

Marées et orbites célestes¹

Gaston Fischer, *gfischer@vtx.ch*
Rue de Rugin 1A, 2034 Peseux, Suisse

Résumé : Par le terme de marée on décrit généralement les mouvements de la mer engendrés par les potentiels gravitationnels de la Lune et du Soleil. Il est moins bien connu que ces potentiels produisent aussi des déformations des parties solides du globe, les *marées terrestres* ou *marées solides*. Ces deux types de marées ont pour effet de ralentir peu à peu la vitesse de rotation de la Terre. La Terre à son tour cause des déformations périodiques de la Lune. C'est à la suite de ces marées lunaires que notre satellite nous présente toujours le même hémisphère. Si rien d'autre ne venait perturber le système Terre-Lune, notre planète finirait aussi par offrir toujours la même face à la Lune et dans cette situation les orbites des deux astres autour de leur centre de gravité commun finiraient par devenir parfaitement circulaires. Le système formé de Pluton et de son satellite Charon a déjà atteint ce stade ultime : les deux partenaires se font toujours face par les mêmes hémisphères et leurs orbites sont devenues idéalement circulaires.

Summary : When we speak of tides we generally mean water displacements induced in the seas by the gravitational potentials of the Moon and of the Sun. Less well known are deformations of the solid part of the Earth by the same potentials, the so-called *earth tides* or *solid tides*. As a consequence of these two kinds of tides the speed of rotation of the Earth's slowly decreases. But the Earth in turn produces periodic deformations of the Moon. It is as a consequence of such past lunar tides that our satellite today always presents the same hemisphere to us. If nothing else were to perturb the Earth-Moon system, our planet would finally also face the Moon always with the same side, and in this situation the orbits of the two bodies would finally become perfect circles around their common centre of gravity. The system of Pluto and its satellite Charon has already reached that ultimate state : the two partners always face each other with the same hemispheres and their orbits have become ideal circles.

Zusammenfassung : Mit dem Begriff der Gezeiten werden i.a. Wasserbewegungen der Meere gemeint, die durch die Schwerepotentiale von Mond und Sonne erzeugt werden. Weniger bekannt sind die *Erdgezeiten*, Verformungen der festen Erde durch die gleichen Potentiale. Als Folge beider Gezeiten wird die Rotationsgeschwindigkeit der Erde langsam gebremst. Die Erde ihrerseits verformt aber periodisch den Mond. Diese Mondgezeiten haben dazu geführt, dass wir von unserem Trabanten nur immer die gleiche Hemisphäre sehen. Wäre das System Erde-Mond von jeglichen anderen Ereignissen verschont, so würde schlussendlich auch unser Planet dem Mond dauernd nur eine Hemisphäre zuwenden. In dieser Situation würden sich dann die Bahnen der zwei Körper um ihren gemeinsamen Schwerpunkt zu idealen Kreisen verformen. Das System, bestehend aus dem Planeten Pluto und seinem Satelliten Charon, hat diesen Endzustand heute schon erreicht : beide Partner schauen sich immer von der gleichen Seite an und ihre Bahnen sind perfekte Kreise.

1. Marées marines et marées solides

La rotation de la Terre dans les potentiels gravitationnels de la Lune et du Soleil entraîne des variations périodiques de la pesanteur à sa surface. Les effets les plus connus et les plus frappants de ces interactions sont les *marées marines* ou *marées océaniques*. On ignore souvent qu'il y a aussi une déformation des parties solides du globe, les *marées solides* ou *marées terrestres*.

On sait aussi que le globe de la Terre est déformé par les forces centrifuges engendrées par sa rotation sur lui-même. Au lieu d'être essentiellement sphérique, notre globe a plutôt la forme d'un ellipsoïde de rotation aplati, tel que représenté de façon exagérée à la Fig. 1. En vérité l'aplatissement est faible, mais le diamètre équatorial dépasse tout de même le diamètre polaire de quelques 43 km. Lorsque se pose la question des interactions entre la Terre et la Lune ou le Soleil, on tiendra compte de cette déformation. Ainsi on décomposera notre globe en une partie centrale sphérique, dont les interactions avec Lune et Soleil se ramènent, en

¹Cet article a aussi paru dans: ORION no 315, février 2003, pp. 4-9.

première approximation, à des forces qui agissent aux centres des astres Terre, Lune et Soleil. Pour la ceinture extérieure de la Terre, on admettra des couples de forces supplémentaires, F_a et F_r , tels que représentés à la Fig. 1.

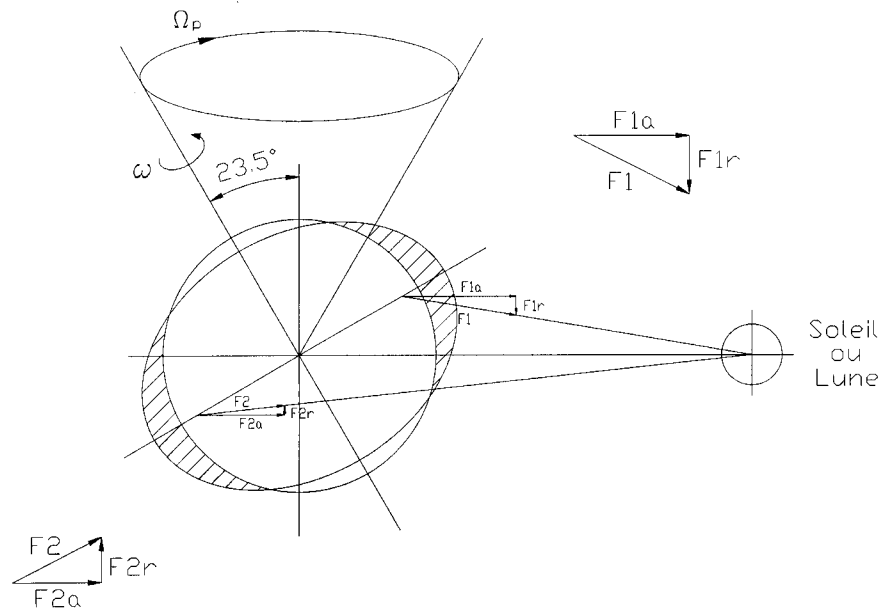


Fig. 1. Cette esquisse représente les déformations du globe terrestre résultant de sa rotation. Suite aux forces centrifuges, la Terre prend, en première approximation, la forme d'un ellipsoïde de rotation ou le diamètre équatorial dépasse le diamètre polaire de quelques 43 km. Au solstice d'été l'attraction gravitationnelle du Soleil peut être décomposée en une force centrale (pas indiquée) et deux couples de forces agissant sur les parties hachurées. Le couple constitué des forces F_{1r} et F_{2r} semble chercher à ramener le plan équatorial de la Terre dans le plan de l'écliptique. Mais vu la rotation de la Terre autour de son axe polaire, cette dernière se comporte comme une toupie et le couple de forces engendre alors une précession de l'axe polaire. Au solstice d'hiver les positions de la Terre et du Soleil sont inversées, mais le couple conserve la même direction et a donc le même effet. La Lune, dont le plan orbital ne fait qu'un angle de 5° avec celui de l'écliptique, contribue aussi à cette précession.

