friction engendrée dans les intérieurs des objets dépend également de leur structure interne. Et cette structure évolue, entre autres, en fonction... du chauffage de marées.

### Quantifier les marées ?

Il est utile de chercher à quantifier l'importance des effets de marées dans un système, afin de mieux comprendre son évolution. Une méthode consiste à quantifier la chaleur évacuée à la surface de l'objet considéré. Cette technique fonctionne assez bien pour Io et Encelade, qui présentent des sources de chaleur localisées importantes. Pour les autres objets, à commencer par les planètes géantes, il faut trouver une autre méthode. Une solution consiste à observer le mouvement orbital des lunes sur un temps suffisamment long pour espérer détecter une variation (très faible) des orbites. Cette méthode s'appuie sur l'astrométrie, une technique d'observation permettant d'obtenir une très grande précision sur la position des objets célestes.

C'est en utilisant plus d'un siècle d'observations des satellites galiléens de Jupiter qu'il a été possible de quantifier la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur par les marées dans Io et sa planète, Jupiter. Par comparaison avec les mesures de chaleur prise en infrarouge à la surface de Io, il a été possible de montrer que Io était proche de l'équilibre thermique, c'est-à-dire qu'il évacue sa chaleur à la même vitesse qu'il s'en crée dans son intérieur sous l'action des marées joviennes.

Une méthode similaire a été tentée avec succès pour le système de Saturne, dans le cadre de la mission Cassini. À la différence du système jovien, les résultats astrométriques ont été assez surprenants, avec des expansions orbitales importantes des lunes. Il aura fallu attendre la fin de la mission Cassini, et l'utilisation des données de radio-science, obtenues



*Fig.3. Vue d'artiste de la sonde Cassini en orbite au sein du système de Saturne, tandis que Titan s'éloigne lentement de Saturne sous la rétroaction des marées qu'il lève sur sa planète (crédit : Francesco Fiori, Radio Science and Planetary Exploration Lab).*

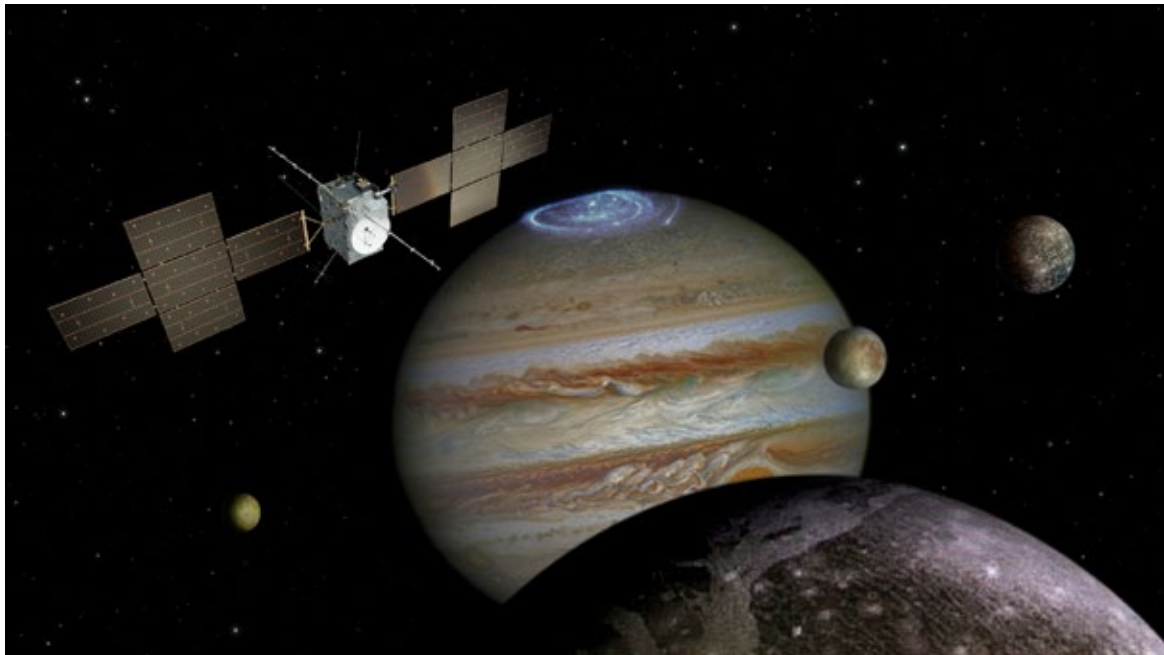
lors des rencontres proches entre la sonde et le satellite Titan, pour mettre évidence un mécanisme de friction dans Saturne, différent des modélisations traditionnelles. Celui-ci se fonde sur le caractère fluide des intérieurs de planètes gazeuses, et la possibilité de pouvoir dissiper beaucoup d'énergie à des fréquences de marées très spécifiques. En conséquence, les lunes peuvent voir leur orbite évoluer très rapidement, même à de grandes distances comme celle séparant Titan de sa planète.

### Les futures missions spatiales

Un avenir radieux se profile désormais à l'horizon pour l'étude des systèmes de planètes géantes. En effet, deux missions d'envergure vont être lancées dans les prochaines années pour étudier le système de Jupiter. La première, nommée Europa Clipper et lancée par la NASA, arrivera normalement en 2029 au sein de ce système pour étudier de près Europe et son océan d'eau liquide. La seconde, lancée par l'ESA en 2022, arrivera à peu près au même moment que son homologue américain pour étudier le système de Jupiter et, quelques années plus tard, se mettre en orbite autour du satellite Ganymède. D'ici là, la mission américaine JUNO, actuellement en orbite autour de Jupiter, devrait profiter d'un éloignement progressif de la sonde pour survoler Io, Europe et Ganymède, préparant ainsi l'arrivée de la prochaine génération de sondes spatiales.

Articles scientifiques de référence (publications dans des revues scientifiques spécialisées) :

- Lainey et al., Nature 2009 ;
- Lainey et al., Nature Astronomy 2020 ;
- Spencer et al., Science 2007 ;
- Thomas et al., Icarus 2016.



**Fig.4.** Vue d'artiste de la mission Européenne JUICE (ESA) lors de son tour au sein du système jovien. Crédit: Spacecraft: ESA/ATG medialab; Jupiter: NASA/ESA/J. Nichols (University of Leicester); Ganymede: NASA/JPL; Io: NASA/JPL/University of Arizona; Callisto and Europa: NASA/JPL/DLR.

