Les effets de marée:

Du chauffage interne à la lente migration des planètes

Tristan Guillot
Observatoire de la Côte d'Azur, 06304 Nice
guillot@obs-nice.fr
www.obs-nice.fr/guillot

Petit cours
Festival de Fleurance 2003

Introduction

Les marées sur Terre, c'est-à-dire le flux et le reflux de la mer sur la plupart des côtes, sont connues depuis des temps immémoriaux. Mais il semble que le premier à avoir fait le lien entre les marées et la Lune soit un explorateur marseillais du nom de Pytheas. Au 3ème siècle avant J.C., il fit un grand voyage - de l'ordre de 11000 km! - au cours duquel il passa entre autres en Bretagne. Il eut ainsi l'occasion d'observer les grandes marées des côtes atlantiques, et la régression journalière de la marée haute parallèlement au moment du passage de la Lune. Ses écrits ont été perdus et ne sont connus que par citations ou allusions d'autres auteurs.

Ce n'est que bien plus tard, en 1687, que Newton donnera l'explication de ce phénomène, dans ses *Principia Mathematica*. Nous verrons que le phénomène de marée est une conséquence de l'équilibre entre gravité et force centrifuge (lié donc à la rotation des corps célestes). Essentielles pour le ramassage des coquillages sur les côtes bretonnes, les forces de marée ont aussi de nombreuses autres conséquences astrophysiques. Ainsi, nous montrerons que c'est leur action qui fait que la Lune présente toujours la même face à la Terre. Les forces de marée sont capables de détruire des corps comme la comète Shoemaker-Levy 9 en 1994, ou d'en chauffer d'autres. C'est ainsi que Io, satellite de Jupiter, est le corps qui présente le plus d'activité volcanique de tout le Système Solaire. Enfin, les forces de marée modifient les orbites des étoiles binaires et celles des planètes extrasolaires proches de leur étoile, phénomènes que l'on peut maintenant observer et quantifier.

Après une brève description des lois fondamentales nécessaires à la compréhension du phénomène, nous analyserons quelques unes des diverses conséquences astrophysiques liées aux effets de marée. Nous présenterons pour cela quelques équations, mais la plupart des concepts seront développés à partir de graphes simples.

Les lois et quantités fondamentales

Les deux lois physiques fondamentales dont nous aurons besoin ont été énoncées par Newton: Tout d'abord, il a montré que l'accélération a d'un objet ponctuel de masse m était lié à la somme des forces qui lui sont appliquées, selon la loi suivante:

$$ma = \sum F$$

D'autre part, il a montré que deux masses ponctuelles m et M s'attirent mutuellement et que la force de gravité qui est associée s'écrit:

$$F_g = G\frac{Mm}{r^2}$$

où G est une constante universelle, et r est la distance entre les deux masses. (Einstein introduira ensuite la relativité générale qui modifie ces équations; néanmoins, dans la grande majorité des cas, la mécanique Newtonienne reste parfaitement valide).

On peut montrer que les trajectoires fermées qui satisfont ces équations sont des ellipses. Ces ellipses sont caractérisées par leur demi-grand axe a et leur excentricité e, comme le montre la figure 1.

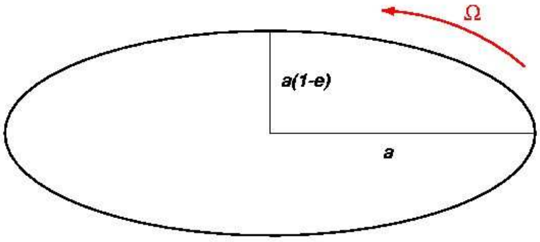

Figure 1: *Paramètres d'une ellipse: a, demi-grand axe, et e, excentricité. Pour un objet ayant cette ellipse pour trajectoire, Ω correspond à sa fréquence de rotation.*

Ainsi, une ellipse d'excentricité e=0 est un cercle. Lorsque e tend vers 1, l'ellipse s'allonge et tend à devenir un segment. En pratique, e~1 entraîne une collision entre les deux corps m et M.