Suivant les positions relatives de la Lune et du Soleil, l'amplitude des forces F_{1a} et F_{1r} qui affectent la ceinture extérieure sera modulée. Même si les interactions gravitationnelles avec ces astres agissent sur tout le globe, on peut admettre qu'elles affectent avant tout la ceinture extérieure hachurée de la Fig. 1. Ces interactions moduleront plus fortement les forces F_{1a} et F_{1r} qui se trouvent du côté de la Lune ou du Soleil, alors que sur le côté opposé, F_{2a} et F_{2r} ces modulations seront plus faibles. Ces modulations sont la vraie cause des marées et leur dissymétrie est précisément ce qui engendre la symétrie des marées, comme le montre la Fig. 2. Si un lecteur a des difficultés à accepter cette symétrie, nous lui recommandons un texte d'Euler, qui essayait de convaincre les sceptiques en 1760 déjà [1].

La déformation elliptique due aux marées conduit à un effet semi-diurne; mais à cause de la rotation de la Lune en 30 j environ, les marées principales, celles d'origine lunaire, sont retardées de quelques 48 minutes chaque jour. Etant donné l'inclinaison de l'axe de rotation sur le plan orbital de la Lune, il y a cependant une forte dissymétrie de ces deux marées journalières, *l'inégalité des marées*. La Fig. 3 illustre bien cette dissymétrie et la Fig. 4 en donne un superbe enregistrement. Les points **A** et **B** sont de même latitude mais sont séparés d'environ 12 heures en longitude. Alors que **A** est proche du maximum de marée haute, le point **B** ne voit pratiquement pas de marée. Ainsi aux hautes latitudes, la marée peut n'avoir qu'une période diurne et la superposition des effets lunaires et solaires fait que l'on est en face d'un processus ondulatoire assez compliqué, bien illustré par la Fig. 4. Du point de vue de la

compréhension des marées, il faut surtout retenir l'allongement ellipsoïdal suggéré par la Fig. 2.

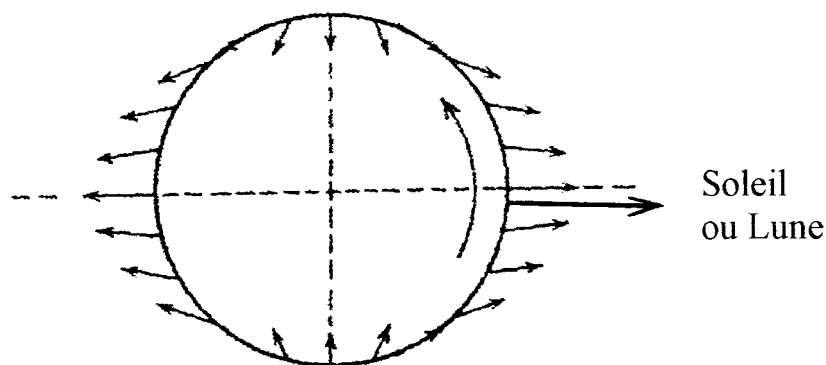


Fig. 2. Les forces résultant du potentiel des marées d'origine lunaire ou solaire. Si l'on fait abstraction des déphasages d'environ 3° pour les marées solides et de près de 90° en moyenne pour les marées marines (voir la Fig. 6), ces jeux de forces sont symétriques par rapport aux axes Terre-Lune ou Terre-Soleil.

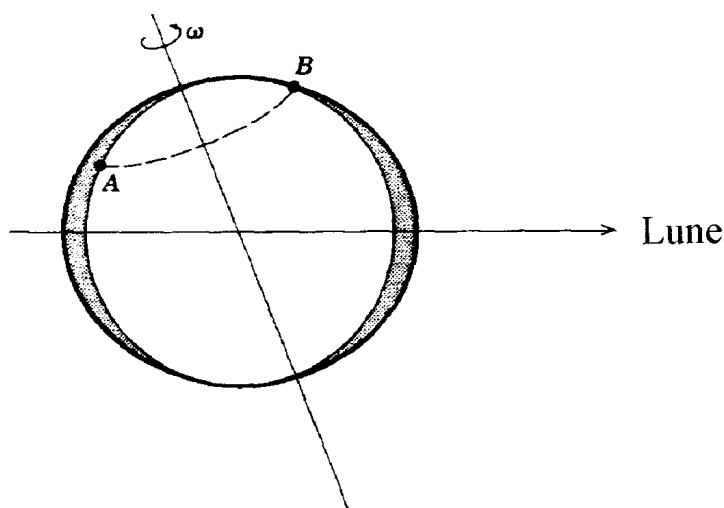


Fig. 3. Les marées sont des déformations beaucoup plus petites du globe que celles causées par sa rotation et décrites à la Fig.1. Il s'agit de petites élongations de l'ordre du mètre, symétriques selon les directions des axes Terre-Lune et Terre-Soleil. Ces déformations sont en général retardées par rapport aux positions des astres et l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre entraîne une dissymétrie des marées : *l'inégalité des marées*. Aux latitudes élevées on n'observe souvent qu'une seule marée par jour.

