ARTICLE DE FOND

La face cachée de la Lune

Béatrice Sandré

Pourquoi la Lune nous présente-t-elle toujours la même face ? À cause des forces de marée de la Terre sur la Lune lit-on souvent. Béatrice Sandré nous détaille ici les calculs.

Champ de marée sur la Lune

Un point matériel de masse m est immobile en un point A de la surface lunaire. Faisons le bilan des forces qui s'exercent sur lui. Outre la réaction du sol, il est soumis à la force de gravitation exercée par la Lune. Mais la Lune ayant un mouvement de rotation par rapport au référentiel « lunocentrique », on doit ajouter à la force de gravitation une force d'inertie centrifuge. Comme sur Terre, nous appellerons poids de m la somme de la force de gravitation lunaire et de cette force d'inertie centrifuge.

Le bilan de force serait terminé si la Lune était seule dans l'univers. Mais la Terre, le Soleil et les autres astres exercent sur chaque point de la Lune un champ de gravitation $\vec{g}_{ext}$ qui vaut $\vec{g}_{Aext}$ au point A.

Ce champ a deux effets :
- le point matériel m est soumis à la force supplémentaire $m\,\vec{g}_{Aext}$
- la Lune toute entière est soumise à la force $\iiint_{Lune} \vec{g}_{ext}\,dm$

D'après la loi de Newton, le centre d'inertie C de la Lune est animé d'un mouvement approximativement elliptique autour de la Terre (approximativement seulement à cause du Soleil et des autres astres) donnant au référentiel lunocentrique un mouvement de translation d'accélération $\frac{1}{M_L}\iiint_{Lune} \vec{g}_{ext}\,dm$. Comme son expression le montre, cette accélération est la valeur moyenne de $\vec{g}_{ext}$ sur l'ensemble de la Lune. Nous la noterons $\vec{g}_{Cext}$ car elle est pratiquement égale à $\vec{g}_{ext}$ au point C.

Il est donc nécessaire de reprendre le bilan des forces en ajoutant la force $m\,\vec{g}_{Aext}$ et la force d'inertie d'entraînement due au caractère non galiléen du référentiel lunocentrique, $-m\,\vec{g}_{Cext}$. La somme de ces deux forces, $m\left(\vec{g}_{Aext} - \vec{g}_{Cext}\right)$ est appelée force de marée en A et $\vec{g}_{Am} = \left(\vec{g}_{Aext} - \vec{g}_{Cext}\right)$ est le champ de marée au point A.

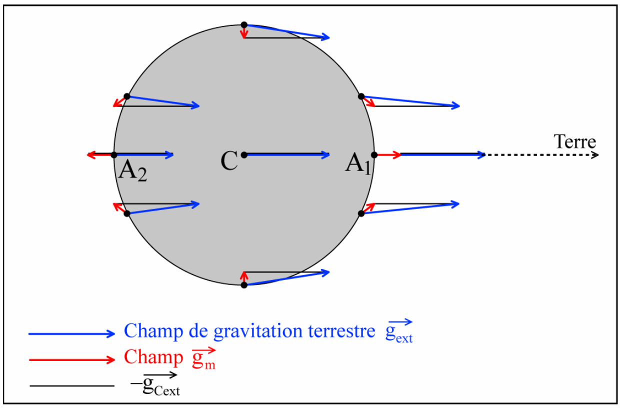

Fig.1.

La figure 1 représente le champ de marée créé par la Terre en quelques points de la surface lunaire.
A_1 est plus près de la Terre que C ; $g_{A_1ext} > g_{Cext}$ et le champ de marée en A_1 est orienté vers l'extérieur de la Lune. A_2 est plus loin de la Terre que C ; $g_{A_2ext} < g_{Cext}$ et le champ de marée en A_2 est encore orienté vers l'extérieur de la Lune.
C'est en A_1 et A_2 qu'il est maximum.
Le calcul de l'encadré 2 montre que le champ de marée créé par le Soleil (et à fortiori par les autres astres) est négligeable devant celui créé par la Terre.

La surface lunaire étant légèrement déformable, la Lune prend la forme d'un ballon ovale dont le grand axe est pointé vers la Terre. Le champ de marée a détruit la symétrie sphérique de la Lune et pour modéliser facilement cette déformation, nous ajouterons à la sphère Lune deux masses M diamétralement opposées (figure 2). Mais la non fluidité de la Lune ne permet pas à la déformation de se propager. Les masses M sont liées à deux points de la surface lunaire.

