Les marées et la Lune

P. ROCHER, © INSTITUT DE MÉCANIQUE CÉLESTE ET DE CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES – OBSERVATOIRE DE PARIS

Le passage du Gois entre Noirmoutier et Beauvoir-sur-Mer

Les marées océaniques sont vraisemblablement le phénomène naturel observable le plus spectaculaire lié aux effets des forces gravitationnelles de la Lune et du Soleil. Si la marée fut bien décrite dès l'Antiquité, notamment par Pline l'Ancien dans son *Histoire naturelle*, il faudra attendre Sir Isaac Newton (1643 – 1727) et la publication de ses *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* en juillet 1687 pour avoir les prémices d'une explication physique exacte.

Le phénomène est complexe à expliquer, il fait appel à des notions de mécanique et demande quelques connaissances mathématiques. Il ne faut pas oublier que les mathématiques sont le langage des sciences. La force de marée tout comme la gravitation universelle ne peut se décrire dans un autre langage.

Dans un premier temps nous allons décrire la marée, comme l'a fait Pline l'Ancien. Si l'on se place sur la côte française de l'océan Atlantique et que l'on mesure pendant plusieurs années la hauteur de la marée, on observe les phénomènes suivants :

- Il y a deux marées par jour séparées en moyenne par 12h 25m 14s, on dit que la marée est semi-diurne.
- Pour un lieu donné, les hautes mers suivent les passages de la Lune au méridien supérieur et au méridien inférieur d'un intervalle de temps presque constant ; cette période porte le nom *d'établissement moyen du port* (3h 50min à Brest).
- Les deux marées semi-diurnes sont d'amplitudes légèrement différentes. Lorsque la déclinaison de la Lune est positive l'amplitude de la marée qui suit le passage supérieur est plus forte que l'amplitude de la marée qui suit le passage inférieur,

inversement lorsque la déclinaison de la Lune est négative l'amplitude de la marée qui suit le passage inférieur de la Lune est plus forte que l'amplitude de la marée qui suit le passage supérieur. Les deux amplitudes sont voisines lorsque la déclinaison de la Lune est nulle (astre dans l'équateur).

- Durant une lunaison, l'amplitude de la marée n'est pas constante : on distingue des marées de vives-eaux au voisinage de la pleine Lune et de la nouvelle Lune et des marées de morte-eau au voisinage du premier et du dernier quartier.
- La plus forte marée de vive-eau et la plus faible marée de morte-eau ne coïncident pas exactement avec les phases lunaires, elles sont décalées par rapport aux phases d'environ trois marées, ce phénomène porte le nom *d'âge de la marée*.
- On observe des marées de très forte amplitude au voisinage des équinoxes, mais la marée de vive-eau la plus proche de l'équinoxe n'est pas toujours la plus forte.

L'analyse de ces observations permet d'émettre les suppositions suivantes :

La corrélation entre les passages de la Lune aux méridiens et les instants des hautes mers permet d'attribuer le phénomène des marées à la Lune. Le fait que la marée est sensible aux phases lunaires implique aussi une interaction due au Soleil, il y a donc une composante lunaire et une composante solaire, ces deux composantes s'ajoutent lorsque les corps sont en conjonction et en opposition et ne s'ajoutent pas lorsque les deux corps sont en quadrature. Le fait que les hautes mers suivent les passages de la Lune aux méridiens plutôt que ceux du Soleil implique que la force de marée lunaire doit être supérieure à la force de marée solaire. La présence de fortes marées aux équinoxes implique que la marée solaire est plus forte lorsque le Soleil est dans le plan de l'équateur terrestre. Il doit en être de même pour la composante lunaire, elle doit être plus forte lorsque la Lune est dans le plan de l'équateur terrestre. Si l'on suppose que la force de marée est de nature gravitationnelle, on peut s'attendre à ce qu'elle soit proportionnelle à la masse des corps perturbateurs et qu'elle varie avec la distance de ces corps.

Jusque ici nous n'avons fait qu'une description de la marée luni-solaire semi-diurne qui est observable sur nos côtes. Pour expliquer cette force de marée, nous allons devoir faire appel à des notions de mécanique newtonienne.

Notion de force

En mécanique, une force, une accélération et une vitesse sont représentées par des vecteurs. Un vecteur est un segment de droite orienté. Pour une force, l'origine du vecteur correspond au point d'application de la force, la longueur du vecteur est proportionnelle à l'intensité de la force et la direction du vecteur donne la direction de la force. Par exemple l'accélération de la pesanteur sur un objet A (figure 1) est représentée par un vecteur $\vec{g}$ vertical dirigé vers le bas et donc la longueur est proportionnelle à l'intensité de la pesanteur.