D'autre part, on définit une fréquence de rotation Ω, telle que le temps pour décrire une orbite complète est 2π/Ω. On peut montrer (nous ne le ferons pas ici) qu'on peut se placer dans un repère qui tourne avec la fréquence Ω, et qu'alors en tout point de la trajectoire, l'objet ponctuel de masse m va subir une force centrifuge:

$$F_\Omega = M\Omega^2 r$$

L'accélération étant nulle en tout point de la trajectoire dans ce repère en rotation, la force centrifuge doit égaler la force gravitationnelle. Il s'ensuit la troisième loi de Kepler (antérieure en fait aux lois de Newton):

$$\Omega^2 = G\frac{m}{r^3}$$

Cette loi est essentielle pour comprendre (entre autres) le mouvement des planètes: elle montre que le temps nécessaire pour faire une orbite complète autour du Soleil croît avec la distance planète-soleil (plus précisément avec $r^{3/2}$).

En dernier lieu, il sera utile d'utiliser le moment cinétique, lequel, dans le cas de notre masse ponctuelle m:

$$j = mr^2\Omega\,.$$

Le moment cinétique, comme l'énergie, est une quantité qui doit être conservée dans toute transformation physique. Prenons l'exemple d'un jeu de billard. Si une boule qui tourne sur elle-même rencontre une autre boule, elle va en général impartir à celle-ci un peu de son moment cinétique, le moment total étant conservé (aux effets de friction près). Les deux boules vont ainsi avoir chacune une partie du moment cinétique, et donc de la rotation initiale. On peut aussi faire l'expérience suivante: prenons une roue de vélo qui tourne suffisamment vite sur son axe. Il est difficile de modifier son axe de rotation (on peut essayer: c'est même surprenant), alors que cela ne demande aucun effort quand la roue est immobile. L'opération est d'autant plus difficile que cette roue est grande et qu'elle tourne vite.

Marée et déformation des corps

Nous avons abordé le problème du mouvement de deux corps ponctuels M et m. Que se passe-t-il si l'on tient compte du volume fini de M (par exemple, M peut être la Terre et m la Lune, ou vice-versa, suivant le problème étudié)? Intuitivement, l'hémisphère de M se trouvant du coté qui fait face à m devrait subir une attraction plus grande, et ainsi s'allonger dans une direction.

Comment expliquer alors qu'il y ait sur Terre deux marées par jour, et non pas une seule? Autour de 1250, Roger Bacon, moine fransiscain à Oxford proposa une explication basée sur la conception qu'avait Polémée de l'Univers: les étoiles seraient fixées à une sphère, le Soleil, la Lune et les planètes se déplaceraient entre cette sphère et son centre, où se trouverait la Terre. La Lune émettrait des "rayons d'attraction". Ceux atteignant l'hémisphère face à la Lune soulèveraient l'eau, créant ainsi la marée. Ceux manquant la Terre seraient réfléchis par la sphère des étoiles pour atteindre l'autre hémisphère et créer l'autre marée! (voir Chapman & Lindzen)

Voyons comment Newton pu donner l'explication de ce phénomène quatre siècles plus tard. Considérons la situation schématisée par la figure 2.

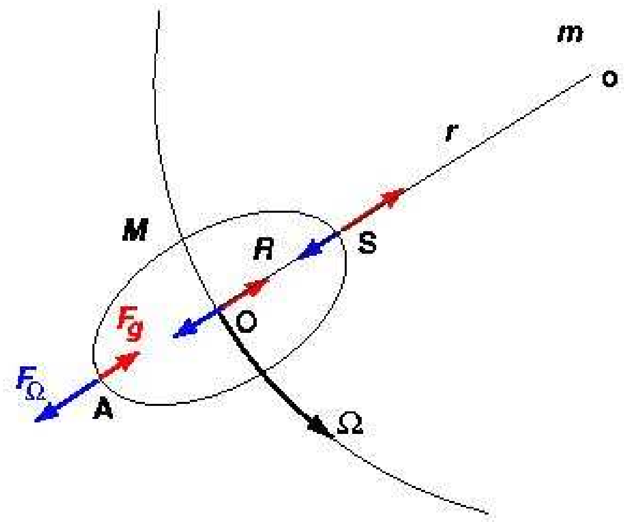

Figure 2*: Schématisation de la déformation du corps M par les forces de marée liées à la force gravitationnelle F_g issue de m et à la force centrifuge F_Ω due à la rotation Keplerienne de M.*