Notre présentation des marées a pourtant négligé un effet capital. En effet, nous avons admis que la Terre pouvait se déformer instantanément sous l'influence des forces F_{1a} et F_{2a} de la Fig. 1. Cela est approximativement vrai pour les marées terrestres, mais totalement faux pour les marées marines. Lors des marées terrestres les déplacements de matière sont presque parfaitement radiaux et peuvent atteindre la valeur d'un mètre dans les zones proches de l'équateur. Les marées océaniques par contre, engendrent d'énormes déplacements d'eau. Ces marées sont en fait des phénomènes très compliqués, où la topographie des côtes et des fonds marins joue un rôle essentiel. En haute mer, ces marées sont sans grande importance, alors qu'elles sont fortement amplifiées dans certaines baies, comme à Saint-Malo ou Fundy en Nouvelle Écosse (Canada), ou des estuaires comme celui de Bristol, où elles peuvent atteindre des amplitudes d'une trentaine de mètres entre minimum et maximum. Parfois elles sont aussi fortement retardées lorsque les côtes sont très découpées.

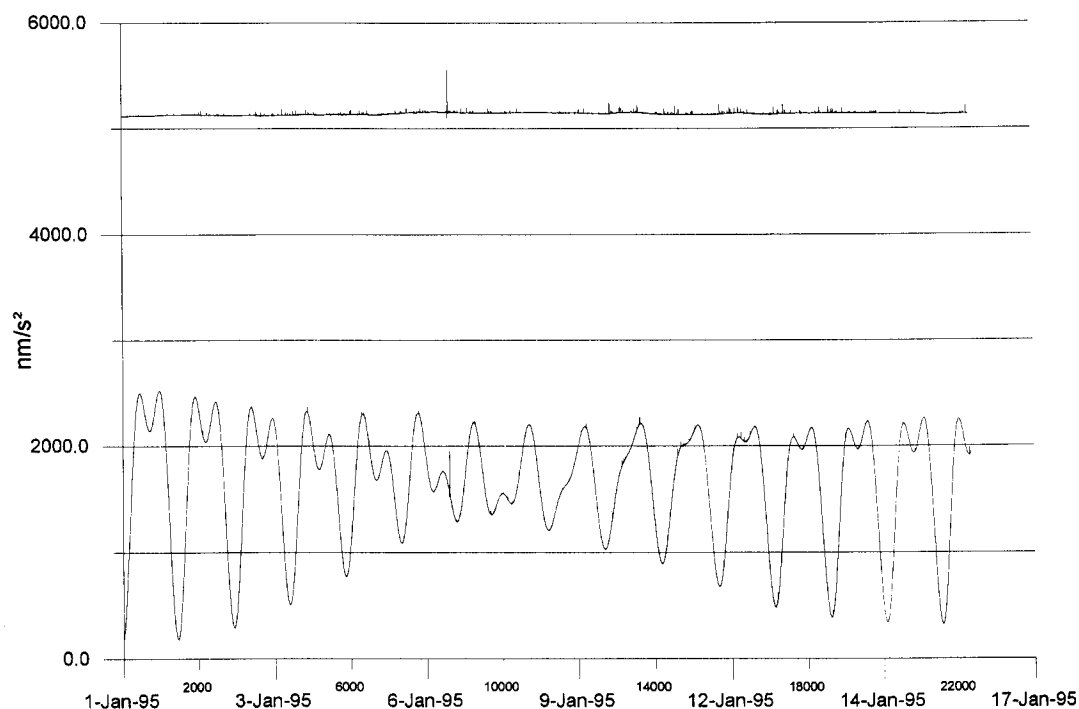


Fig. 4. Enregistrement gravimétrique des marées solides à la station belge de Membach ($50^{\circ} 33' 33''$ N, $6^{\circ} 00' 24''$ E) sur une douzaine de jours, au moyen d'un gravimètre à supraconductivité très sensible. Dans ce diagramme la marée haute correspond à une excursion vers le bas et l'on voit très bien *l'inégalité des marées*, le retard journalier de 48 minutes et l'interférence des effets de la Lune et du Soleil, qui se traduit par des battements à la cadence d'environ 15 jours. Au haut du diagramme on a reporté la ligne des résidus, soit ce qui reste une fois qu'on a soustrait la marée théorique calculée de la marée enregistrée : l'accord entre marées observées et calculées est remarquable. Le 6 janvier il y a une marque de calibration.

La Fig. 5 illustre bien les énormes déphasages que peuvent subir les marées océaniques. Dans la Mer du Nord, les marées viennent à la fois du sud par le Canal de la Manche et du nord en contournant les Iles Britanniques. Les déphasages sur ces deux trajets peuvent atteindre plus de 24 heures, soit pratiquement deux fois la période intrinsèque de 12 h et 24 m des marées. De Brest à Boulogne le déphasage est déjà de 7 h et atteint 24 h sur les côtes du Danemark. Mais le fait le plus marquant de la Fig. 5 est que les deux sources de marées, celles venant du sud et celles venant du nord, conduisent à des phénomènes d'interférence, de sorte qu'il y a au moins trois endroits dans la Mer du Nord, où les marées semblent disparaître.

Si on excepte les phénomènes particuliers comme celui que nous venons de décrire, causés par une géométrie côtière exceptionnelle, on observe que les marées marines sont en moyenne en retard d'environ 90° par rapport à leurs causes, comme indiqué à la Fig. 6. Mais nous avons vu que ces retards peuvent être beaucoup plus grands. Ainsi, au fond du Golfe de Gascogne, vers Biarritz ou Bilbao, on peut observer une pleine Lune à son zénith, alors qu'on est à marée basse ! Les marées terrestres, par contre, font apparaître le globe de la Terre comme un corps presque parfaitement rigide. Ces marées solides ne sont retardées que de 3° environ par rapport à leurs causes, comme cela est indiqué à la Fig. 6.

