

Les effets de marée dans l'univers

L. Bernard, C. Larcher, E. Wernli

Résumé : *Les différentes parties d'un corps étendu placé dans un champ de gravitation, sont soumises à un gradient de force, qui va se traduire par des tensions internes susceptibles de déformer ce corps. Cet effet est omniprésent dans l'Univers régi par la gravitation. Nous allons nous intéresser à quelques uns de ses aspects dans le système solaire et au-delà.*

Introduction

En 1993, C Shoemaker et D. Levy découvrent un curieux chapelet de petits objets au voisinage de Jupiter. Ils l'identifient aux restes d'une comète fragmentée par effet de marée, suite à son passage, un an plus tôt, près de la planète géante. Les fragments, piégés dans le champ gravitationnel, percutent la planète en juillet 1994. Ces phénomènes de marée doivent être courants dans l'univers puisqu'ils font intervenir la gravitation. C'est ce que nous allons découvrir.

Phénomène physique

Le phénomène des marées a été interprété par Newton. Pour en donner une explication nous allons reprendre une image chère à Einstein : l'image d'un ascenseur en chute libre dans un champ de gravitation. Tous les objets contenus dans l'ascenseur tombent, en première approximation, avec la même accélération. Tout se passe donc à peu près, comme si le champ gravitationnel était effacé.

Cependant, les points situés en haut sont moins fortement accélérés que les points situés en bas, puisqu'ils sont plus loin de la source du champ de gravitation. Les points du bas et du haut tendront donc à s'éloigner les uns des autres¹.

¹ Pour prendre une autre image triviale, imaginons deux voitures proches, la première accélérant plus que la seconde, elles se sépareraient.

Les parois de l'ascenseur seront sollicitées par une force d'étirement. Mais la cohésion de l'ascenseur pourra se maintenir, du moins tant que la force responsable de cette différence d'accélération ne sera pas plus forte que la résistance mécanique.

Comment expliquer les marées à de jeunes enfants

On prend trois enfants qui se placent en ligne, serrés les uns contre les autres. L'enfant du milieu représente la Terre solide et les enfants de part et d'autre représentent la mer entourant la Terre.

La maîtresse se place dans l'axe d'alignement des enfants. Elle explique qu'elle est la Lune et qu'elle attire les trois enfants. Le plus proche d'elle fera trois pas dans sa direction. Celui du milieu, moins attiré, fera deux pas et l'enfant le plus éloigné de la maîtresse fera un seul pas. Le résultat est que, des deux côtés, la mer se sera éloignée de la Terre.

Selon F. Berthomieu

L'expression de cette différence d'accélération gravitationnelle s'obtient en dérivant l'expression de l'accélération newtonienne :

$$a = G \frac{M}{d^2} \quad (1)$$

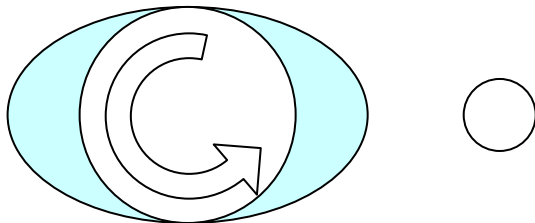
Elle s'écrit donc (en valeur absolue) :

$$\Delta a \approx \frac{2GM}{d^3} \Delta d \quad (2)$$

Δd est la distance entre deux points voisins qui vont subir l'effet de marée (par exemple le diamètre de l'astre si on considère deux points diamétralement opposés). La masse M est celle du corps qui produit l'effet sur l'astre considéré situé à la distance d . On dit qu'il se produit un gradient de champ gravitationnel.

Cas du système Terre-Lune-Soleil

La Terre soumise aux gradients de champ de gravitation produits par la Lune et le Soleil subit donc des effets de marées. L'étirement auquel la Terre est soumise agit essentiellement sur les parties les plus mobiles, c'est-à-dire les mers et les océans.