Si l'on se place dans un repère en rotation avec M, son centre de masse O est fixé. La somme des forces qui s'appliquent en O est donc:

$$F_g(O) + F_\Omega(O) = -G\frac{Mm}{r^2} + \Omega^2 r = 0$$

Cette somme est nulle: dans ce repère en rotation l'objet M est fixe. Par contre, au point S (sublunaire, par exemple), l'attraction gravitationnelle est plus forte tandis que la force centrifuge est plus faible:

$$F_g(S) + F_\Omega(S) = -G\frac{Mm}{(r-R)^2} + \Omega^2 (r-R) < 0$$

Le point S se retrouve ainsi plus attiré vers m que le point O (ou tout autre point de M). C'est ce que notre intuition prévoyait. Par contre, ce qui est plus inattendu, c'est ce qui se passe au point A (antilunaire), où la force gravitationnelle est plus faible, et la force centrifuge plus forte:

$$F_g(A) + F_\Omega(A) = -G\frac{Mm}{(r+R)^2} + \Omega^2 (r+R) > 0\,.$$

Le point A subit une force opposée à celle que subit S. La Terre s'allonge un peu à la manière d'un ballon de rugby. C'est ainsi qu'il y a deux marées par jour.

D'autre part, la magnitude de la force de marée peut s'estimer en comparant la gravité à la surface de l'objet M, $g=GM/R^2$, et l'accélération totale au point S:

$$g_{eff} = \frac{GM}{R^2} - 3\frac{Gm}{r^2}\left(\frac{R}{r}\right) = \frac{GM}{R^2}\left[1 - 3\left(\frac{R}{r}\right)^3 \frac{m}{M}\right]$$

La force de marée par unité de masse est donc:

$$f_m \approx -3\frac{GM}{R^2}\left(\frac{m}{M}\right)\left(\frac{R}{r}\right)^3$$

Ce qu'il faut retenir c'est que la force de marée est très fortement dépendante du rapport R/r. Dans le cas du système Terre-Lune, ce rapport est égal à 6400/384000=0.017. C'est un rapport faible. Dès que ce rapport diminue (si la distance r augmente), la magnitude des forces de marée diminue avec le cube de ce rapport.

On peut comparer les forces de marée qu'exercent sur la Terre le Soleil et la Lune:

$$\frac{f_{m,lune}}{f_{m,soleil}} = \frac{(R/r_{lune})^3 m_{lune}}{(R/r_{soleil})^3 m_{soleil}} \approx 2.7$$

C'est ainsi que la Lune, malgré sa masse qui est près de trente millions de fois plus faible que celle du Soleil, a un effet plus grand sur les marées terrestres que le Soleil.

Dans certains cas, cette force de marée peut devenir plus grande que la force de cohésion d'un objet. C'est le cas de la comète Shoemaker-Levy 9 (SL9) qui en 1994 a été brisée lors d'une rencontre proche avec Jupiter, puis a impacté cette planète. L'étude de son orbite a ainsi permis de montrer que sa cohésion et donc sa densité étaient faibles. SL9 était un agrégat de glaces et de roches faiblement liées entre elles. Cette découverte a été un pas important dans la réalisation que les comètes n'étaient pas nécessairement des objets denses et compacts.

Synchronisation

Ce n'est qu'en 1959 que la sonde soviétique *Luna 3* pu photographier pour la première fois la face cachée de la Lune. Si cette face nous est cachée, c'est parce que la Lune présente toujours la même face à la Terre. En termes plus techniques, on dit que la Lune est synchronisée, ou encore en rotation synchrone autour de la Terre. Sa période de rotation sur elle-même est exactement égale à sa période de révolution autour de la Terre. Ce n'est pas le fait du hasard: là encore, les forces de marée sont à l'œuvre. Voyons comment.

Nous avons vu que les forces de marée entraînent une déformation des objets, en l'occurrence une élongation dans la direction des deux centres de masse. Supposons maintenant que l'un des deux objets tourne sur lui-même avec une période différente de la période orbitale du système (il est donc en rotation asynchrone).

Comme le montre la figure 3, il va y avoir un léger décalage d'un angle δ entre la direction entre les deux centres de masse O-o et celle entre les deux maxima d'élongation AS. Ce décalage est dû au fait que la réponse à la force de marée n'est pas instantanée. Du coup, l'on peut voir qu'il s'exerce un couple de force en A et en S qui s'oppose à la rotation de M. Dans la figure 3, la planète tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. On peut vérifier que si la rotation est inversée, δ change de signe, et le couple de forces de marée s'exerce dans l'autre sens. Ce couple entraîne toujours la planète vers une rotation synchrone (δ=0).