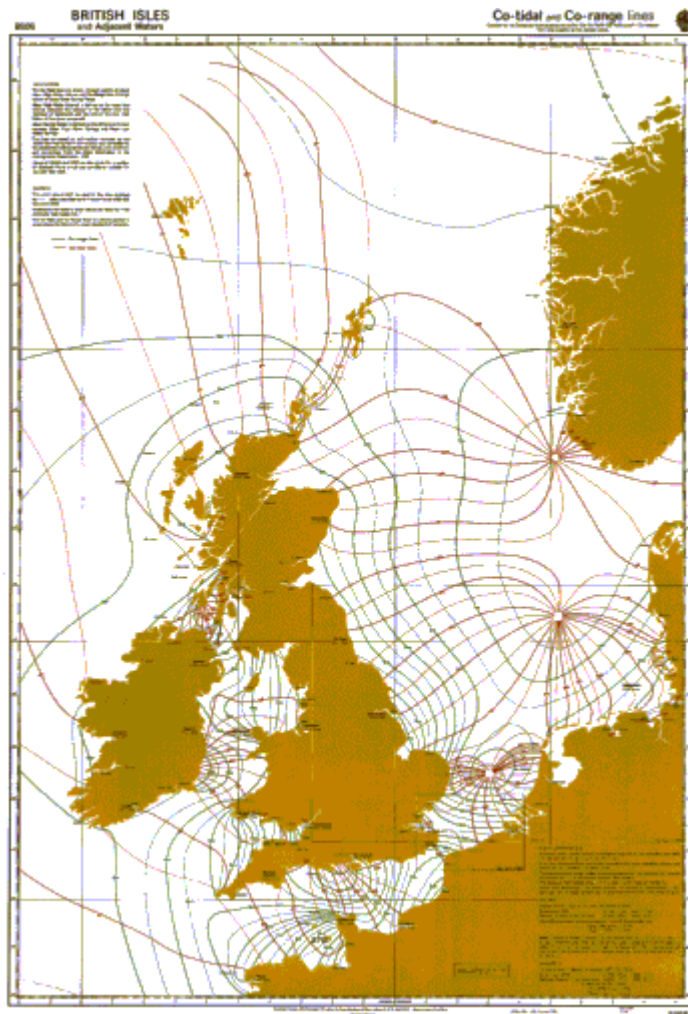


Fig. 5. Carte hydrographique de la Mer du Nord. Les courbes vertes, p. ex. celles qui semblent entourer les Iles Britanniques à l'est, donnent la hauteur moyenne des marées de printemps de 0.5 en 0.5 m . Les courbes rouges qui les croisent donnent les moments de la marée haute de demi-heures en demi-heure, par rapport au passage de la Lune au méridien de Greenwich. L'obstacle présenté par les Iles Britanniques à la progression des marées, engendre de très grands déphasages ainsi que des interférences qui peuvent annuler les marées en certains endroits; trois exemples d'annulation sont bien visibles dans la Mer du Nord. (cette carte a été établie par l'Institut Hydrographique Allemand avec les données des pays concernés)

2. La précession des équinoxes

Il est bien connu que l'axe de rotation propre de notre planète est incliné d'environ 23.5° par rapport au plan de son orbite, dénommé plan de l'écliptique. Cette inclinaison est la cause des variations saisonnières du climat, ce qu'illustre bien la Fig. 7. Comme nous l'avons vu, les forces centrifuges qui résultent de cette rotation déforment un peu notre globe. Revenons à la Fig. 1; mais plutôt que de considérer les forces F_{1a} et F_{2a} , nous portons maintenant notre attention sur les composantes F_{1r} et F_{2r} . On voit que ce couple de forces voudrait redresser l'axe de rotation du globe en direction d'une perpendiculaire à l'écliptique. Mais puisque la Terre tourne sur elle-même, elle se comporte comme une toupie et ne se laisse pas redresser. Au lieu de cela, elle se met à précesser. L'axe de rotation se déplace à la vitesse angulaire marquée du signe Ω_p sur la Fig. 1 et décrit ainsi un cône de 47° d'ouverture. Pour parcourir le cône entier il lui faut environ 25 730 ans. C'est le phénomène qu'on nomme *précession des équinoxes*. Si l'axe polaire de la Terre pointe aujourd'hui dans une direction à moins d'un degré de l'étoile polaire, il s'agit d'une pure coïncidence. Il y a quelque quatre mille ans cette direction visait la constellation du Dragon, comme le révèle d'ailleurs certaines tablettes des civilisations mésopotamiennes et est illustré par la Fig. 8.

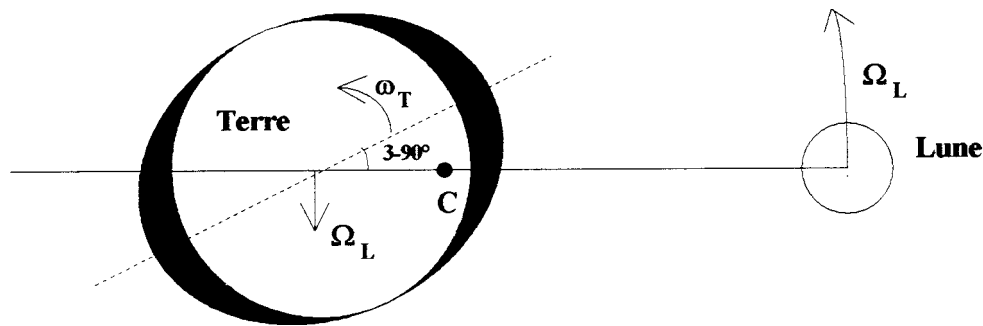


Fig. 6. Les processus dissipatifs font que les marées terrestres et océaniques sont en retard, respectivement, d'environ 3° et 90° par rapport aux forces qui les engendrent et tendent à ralentir la rotation propre de la Terre (l'angle du dessin est un compromis). Puisque la rotation de la Terre et la rotation orbitale de la Lune, vues ici depuis un point au-dessus du plan de l'écliptique, sont dans le même sens, les marées solides du globe se traduisent par une distribution de masses qui cherche à accélérer la vitesse orbitale de la Lune et à ralentir la vitesse de rotation de la Terre. Etant pratiquement à angle droit, on pourrait penser que les marées marines n'ont pas cet effet; mais la distribution des hautes eaux est un phénomène dynamique très compliqué et c'est tout de même dans les marées marines que se trouve le plus important mécanisme de dissipation de l'énergie cinétique de rotation de la Terre. Ainsi le phénomène des marées engendre un transfert de moment angulaire de la Terre à la Lune. Le même effet, mais en sens inverse, soit un ralentissement de la vitesse de rotation propre de la Lune, a déjà atteint sa phase ultime : depuis la Terre on observe toujours la même face de la Lune. Le Point marqué **C** est le centre de gravité du système Terre-Lune, point autour duquel les deux astres tournent de concert. Ce point se trouve encore à l'intérieur de la Terre, à quelques 74 % de son centre si on prend le rayon terrestre comme unité.