Nous comprenons aisément que quand la Lune et le Soleil ajoutent leurs contributions (à la nouvelle ou à la pleine lune), l'effet de marée est plus important. Ce sont les fortes marées. En revanche, si leurs contributions s'opposent (au premier ou dernier quartier de lune) nous avons des petites marées. Mais le phénomène est un peu plus compliqué, comme nous allons le voir.

Considérons pour simplifier la contribution d'un seul corps, la Lune par exemple². Comme nous l'avons expliqué, il se produit un double renflement des eaux, résultant en deux marées hautes par 24 heures. Ces renflements doivent s'orienter selon la ligne reliant la Terre et le corps attracteur. Par suite de la rotation de la Terre sur elle-même et de la rotation de la Terre autour du centre de gravité qu'elle partage avec le corps

² Le Soleil exerce lui aussi un effet sur les océans mais son action est environ deux fois plus faible que celle de la Lune (voir l'encadré)

attracteur³, ce renflement doit être vu comme une vague parcourant la Terre. Mais, les eaux ne circulent pas librement à cause de la configuration du relief terrestre. Il apparaît donc une force qui s'oppose à la rotation de la Terre. La Terre ralentit. Ce ralentissement est très faible (0,002 s par siècle). Par suite de la conservation du moment angulaire du couple Terre Lune, il s'ensuit une augmentation de la distance Terre Lune d'environ 3 cm par an, comme cela a été vérifié par télémétrie LASER. Une conséquence de ce ralentissement est que la rotation de la Terre sur elle-même tend à se synchroniser avec la rotation de la Lune autour de la Terre. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la Lune nous montre toujours la même face.

Effets comparés de la Lune et du Soleil

Avec la relation (1), calculer le rapport des accélérations gravitationnelles sur la Terre exercées par la Lune et le Soleil. Vous trouverez que le Soleil exerce sur les corps de la Terre une accélération 175 fois plus forte que celle produite par la Lune. Notez que pour calculer ce rapport la connaissance de G n'est pas nécessaire.

Avec la relation (2), calculer maintenant le rapport des accélérations différentielles Δa produites par le Soleil et par la Lune sur deux points diamétralement opposés de la Terre ($\Delta d = D_{\text{Terre}}$). Vous trouverez que l'effet de marée due à la Lune est environ 2 fois plus fort que celui dû au Soleil.

Ce résultat montre bien qu'il ne faut pas confondre attraction gravitationnelle et effet de marée.

On rappelle quelques données numériques :

$$M_{\text{Soleil}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg} ; M_{\text{Lune}} = M_{\text{Soleil}}/83$$

$$d_{\text{Terre-Soleil}} = 150 \cdot 10^9 \text{ m} ; d_{\text{Terre-Lune}} = 380 \cdot 10^6 \text{ m} ;$$

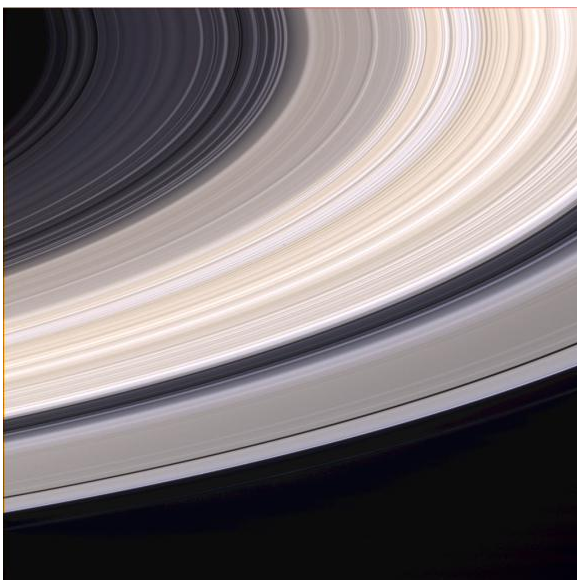
$$D_{\text{Terre}} = 13 \cdot 10^6 \text{ m}$$

³ Étant donné que la Terre tourne en 24 heures et que la Lune progresse dans le même sens autour de la Terre en 27 jours 1/3, la Lune passe à un méridien donné toutes les 24 heures 50 minutes. L'intervalle entre deux marées consécutives sera en moyenne de 12 heures 25 minutes.