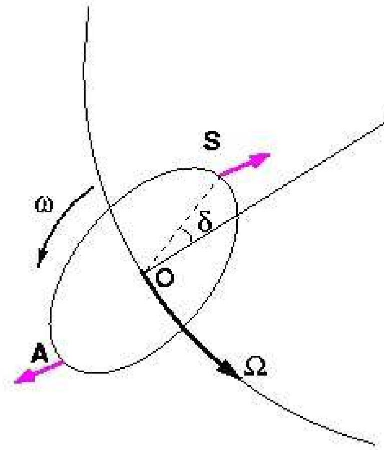

***Figure 3**: synchronisation d'une planète par effet de marée. Le couple de force s'exerçant en A et S correspond à la somme des forces gravitationnelle et centrifuge. Il s'oppose à la rotation tant que $\omega \neq \Omega$ ($\delta \neq 0$)*

C'est ainsi que la Lune présente toujours la même face à la Terre. La Terre par contre ne présente pas toujours la même face à la Lune: notre période de rotation est de 24 heures, pour une période de révolution lunaire de 29 jours environ. Ceci est dû à la grande différence de masse entre les deux: la Lune étant environ cent fois moins massive que la Terre, elle n'a que peu ralenti sa rotation. En fait, l'on estime que la synchronisation de la Terre s'effectue au rythme de 2 millisecondes en plus par siècle. Les recherches actuelles indiquent qu'il y a environ 900 millions d'années, il y avait 481 jours de 18 heures par an.

Il est à noter que la modification progressive du taux de rotation d'un corps ne conduit pas nécessairement à une rotation synchrone. Ainsi, dans le cas de Mercure, une résonance s'établit pour laquelle la planète accomplit 3 rotation sur elle-même en 2 révolutions autour du Soleil (figure 4).

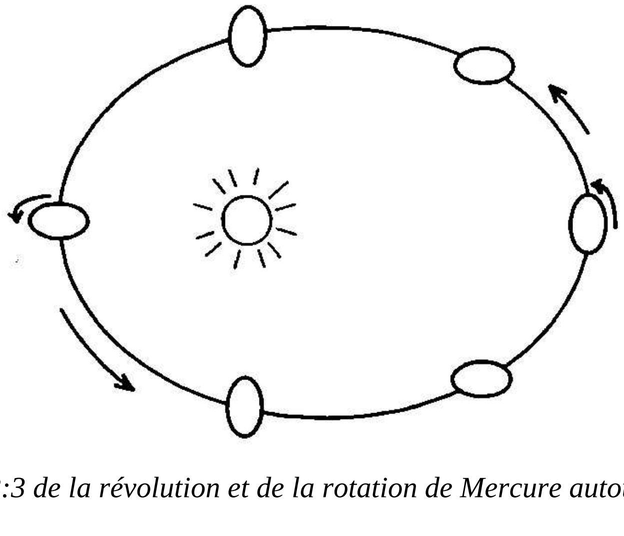

***Figure 4**: Résonance 2:3 de la révolution et de la rotation de Mercure autour du Soleil.*

Migration

La Lune s'éloigne de la Terre! En effet, le ralentissement de la rotation de la Terre implique que celle-ci perd du moment cinétique. Or, nous avons vu que le moment cinétique est une quantité qui est conservée. Ce moment cinétique doit donc être transféré. En effet, l'on peut voir sur la figure 3 que le corps M a tendance à accélérer m dans le sens de son mouvement. Ainsi la Terre donne à la Lune un peu de son moment cinétique. Ce moment cinétique est utilisé pour augmenter la taille de l'orbite lunaire. C'est ainsi que la Lune s'éloigne de la Terre d'environ 4 centimètres par an.

La situation inverse peut survenir dans le cas de planètes très proches de leur étoile. Comme les étoiles similaires à notre Soleil tournent sur elles-même lentement en général, elles ont tendance à attirer vers elles des compagnons planétaires très proches. Ce phénomène est très lent, et n'est en général pas pris en compte.