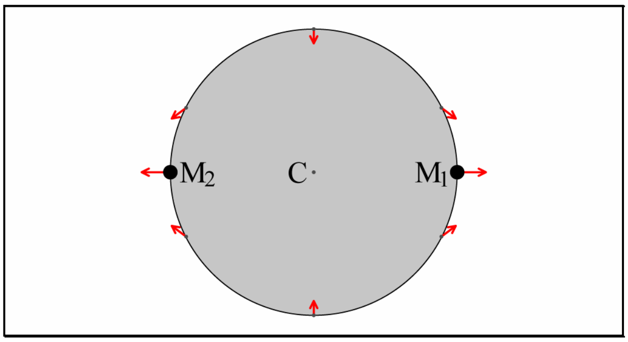

Fig.2.

Moments des forces de marées

Comment s'oriente la Lune ainsi déformée dans le référentiel lunocentrique ? Pour répondre à cette question, il suffit de considérer la somme des moments des forces extérieures et d'inertie d'entraînement qui s'exercent sur chaque point de la Lune et donc la somme des moments des forces de marée. Si la Lune avait gardé sa symétrie sphérique, la somme des moments des forces de marées serait nulle. Mais comme le montre les figures 3a et 3b, la présence des deux masses M crée un couple qui ramène à chaque instant le grand axe de la Lune dans la direction de la Terre. La vitesse de rotation de la Lune par rapport à son référentiel barycentrique est identique à la vitesse angulaire de son barycentre autour de la Terre. Le point M_1 reste face à la Terre et la demi-sphère de sommet M_2 reste invisible aux terriens et on l'appelle face cachée de la Lune.

Les périodes de rotation de la Lune sur elle-même et de son centre autour de la Terre sont égales

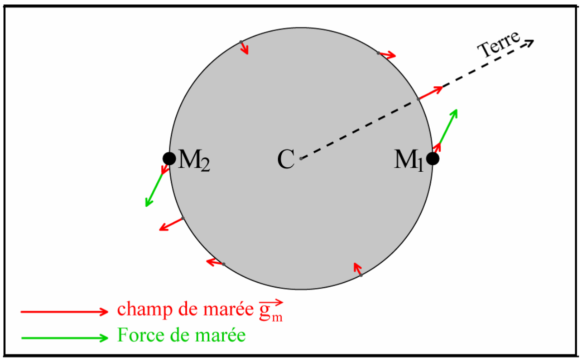

Fig.3a.

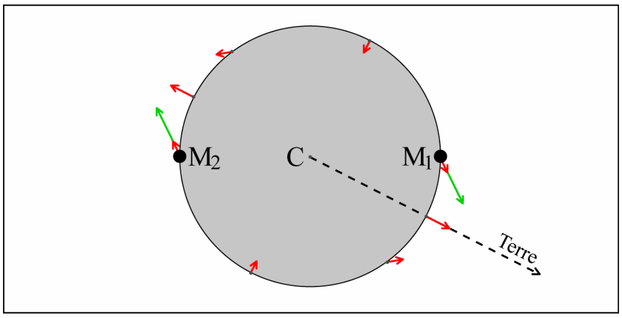

Fig.3b.

Évolution du système Terre-Lune

La Lune exerce elle aussi des marées sur la Terre. La Terre étant en partie fluide, la déformation se déplace à sa surface. Ce sont les marées océaniques. Elles sont à l'origine de frottements sur le fond des océans ; l'énergie du système Terre-Lune diminue progressivement et les caractéristiques Ω, ω, et D du système (voir encadré 1) se modifient.

Pour simplifier le problème sans changer la nature des résultats, nous supposerons l'axe de rotation de la Lune parallèle à celui de la Terre (la Lune est dans le plan de l'équateur) et les mouvements de la Terre et de la Lune tous uniformes.

Ω et D sont liés l'un à l'autre par la troisième loi de Kepler : $\Omega^2 D^3 = G\left(M_T + M_L\right)$ est une constante du mouvement. Si Ω diminue, D augmente et inversement. M_T étant bien supérieure à M_L, pour simplifier les expressions nous écrirons : $\Omega^2 D^3 = GM_T$

On applique le théorème du moment cinétique barycentrique au système Terre-Lune. Le champ de forces extérieures (attraction du Soleil et des autres astres) étant quasi uniforme, son moment cinétique $\vec{L}$ est constant.