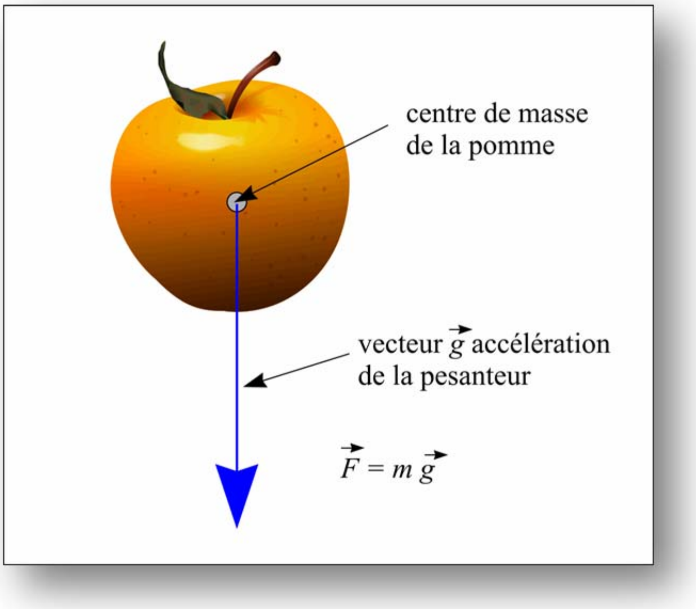


Figure 1 : accélération de la pesanteur

Les vecteurs peuvent s'additionner (ou se soustraire). L'addition de deux vecteurs est un vecteur. Le vecteur résultat est construit à partir de la diagonale du parallélogramme ayant pour côtés les deux vecteurs. Inversement un vecteur, donc une force, peut se décomposer en plusieurs vecteurs selon des directions différentes. Ainsi sur la figure 2 la force $\vec{F}$ est la somme des forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$, ou la force $\vec{F}$ peut être décomposée comme la somme de deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$.

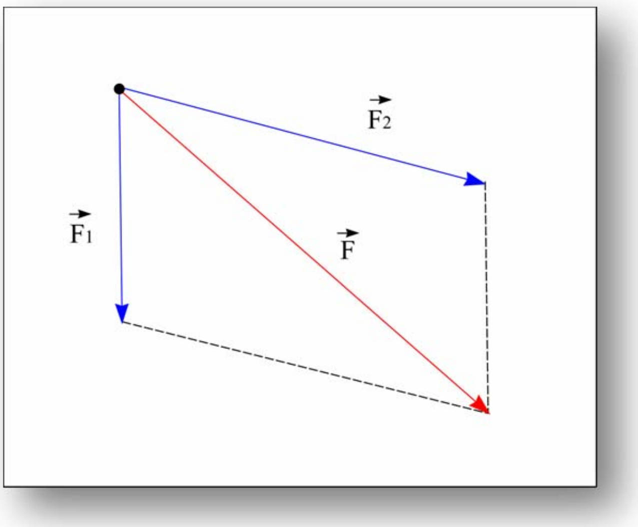


Figure 2 : le parallélogramme des forces.

Notion de repère inertiel et de forces d'inertie en mécanique newtonienne

On appelle repère inertiel un repère qui est animé d'un mouvement de translation uniforme[1], c'est-à-dire animé d'une vitesse constante. Dans le système solaire, si l'on néglige l'attraction des étoiles proches, on peut considérer que le barycentre du système solaire est un repère inertiel[2]. Un repère qui est soumis à une accélération non nulle n'est pas inertiel. Donc tous les repères centrés sur les centres des corps du système solaire ne sont pas inertiels (y compris celui centré sur le Soleil). Si l'on décrit le mouvement d'un corps dans un repère non inertiel on doit faire intervenir des accélérations d'entrainements $\left(\overrightarrow{\gamma_e}\right)$ et, si le repère est en rotation une accélération complémentaire $\left(\overrightarrow{\gamma_c}\right)$. L'accélération dans le repère inertiel porte le nom d'accélération absolue $\left(\overrightarrow{\gamma_a}\right)$, l'accélération dans le repère non inertiel porte le nom d'accélération relative $\left(\overrightarrow{\gamma_r}\right)$. L'accélération relative est égale à l'accélération absolue moins les accélérations d'entrainement et l'accélération complémentaire. Le produit d'une masse par une accélération est une force. Les physiciens ont nommé forces d'inerties d'entrainement les forces liées aux accélérations d'entrainement et force d'inertie complémentaire la force liée à l'accélération complémentaire.