Cette migration pourrait néanmoins jouer un rôle crucial pour le devenir de notre Terre. En effet, lorsque dans 5 milliards d'années le Soleil aura brûlé son hydrogène central et se transformera en une étoile géante rouge, son orbite augmentera jusqu'à englober l'orbite de la Terre, et même celle de Mars. Est-ce là la fin de notre planète? Pas sur, car il perdra aussi de la masse et l'on estime que cela devrait être suffisant pour que l'orbite de la Terre s'étende hors d'atteinte de ce Soleil géant. Mais cela n'est pas sûr: car les marées exercées par la Terre sur l'enveloppe du Soleil pourraient être très efficaces et conduire notre petite planète à plonger dans le Soleil…

Circularisation

Les forces de marée ont aussi pour effet de modifier l'orbite des objets eux-mêmes. Nous avons vu que dans le cas le plus général, les orbites sont elliptiques (ou de façon équivalente, excentrique), c'est-à-dire que leur excentricité e est non nulle. Les forces de marée vont avoir en général tendance à rendre ces orbites circulaires. Le principe est le suivant: Supposons que notre corps M a une orbite excentrique autour de m, mais que sa rotation est synchrone (la synchronisation est en effet généralement plus rapide). Comme le passage au périastre (c'est-à-dire au point le plus proche de m) s'effectue beaucoup plus rapidement que le passage à l'apoastre, l'angle δ que nous avons utilisé précédemment sera en général non-nul. Un couple de force va ainsi s'exercer qui va repousser le corps M au périastre, et l'attirer à l'apoastre. Le résultat sera de rendre l'orbite plus circulaire.

Ce phénomène peut être étudié dans le cas des étoiles binaires, mais aussi pour les systèmes étoile-planètes. L'on connaît en effet à ce jour plus de cent planètes en orbite autour d'étoiles semblables à notre Soleil. Ces planètes sont plus ou moins proches de leur étoile, et leurs orbites sont plus ou moins excentriques. C'est ce que montre la figure 5, ou chaque système connu est indiqué par un point, et le demi-grand axe a est donné en fonction de l'excentricité e. Ce qui nous intéresse par rapport aux effets de marée, c'est la brusque diminution de l'excentricité moyenne pour $a<0.07$ UA. Cette circularisation des orbites est due aux effets de marée entre la planète et son étoile. On peut montrer que le temps caractéristique de circularisation est proportionnel à $(R/r)^6$. Ce temps augmente donc extrêmement vite en fonction de la distance à l'étoile r. D'où ce changement abrupt à 0.07 UA.

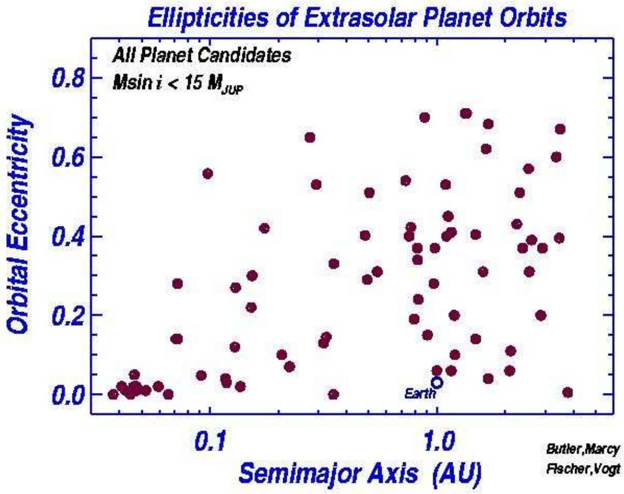

Figure 5*: Excentricité des orbites des planètes extrasolaires en fonction de leur demi-grand axe (d'après Butler et al. 2000).*

Chauffage interne

Une dernière conséquence des effets de marée abordée ici est le chauffage interne. En effet, lors de la synchronisation ou de la circularisation, de l'énergie est dissipée à l'intérieur du corps qui subit la marée. On peut appréhender ceci en malaxant une boule de pâte à modeler: la friction dans la pâte à tendance à la chauffer. Le même processus est à l'œuvre dans les planètes.

Ce processus est particulièrement important dans le cas des satellites galiléens de Jupiter, et en particulier du plus proche d'entre eux: Io. Io a à peu près la même taille que notre Lune, et orbite à peu près à la même distance de Jupiter que la Lune de la Terre. Mais il y a deux différences de taille: D'abord, Jupiter est 318 fois plus massive que la Terre. Ensuite, Io, Europe et Ganymède sont en résonance orbitale: quand Ganymède, plus lointaine fait une révolution autour de Jupiter, Europe en fait deux et Io quatre.