Signalons pour conclure que sur Terre il existe aussi des marées continentales et atmosphériques. La marée relative à la partie solide est mesurable, l'amplitude étant de l'ordre de 30 à 50 cm. Elle causa un temps quelques troubles aux chercheurs du CERN qui avaient noté une corrélation entre le passage de la Lune et certaines anomalies lors d'expériences avec les accélérateurs de particules.

Les anneaux des planètes géantes

Observés par Galilée (1610), interprétés correctement par Huygens (1655), les anneaux de Saturne sont les seuls connus avant 1977. L'observation d'occultations d'étoiles par Uranus depuis la Terre, laissa penser qu'il présentait aussi un système d'anneaux, ce qui fut confirmé par les sondes interplanétaires... qui photographièrent aussi des anneaux autour de Jupiter et Neptune !



Anneaux de Saturne (NASA)

En 1849, Édouard ROCHE calcule qu'un satellite fluide⁴ s'approchant d'un astre de rayon R perd sa cohésion en deçà d'une limite donnée par :

$$d_{\text{lim.}} = 2,45 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}} R,$$

⁴ Dans son mémoire "La figure d'une masse fluide, soumise à l'attraction d'un point éloigné", E. Roche ne prend en compte que la cohésion gravitationnelle, négligeant ainsi les forces de cohésion électromagnétique de la matière.

(ρ_M et ρ_m étant les masses volumiques respectives des deux objets).

Limite de Roche

Le calcul précis de cet effet est très complexe. On peut néanmoins retrouver la forme de cette expression dans un modèle simplifié, en écrivant que l'instabilité intervient quand la force de marée sur un élément de masse μ devient égale à la force newtonienne de cohésion gravitationnelle :

$$\frac{2GMr}{d^3} \mu = \frac{Gm}{r^2} \mu$$

En remplaçant M par $\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_M$ et m par $\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_m$, on retrouve que la limite d_{lim} est de la forme :

$$d_{\text{lim.}} \propto \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}} R$$

Le coefficient de proportionnalité trouvé ainsi serait de $\sqrt[3]{2} = 1,26$ au lieu de 2,45 par la théorie complète.

Les anneaux des planètes géantes sont tous contenus à l'intérieur de la limite de Roche. Les spécialistes pensent qu'ils correspondent à des particules qui n'ont pas pu s'accréter plutôt qu'à des satellites qui auraient éclaté.

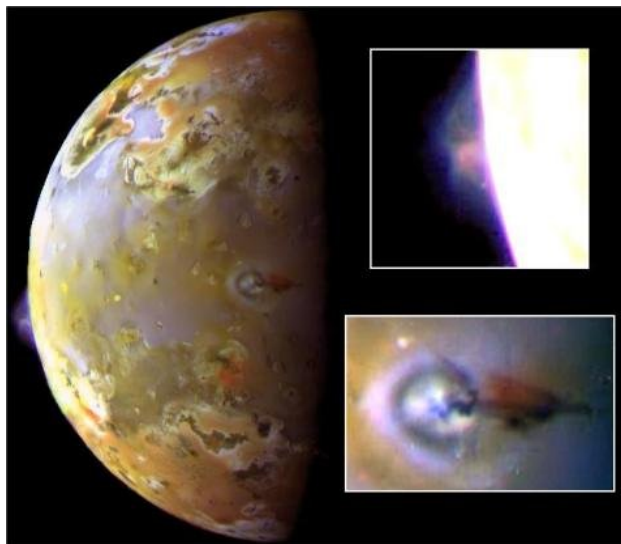
On pense que les fragments constituant les anneaux sont essentiellement constitués de glaces. Un calcul simple montre que la longueur d'un "glaçon" près de Saturne ne pourrait dépasser quelques dizaines de kilomètres.