3. Les marées et l'histoire du système Terre-Lune

Le phénomène des marées, décrit à la **Sec. 1**, conduit à une perte d'énergie de rotation du système, essentiellement par la friction des eaux. Cela se traduit par un allongement de la longueur du jour, qui d'une année à l'autre se chiffre en moyenne à environ $15\mu\text{s}$, raison pour laquelle on exprime cela en disant que le ralentissement est de $15 \mu\text{s}/\text{j.an}$. Cette dissipation se produit surtout dans les régions de mers côtières, peu profondes. Dans les grands océans les courants de marées sont plutôt situés à la surface des mers; ils sont plus lents et dissipent très peu d'énergie. Mais lorsqu'ils sont bloqués par une côte ou s'ils arrivent dans une région peu profonde, la continuité des flux devient impossible ou doit se faire dans une section fortement réduite. Cela produit des courants beaucoup plus rapides et des marées plus fortes; il en résulte une grande augmentation de la dissipation.

Ce freinage de la rotation terrestre par la Lune peut aussi être compris de la façon suivante: selon l'esquisse de la Fig. 6, la rotation de la Terre a pour effet de déplacer vers l'avant de la rotation le grand-axe de l'ellipsoïde allongé par l'attraction gravitationnelle de la Lune, par rapport à la direction de l'axe Terre-Lune. Comme nous l'avons vu, ce déphasage vers l'avant est d'environ 3° pour les marées solides et voisin de 90° pour les marées océaniques (dans le dessin on a fait un compromis). La Lune exerce donc un couple tendant à freiner la rotation de la Terre (puisque ce couple est parallèle au moment cinétique il ne provoque pas de précession !). Mais toute action engendre une réaction et puisque la Lune tend à freiner la rotation de la Terre, la Terre à son tour cherche à accélérer la Lune. Il y a un transfert d'énergie et de moment cinétique, ou moment angulaire, qui se fait entre la Terre et la Lune. Ainsi dans ce processus il y a perte d'énergie de rotation du système des deux astres Terre et Lune. Par contre, les lois de la physique nous disent que s'il n'y a pas d'influence extérieure au système, le moment cinétique total des deux astres sera conservé. Puisque, comme nous l'avons vu, la Terre perd du moment cinétique de rotation, la Lune doit gagner du moment orbital, et cela signifie qu'elle doit s'éloigner de la Terre.

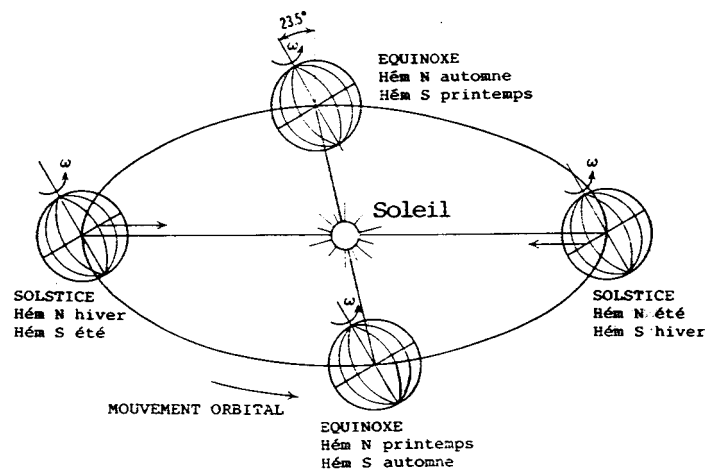


Fig. 7. L'orbite de la Terre autour du Soleil. L'inclinaison de l'axe de rotation propre de la Terre par rapport à la normale au plan de l'écliptique engendre l'alternance des saisons. L'ellipticité du globe est la cause de la précession des équinoxes. En considérant la Fig. 1 on voit que le couple de forces qui engendre cette précession produit des effets identiques aux deux solstices. Aux équinoxes ce couple de forces disparaît.

Ce qui se passe effectivement dans cette interaction Terre-Lune est une augmentation de l'ellipticité de l'orbite lunaire. Un raisonnement simplifié permet de comprendre cet effet : lorsque la Lune est proche de la Terre, c.-à-d. voisine de son périégée, l'interaction avec la Terre est forte; mais au périégée cette interaction ne peut pas modifier la distance qui sépare les deux astres, bien plutôt elle accélère la vitesse de la Lune, cela conduit à une forte augmentation de sa distance d'apogée. Quand la Lune est à son apogée l'interaction est plus faible, mais ici encore l'interaction ne peut pas modifier la séparation à l'apogée, mais seulement augmenter la vitesse, et cela fera augmenter un peu le périégée. On voit ainsi que la distance moyenne Terre-Lune va augmenter, mais que l'apogée augmentera plus fortement que le périégée. Ce mécanisme a donc pour effet d'accroître à la fois l'énergie, le moment cinétique orbital et l'excentricité de l'orbite lunaire. Pour la situation présente on peut calculer une augmentation annuelle de 3 cm environ de la distance moyenne entre la Terre et la Lune; cette valeur est bien confirmée par les mesures qu'on fait aujourd'hui au moyen d'impulsions de lasers sur les rétro-rélecteurs déposés sur la Lune par les astronautes américains d'Apollo [2].

Ayant porté notre attention sur un premier mécanisme qui augmente l'ellipticité de l'orbite lunaire, nous devons en signaler un deuxième qui la réduit. L'attraction gravitationnelle de la Terre sur son satellite y produit aussi une marée solide. Comme la Lune dirige toujours la même face vers la Terre, la déformation ellipsoïdale de la Lune voit son grand-axe coïncider avec la droite reliant le centre des deux astres. Mais si la direction de la déformation est fixe par rapport à un système de coordonnées lunaires, son ampleur varie lorsque la distance Terre-Lune varie. Ces variations des marées lunaires dissipent donc aussi de l'énergie et la question se pose de savoir d'où vient cette énergie ?