Si on assimile la Terre et la Lune à des sphères homogènes de moment d'inertie $J = \frac{2}{5} MR^2$,

$$\vec{L} = \frac{2}{5} M_T R_T^2 \vec{\omega} + \frac{2}{5} M_L R_L^2 \vec{\Omega} + M_L D^2 \vec{\Omega}$$

La distance D étant très grande devant R_T et les vecteurs rotation assimilés à des vecteurs parallèles et de même sens,

$L = \frac{2}{5} M_T R_T^2 \omega + M_L D^2 \Omega$ et avec la troisième loi de Kepler, $L = \frac{2}{5} M_T R_T^2 \omega + M_L \sqrt{GM_T}\sqrt{D}$

L est une deuxième constante du mouvement. Son expression montre que ω diminue si D augmente et inversement.

Il nous reste à comparer la « rapidité » avec laquelle ω et Ω varient avec D.

$$\frac{d\omega}{dD} = -\frac{5}{4}\frac{M_L}{M_T}\frac{\sqrt{GM_T}}{R_T^2\sqrt{D}}$$

$$\frac{2d\Omega}{\Omega} + \frac{3dD}{D} = 0$$

$$\frac{d\Omega}{dD} = -\frac{3}{2}\frac{\Omega}{D} = -\frac{3}{2}\frac{\sqrt{GM_T}}{D^2\sqrt{D}}$$

On retrouve bien sûr que $\frac{d\Omega}{dD}$ et $\frac{d\omega}{dD}$ sont négatives. De plus, $\frac{d\omega}{d\Omega} = \frac{5}{6}\frac{M_L}{M_T}\frac{D^2}{R_T^2} \approx 300$

ω varie beaucoup plus vite que Ω .

L'étude des anneaux de croissance des coraux fossiles montre qu'il y a 500 millions d'années, la durée du jour n'était que de 21 heures actuelles ; la perte d'énergie du système se traduit par une diminution de ω, donc une diminution 300 fois plus faible de Ω et une augmentation de D. La Lune s'éloigne de la Terre. Actuellement ω est supérieur à Ω ; il arrivera donc un moment où la vitesse de rotation de la Terre rejoindra celle de la Lune. Le jour terrestre sera identique au mois lunaire et la Terre présentera toujours la même face à la Lune. Un tel phénomène de synchronisation a dû se produire pour la Lune dans son histoire antérieure.

De même qu'aujourd'hui la Terre n'est visible que de la moitié de la Lune, dans des temps très lointains, la Lune ne sera plus visible que de la moitié de la Terre et il n'y aura plus de marées océaniques. (Il restera néanmoins les marées dues au Soleil, de moindre amplitude).

Mais il est probable que le Soleil évoluera plus rapidement et que transformé en géante rouge il englobe Terre et Lune avant que la synchronisation ne soit établie.

Encadré 1

Caractéristiques actuelles du système Terre Lune

Les masses $M_T = 6\times10^{24}\,\text{kg}$ et $M_L = 7\times10^{22}\,\text{kg}$

les rayons $R_T = 6400\text{ km}$ et $R_L = 1700\text{ km}$

Les périodes sidérales de rotation $T_T = 23{,}9$ heures et $T_L = 27{,}3$ jours

Vitesses angulaires $\omega = \frac{2\pi}{T_T}$ et $\Omega = \frac{2\pi}{T_L}$

Distance Terre-Lune $D = 380\,000\text{km}$

Encadré 2

M_T étant la masse de la Terre, D la distance du centre de la Terre au centre de la Lune et R le rayon de la Lune et G la constante gravitationnelle, $g_{Cext} = G\frac{M_T}{D^2}$, $g_{A_1ext} = G\frac{M_T}{(D-R)^2}$, $g_{A_2ext} = G\frac{M_T}{(D+R)^2}$

En A_1, $g_{A_1m} = g_{Cext}\left(\frac{D^2}{(D-R)^2} - 1\right) = G\frac{M_T}{D^2}\left(\left(1-\frac{R}{D}\right)^{-2} - 1\right) = G\frac{M_T}{D^2}\left(\frac{2R}{D}\right)$ en négligeant les termes d'ordre 2 en $\frac{R}{D}$ très petit devant 1.

Pour comparer les champs de marée lunaires créés par la Terre et le Soleil, il suffit de comparer $\frac{M_T}{D^3}$ et $\frac{M_S}{a^3}$,

M_S étant la masse du Soleil et a la distance Soleil Lune.

$M_T = 6\times10^{24}\,\text{kg}$, $M_S = 2\times10^{30}\,\text{kg}$

$D = 380\,000\text{ km}$, $a = 150\times10^6\,\text{km}$

$$\frac{M_T}{M_S}\times\left(\frac{a}{D}\right)^3 = 2\times10^2$$

Sur la Lune, le champ de marées solaire peut être négligé devant le champ de marée terrestre.

■