D'autres faits

Signalons d'autres faits qui, dans le système solaire, se rattachent aux effets de marées.

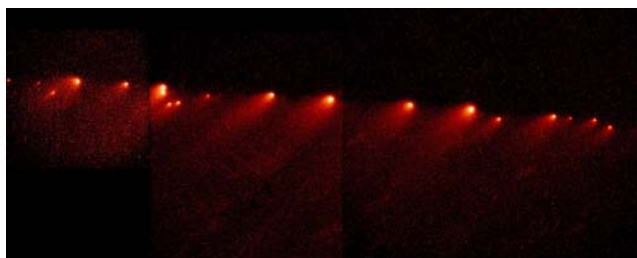
- L'intense activité volcanique de Io (satellite proche de Jupiter) serait probablement due aux interactions de marée avec Europe, Ganymède et Jupiter. Bien qu'Io présente toujours la même face à Jupiter, les interactions avec Europe et Ganymède le

font osciller un peu. Cette interaction déforme la surface de Io qui se soulève et s'abaisse avec une amplitude de 100 m environ, en produisant de la chaleur par frottement interne. Ainsi s'expliquerait l'intense activité volcanique de Io.



Activité volcanique sur Io (NASA)

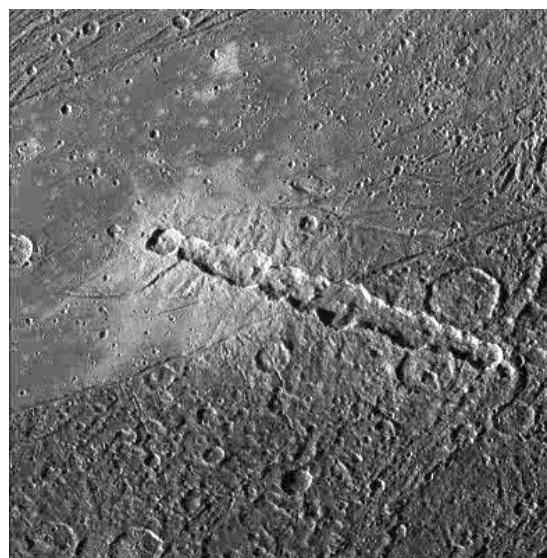
- La comète Shoemaker-Levy 9, découverte en 1993 par les susnommés, était composée d'une vingtaine de fragments. L'analyse de son orbite révéla qu'en 1992, cette comète s'était approchée de la surface de Jupiter (à seulement 40 000 km), en l'occurrence en deçà de la limite de Roche de la planète. La comète se disloqua probablement à ce moment-là. Les fragments tombèrent sur Jupiter en 1994, donnant lieu à un chapelet d'impacts dans l'atmosphère jovienne (voir CC114 « *Le danger vient de l'espace* »)



Comète Shoemaker-Levy (NASA)