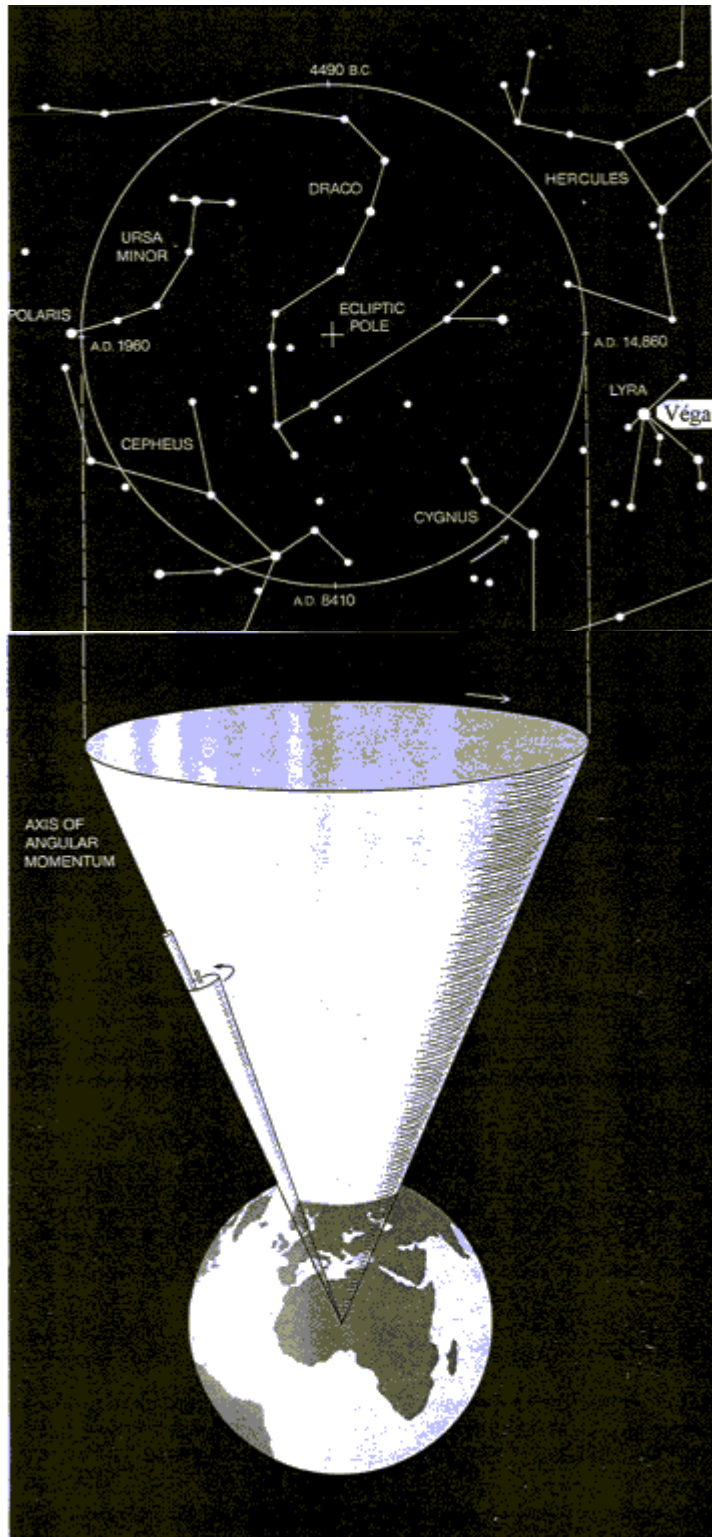


Fig. 8. Précession de l'axe de rotation de la Terre sur un cône de 47° d'ouverture. L'intersection de ce cône avec la voûte céleste est un cercle sur lequel un tour complet nécessite environ 25 730 ans. La position du point d'intersection se trouve maintenant au voisinage immédiat de l'étoile polaire, mais c'est une coïncidence purement fortuite. Comme on peut le voir sur cette représentation, voici 4 à 5 mille ans le point d'intersection se trouvait dans la constellation du Dragon.

Lorsqu'on dérive les lois de Képler, on constate que l'énergie totale d'un petit satellite en orbite autour d'un grand astre, soit la somme de ses énergies potentielle et cinétique, ne dépend que du demi grand-axe de l'orbite. Lorsque l'orbite est circulaire, les énergies potentielle et cinétique sont constantes. Lorsque l'orbite devient elliptique, il est clair qu'à l'apogée l'énergie potentielle a augmenté, l'énergie cinétique aura donc diminué. Au périégée c'est l'énergie cinétique qui est plus grande, l'énergie potentielle sera donc plus faible. On peut montrer que l'énergie dissipée par la Lune, suite aux déformations périodiques de sa forme,

est prise sur l'énergie cinétique associée à l'ellipticité de son orbite. Les déformations induites par la Terre sur la Lune ont donc pour effet de faire décroître son énergie orbitale. Cela tend aussi à réduire l'ellipticité de son orbite et la longueur de son demi grand-axe. La combinaison des deux effets que nous venons de considérer a pour effet que l'ellipticité de l'orbite lunaire est assez stable, alors que sa distance à la Terre continue d'augmenter. Dans un futur lointain, le second mécanisme pourrait cependant devenir dominant, lorsque les deux astres auront atteint le stade où les deux se font face par les mêmes hémisphères. Dans cette situation les marées marines d'origine lunaire auront pratiquement disparu. Seuls se produiront encore les petites déformations induites par les variations de la distance entre les deux corps, dont l'effet ultime est de rendre circulaires leurs orbites autour du centre de gravité commun.