C'est ainsi qu'en 1979, S. Peale et P. Cassen, deux astronomes américains prévoyèrent que ce phénomène de résonance devait forcer l'excentricité de Io à être non-nulle (e~0.004) et que les forces de marée de Jupiter devaient ainsi conduire à la dissipation d'une grande quantité d'énergie. Quelques mois plus tard, la sonde *Voyager* arriva près de Jupiter et mis en évidence une activité volcanique intense. L'on sait maintenant que Io est parmi toutes les planètes et leurs satellites du Système Solaire, celui dont l'activité volcanique est la plus intense.

Ce phénomène affecte probablement aussi les "Pégasides", ces planètes extrasolaires très proches de leurs étoiles et dont on a vu que les orbites étaient en général circularisées. Dans le cas de l'une de ces Pégasides, HD209458b, on a pu déterminer sa masse et son rayon, grâce au fait que la planète passe tous les 3.5 jours entre son étoile et nous. Son rayon est d'environ 35% plus grand que celui de Jupiter. On sait ainsi que cette planète est faite essentiellement de gaz (hydrogène et hélium), comme Jupiter, mais que le chauffage de l'étoile a considérablement ralenti son refroidissement. Mais ce n'est pas tout: on pense que ce rayon est trop grand par rapport à ce que prévoient les modèles d'évolution de ces planètes. Il manque une source d'énergie pour ralentir la contraction de la planète (figure 6).

Deux explications ont été proposées: selon l'une proposée par Peter Bodenheimer et ses collègues, une planète pour l'instant invisible forcerait l'excentricité de HD209458b a être non nulle. Comme dans le cas de Io, de l'énergie pourrait alors être dissipée dans l'intérieur de la planète. L'autre explication, due à Tristan Guillot et Adam Showman, est que le chauffage atmosphérique pourrait générer de l'énergie cinétique (des vents) dans l'atmosphère, que cette énergie cinétique pourrait être transportée en profondeur et dissipée, la aussi lié aux effets de marée qui tendent à maintenir l'intérieur dans un état de rotation synchrone.

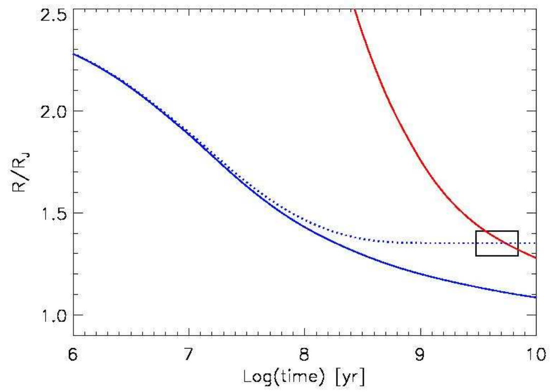

Figure 6*: rayon de HD209458b en fonction du temps, pour un modèle d'atmosphère chaude et irréaliste (en rouge), pour un modèle d'atmosphère froide (en bleu) et pour ce même modèle en incluant de la dissipation interne (pointillés). La valeur du rayon et de l'âge de la planète est indiquée par la boîte noire. [D'après Guillot & Showman 2002]*

Dans un avenir proche, la mission franco-européenne COROT devrait fournir des renseignements cruciaux sur des dizaines, voire des centaines de planètes extrasolaires, et ainsi permettre de mieux comprendre l'effet des forces de marée, leur évolution, et leur formation.

Quelques références

Sur le web:
www.nineplanets.org
www.obspm.fr/planets

Beaucoup plus spécialisé:
Bodenheimer P.H., Lin D.N.C., Mardling R.A. "On the tidal inflation of short-period extrasolar planets", *ApJ* **548**, 466 (2001)
Chapman S. & Lindzen R. *Atmospheric tides. Thermal and gravitational*. Dordrecht, Reidel (1970)
Goldreich P. & Peale S.J. "The dynamics of planetary rotation", *Ann. Rev. A&A* **6**, 287 (1968)
Guillot T. & Showman A. "Evolution of 51 Peg b-like planets", *A&A* **385**, 156 (2002)
Hut P. "Tidal evolution in close binary systems", *A&A* **99**, 126 (1980)
Peale S.J. & Cassen P. "Melting of Io by tidal dissipation", *Science* **203**, 892 (1979)