- Des alignements presque parfaits de cratères observés sur Callisto et

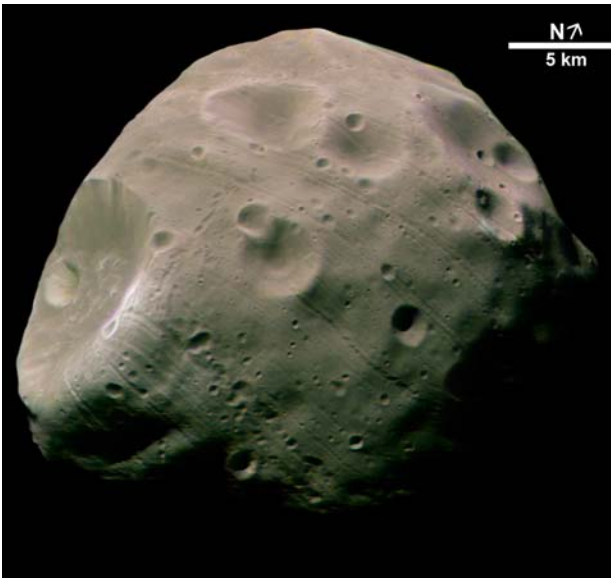
Ganymède⁵ restaient inexplicés depuis leur observation lors des missions Voyager. Nous pouvons désormais supposer que d'autres comètes ont pu partager un destin tout à fait similaire à celui de Shoemaker-Levy 9. Passant au voisinage de Jupiter en deçà de la limite de Roche de Jupiter, ces comètes ont pu se disloquer avant de finir leur course sur les lunes joviennes.



Chaîne de cratères d'impacts sur Ganymède (NASA)

- Phobos se rapproche de Mars à un taux de 1,8 m par siècle, car il se situe en dessous de l'orbite synchrone de Mars (il tourne plus vite autour de Mars que celle-ci ne tourne sur elle-même). Les stries parallèles observées à la surface de Phobos, perpendiculaires à la ligne Phobos-Mars, semblent d'ailleurs corrélées aux violentes forces de marée qu'il subit, et annonceraient une amorce de dislocation. En se rapprochant inexorablement de sa planète hôte, Phobos va soit s'écraser sur Mars, soit, plus probablement, se pulvériser en anneau en franchissant la limite de Roche de Mars.

⁵ On voit aussi de semblables alignements sur la Lune



Phobos (ESA)

Marées dans l'univers

Nous avons vu qu'un corps en orbite autour d'un autre corps possède une "limite" en dessous de laquelle sa cohésion n'est plus assurée. Les régions de l'espace où les particules sont gravitationnellement liées à l'un ou l'autre des corps se rejoignent au point appelé point de Lagrange L1 du système.

Les Novae

Dans le cas d'un système binaire composé d'une naine blanche et d'une étoile géante, la naine blanche va pouvoir accréter de l'hydrogène par ce point L1. De par la forte gravité à la surface de la naine blanche, les gaz vont être comprimés et chauffés, jusqu'au déclenchement de la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium. L'énorme quantité d'énergie libérée par ce processus expulse les gaz restants de la surface de la naine blanche et produit un éclat extrêmement lumineux mais de courte durée.



Vue d'artiste d'une naine blanche (droite) accréant la matière d'une étoile géante (gauche), à l'origine d'une nova.

Cette explosion, baptisée *nova*⁶ peut être récurrente ou même plus radicale, dans le cas où la naine blanche a accréte suffisamment de matière pour atteindre la masse limite (dite de Chandrasekhar), au-delà de laquelle la pression des électrons ne suffit plus à contrebalancer la gravitation. On assiste alors à l'implosion de la naine blanche, suivie d'une explosion en supernova de type Ia.

Bras de marée dans les galaxies

Lors d'une fusion de galaxies, les étoiles qu'elles contiennent ont très peu de risques d'entrer en collision : les galaxies passent tout simplement l'une à travers l'autre. Cependant l'aspect global des galaxies est modifié sous l'action de forces de marée.



Baptisées « souris » à cause de leur longue queue, ces galaxies spirales sont apparemment déjà passées au travers l'une de l'autre.

De par la taille de chacune des galaxies, le gradient de force gravitationnelle est très important. Les effets de marée sont ainsi à l'origine de la formation des antennes, queues ou bras observés pour des galaxies en interaction.

Ainsi on se rend compte que ces phénomènes de marées sont omniprésents dans l'Univers. Ils ont même été invoqués dans la théorie de l'évaporation des trous noirs !

■

⁶ "nova" signifie "nouvelle" en latin. La naine blanche subitement plus lumineuse est devenue visible, telle une étoile nouvelle.