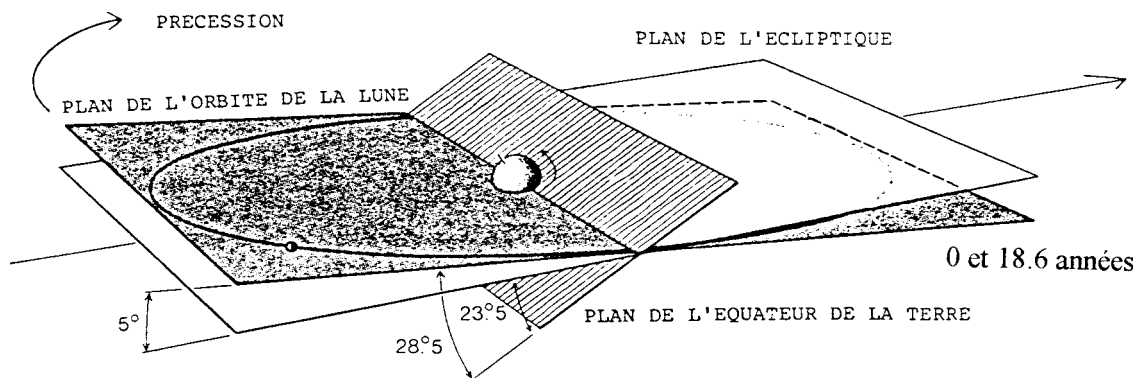


Fig. 9. Le plan de l'orbite de la Lune est incliné de 5° environ sur celui de l'écliptique. Le Soleil exerce donc un couple de forces sur la toupie lunaire, qui cherche à ramener l'orbite de la Lune dans le plan de l'écliptique. Mais suite à la rotation de ce système autour de son centre de gravité (voir la Fig. 6), ce couple ne peut que faire précesser la toupie lunaire à la période de 18.6 années et le plan orbital de la Lune conserve son inclinaison de 5° sur l'écliptique. Dans cette esquisse le plan de l'orbite lunaire est représenté aux temps $T = 0$ et $T = 18.6$ années. Ce plan tourne autour d'un axe perpendiculaire à l'écliptique et qui passe par le centre de la Terre

En résumé, les interactions entre la Terre et la Lune ont pour effet : 1° de ralentir la rotation propre de la Lune et de la Terre (pour la Lune cela a déjà conduit à la situation ultime, celle où période de rotation propre et période orbitale sont les mêmes), 2° de faire progressivement s'éloigner la Lune de la Terre et 3° de maintenir une excentricité modérée à l'orbite lunaire. Cela a pour $4^{\text{ième}}$ conséquence qu'à très long terme, et dans l'hypothèse peu plausible qu'aucun autre phénomène ne vienne perturber le système, la Terre et la Lune finiront tous deux par tourner sur eux-mêmes à la même vitesse qu'ils tournent l'un autour de l'autre. Ils se feront alors face avec les mêmes hémisphères et leurs orbites deviendront parfaitement circulaires ! Ce que nous venons de décrire avec l'exemple de la Terre et de la Lune, n'aura cependant pas le temps d'aboutir à la situation ultime envisagée, car le ralentissement de la rotation propre de notre planète est très lent et dans quelques $5 \cdot 10^9$ ans déjà le Soleil atteindra sa première phase de géante rouge, phase explosive au cours de laquelle il engloutira toutes les planètes mineures. Mais si, ignorant la catastrophe solaire, on pousse les calculs de l'interaction Terre-Lune jusqu'à la phase ultime, soit bien au-delà de 10^{11} années, on aboutit à une période de rotation généralisée d'environ 40 jours pour les deux astres et une distance Terre-Lune qui aura passé de 60 à 78 rayons terrestres [3].

Dans tout ce qui précède nous avons admis que le Soleil venait simplement ajouter ses propres marées à celles produites par la Lune, selon l'exemple de la Fig. 4. Mais le Soleil a aussi des effets sur la dynamique de l'ensemble du système de la Terre et de la Lune, effets que nous avons négligés. Cela est assez bien justifié jusqu'à l'état que plus haut nous avons

qualifié de "**situation ultime**". Mais si cet état devait effectivement être atteint, l'influence du Soleil deviendrait dominante. Des marées de très longue période (et donc peu déphasées) seraient alors induites sur la Terre, ralentissant encore sa rotation propre, et celles provoquées sur la Lune feraient finalement tomber cet astre sur notre planète par une très longue spirale [3]. Le système de Pluton et de son satellite Charon, considéré plus bas, est quant à lui si éloigné du Soleil qu'il échappe presque totalement à ces effets, cela d'autant plus que ces deux corps sont certainement entièrement solides.

Les interactions entre corps célestes, pour lesquelles nous avons pris l'exemple de la Terre et de la Lune, valent aussi pour les satellites des autres planètes. Dans la plupart des cas où l'on a pu déterminer la vitesse de rotation propre de ces satellites, on a effectivement observé que leur période de rotation propre est identique à leur période de révolution [4]. Ils présentent donc toujours le même hémisphère aux planètes autour desquelles ils orbitent. Cela est vrai en particulier pour les quatre satellites galiléens de Jupiter : Io, Europa, Ganymède et Callisto.

Mais le système solaire contient aussi un superbe exemple de cet effet poussé à son stade ultime, celui de deux astres qui se font continuellement face par les mêmes hémisphères et dont les orbites mutuelles sont devenues presque parfaitement circulaires. Il s'agit de Pluton et de son satellite Charon. Ces deux astres ont des dimensions assez petites et semblables (diamètres respectifs de 2390 et 1184 km) et ils sont très proches l'un de l'autre (19 600 km), soit un vingtième seulement de la distance Terre-Lune. Aujourd'hui ils tournent tous deux à la même vitesse angulaire, à la fois sur eux-mêmes et l'un autour de l'autre à la période sidérale de 6.38725 j et leur excentricité est si petite qu'elle n'a pas pu être déterminée, on sait seulement qu'elle est inférieure à 0.001 [4]; celle de l'orbite lunaire, en comparaison, est de 0.05490.

4. Quelques propriétés particulières des marées

Nous savons que l'attraction gravitationnelle entre deux masses ponctuelles obéit à la loi de Newton. Elle est inversement proportionnelle au carré de leur séparation R . Si on a des corps de symétrie sphérique on peut les considérer, au point de vue dynamique, comme si toute leur masse était concentrée en leurs centres. Pour les trois astres Soleil, Terre et Lune cela est vrai en première approximation et suffit pour ce qui suit.

L'interaction entre la Terre et la Lune (ou le Soleil) obéit à la loi de Newton et l'attraction est compensée par des forces centrifuges. Cela conduit aux orbites circulaires ou elliptiques qui nous sont familières. Mais la Terre tourne aussi sur elle-même et nous avons vu que cela lui donne la forme d'un ellipsoïde de rotation, dont le diamètre équatorial dépasse le diamètre polaire d'environ 43 km. On peut donc considérer la Terre comme une sphère entourée d'une ceinture épaisse de 21,5 km à l'équateur, ceinture qui devient plus mince lorsqu'on approche des pôles, où son épaisseur s'annule, comme esquissé à la Fig. 1. S'il est bien clair que les marées déforment un peu toutes les parties de la Terre, on peut, comme nous l'avons fait à la **Sec. 1**, décomposer notre planète en une partie centrale sphérique, dont le diamètre serait le diamètre polaire, entourée de la ceinture que nous venons de décrire. En première approximation nous avons attribué à la seule ceinture les déformations causées par les marées et ramené ainsi l'interaction entre la partie centrale sphérique de la Terre et la Lune à une simple interaction entre deux masses ponctuelles. Il en va autrement pour la ceinture. Par les Fig. 2 et 3 nous avons vu que l'attraction par la Lune des parties qui lui font face est

plus grande que pour la partie opposée, ce qui engendre la symétrie des marées par rapport au plan par le centre de la Terre et perpendiculaire à l'axe Terre-Lune.

Mais le point le plus important, illustré par la Fig. 1, est que les marées sont un effet de second ordre par rapport à la distance R entre la Terre et la Lune. Cet effet est donc proportionnel à $d/dR(1/R^2) = -2/R^3$. Une conséquence de ce résultat concerne les interactions considérées à la **Sec. 3**, que pour des raisons didactiques nous avons limité aux positions de périégée et d'apogée, alors qu'elles ont bien sûr lieu sur l'orbite entière. Il se trouve que ces interactions se comportent approximativement comme le carré des forces qui engendrent les marées, c.-à-d. qu'elles varient à peu près comme $1/R^6$. On comprend ainsi pourquoi ces interactions sont tellement plus fortes au périégée qu'à l'apogée de l'orbite de la Lune autour de la Terre. Mais cette dépendance très forte de la distance a aussi pour corollaire qu'entre deux astres plus éloignés, p. ex. entre le Soleil et les planètes, l'effet considéré est le plus souvent entièrement négligeable. Ainsi, seuls Mercure et Vénus ont pu être freinés un peu par le Soleil, et dans le cas de Vénus il ne fait aucun doute qu'il faut imaginer un mécanisme additionnel pour expliquer sa rotation propre rétrograde à la période de 243 jours. Quant aux orbites planétaires elles n'ont probablement pas été affectées par les marées qu'elles ont induites sur le Soleil.

En ce qui concerne le rapport des effets de marée et de précession des équinoxes engendrés par la Lune et le Soleil, la loi en $1/R^3$ a une conséquence amusante. Il est clair que ces effets sont proportionnels aux masses des astres, produit de leur densité et de leur volume, volume qui se comporte comme le cube du diamètre. Mais Soleil et Lune nous apparaissent comme deux disques qui ont pratiquement le même diamètre, raison pour laquelle les éclipses totales du Soleil sont toujours de très courte durée (quelquefois, lorsque la Lune est un peu plus éloignée et le Soleil un peu plus proche, les éclipses peuvent n'être qu'annulaires). Puisque le rapport entre diamètre et distance donne l'angle sous lequel un astre nous apparaît, il en découle que cet angle est pratiquement le même pour le Soleil et la Lune. La loi en $1/R^3$ déduite plus haut a donc pour conséquence que marées et précession des équinoxes sont simplement dans le rapport des densités de la Lune et du Soleil, soit 3,34 et 1,41 kg/dm³, et les effets causés par la Lune sont donc quelque 2.37 fois plus importants que ceux qu'on doit attribuer au Soleil.

5. La précession de l'orbite lunaire

La dynamique du système Terre-Lune est encore compliquée par la présence du Soleil. Le plan orbital de la Lune ne se trouve pas exactement dans l'écliptique, mais est incliné d'environ 5° par rapport à ce plan. Le Soleil agit sur la toupie formée de l'ensemble Terre-Lune par un couple de forces qui cherche à la redresser, c.-à-d. à ramener l'orbite lunaire dans le plan de l'écliptique. Ici encore ce couple ne réussit pas à redresser la toupie, il ne peut que lui impartir un mouvement de précession. Ainsi le plan orbital de la Lune, tout en maintenant son inclinaison de 5° par rapport au plan de l'écliptique, voit son inclinaison relative au plan équatorial de la Terre, osciller entre 18.5° et 28.5° . La période de cette oscillation est de 18.6 ans, comme indiqué à la Fig. 9. On a pu vérifier, en étudiant leurs observatoires construits au moyen de gros blocs de pierres, que les Aztèques du Mexique avaient déjà constaté ces basculements de l'orbite lunaire.

6. Conclusions

La principale conclusion à laquelle nous aboutissons, est que pour les astres célestes les orbites parfaitement circulaires ne sont pas un cas particulier très improbable des orbites elliptiques. En réalité, les orbites circulaires représentent la situation à laquelle aboutissent infailliblement deux astres isolés d'autres influences, s'ils sont en interaction gravitationnelle pendant un temps suffisamment long. L'exemple le plus probant que l'on peut citer comme modèle est la planète Pluton et son unique satellite Charon. Même s'il est pratiquement certain que Pluton ne s'est pas formé en même temps que notre Soleil et son concert de planètes, le fait que la paire Pluton-Charon ait pu atteindre le stade des orbites circulaires mutuelles prouve que Pluton ne peut pas avoir été capturé très récemment par le système solaire, mais que ce couple en fait certainement partie depuis une centaine de millions d'années au moins, sinon davantage.

Remerciements

L'auteur tient à remercier le Dr Jeremy Tatum de Victoria, Colombie Britannique, Canada, pour sa lecture attentive du manuscrit et d'utiles suggestions.

Références

- [1] Euler, Leonhard : *Lettre à une princesse d'Allemagne LXII* (la princesse d'Anhalt-Dessau), celle datée du **26 septembre 1760**. Voir p. ex. "Leonhard Euler - Opera Omnia", Birkhäuser Verlag, Basel, **1982**, pp. 135-137, ou les Presses Polytechniques Universitaires Romandes, **2003**.
- [2] Dickey J. O. et al. : *Lunar Laser Ranging : A Continuing Legacy of the Apollo Program*, *Science* **265**, pp. 482-490 (22 July **1994**).
- [3] Stacey, Frank D. : *Physics of the Earth*, 3rd Edition **1992** (Brookfield Press, Brisbane, Australia), Ch. 3 (voir en particulier la Fig. 3.12).
- [4] *The Astronomical Almanac* for the year **2003**, Washington and London.