Comme la marée est un phénomène terrestre, nous devons nous placer dans un repère lié au centre de masse de la Terre et tournant avec la vitesse de rotation sidérale de la Terre (ω = 7,2921150 10^{-5} rad/s). Une particule de masse *m* placée en un point M à la surface de la Terre sera soumise à des forces d'inertie d'entrainement dues au mouvement du centre de masse de la Terre et à la rotation sidérale du repère et à une force d'inertie complémentaire si la vitesse de la particule n'est pas nulle.

L'accélération relative de la particule s'écrit sous la forme suivante :

$$\overrightarrow{\gamma_r} = \overrightarrow{\gamma_a} - \overrightarrow{\gamma_{e1}} - \overrightarrow{\gamma_{e2}} - \overrightarrow{\gamma_c}$$

Il y a deux accélérations d'entrainement, une due à la translation du centre de masse de la Terre et l'autre due à la rotation sidérale de la Terre sur elle-même. Si l'on multiplie ces accélérations par la masse de la particule on obtient les relations suivantes :

$$\begin{aligned} m\overrightarrow{\gamma_r} &= m\overrightarrow{\gamma_a} - m\overrightarrow{\gamma_{e1}} - m\overrightarrow{\gamma_{e2}} - m\overrightarrow{\gamma_c} \\ m\overrightarrow{\gamma_r} &= m\overrightarrow{\gamma_a} + \overrightarrow{F_{e1}} + \overrightarrow{F_{e2}} + \overrightarrow{F_c} \end{aligned} \qquad (1)$$

Ces relations font intervenir trois forces, la première est la force d'inertie d'entrainement due au mouvement de translation du centre de masse de la Terre ; la seconde, liée à la rotation de la Terre, est une force d'inertie « axifuge ». La force d'inertie complémentaire liée à la rotation de la Terre et à la vitesse de la particule porte le nom de force de Coriolis.

[1] En France, on utilise parfois le terme de repère galiléen.
[2] En France, ce repère est parfois appelé repère copernicien.

Sans entrer dans les détails des calculs de ces forces, nous allons examiner chacune de ces trois forces :

La force de Coriolis est une force qui décale vers l'est les trajectoires des objets en mouvement. C'est cette force qui fait tourner le plan d'oscillation du pendule de Foucault, c'est une preuve expérimentale de la rotation terrestre. Cette force est nulle si la particule n'est pas en mouvement.

La force d'inertie axifuge est une force perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre, l'accélération axifuge est proportionnelle au carré de la vitesse angulaire et à la distance à l'axe de rotation. Elle se décompose en deux composantes, une composante verticale, normale à la surface, qui s'oppose à l'attraction terrestre et une composante horizontale qui est la cause de l'aplatissement terrestre. La figure moyenne d'équilibre de la Terre sous l'action de la force d'inertie axifuge est un ellipsoïde de révolution. En fait, suite à la répartition des masses à l'intérieur et à la surface de la Terre, la figure vraie est le géoïde.

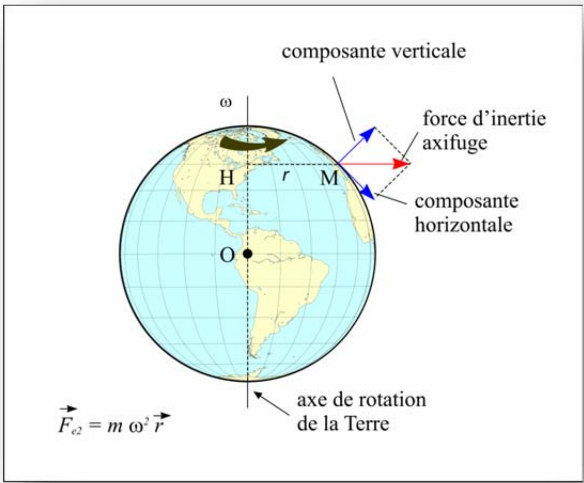


Figure 3 : la force d'inertie axifuge

La force d'inertie d'entrainement est liée à la translation du centre de gravité de la Terre, c'est la somme des forces d'inertie d'entrainement dues à chaque corps perturbateur (Soleil, planètes et Lune). Pour chaque corps perturbateur, l'intensité de cette force est proportionnelle à la masse M du corps perturbateur et inversement proportionnelle au carré de la distance Δ entre le centre de masse de la Terre et le centre de masse du corps perturbateur. La constante de proportionnalité est la constante de la gravitation k. Cette force est parallèle à la direction de la droite joignant le centre de la Terre et le centre du corps perturbateur, sa direction est à l'opposée de la force d'attraction due au corps perturbateur. Par exemple la force d'inertie d'entrainement due à la Lune sur une particule de masse m, quelque soit sa position, a pour intensité : $k \cdot m \cdot M_L / \Delta^2$.

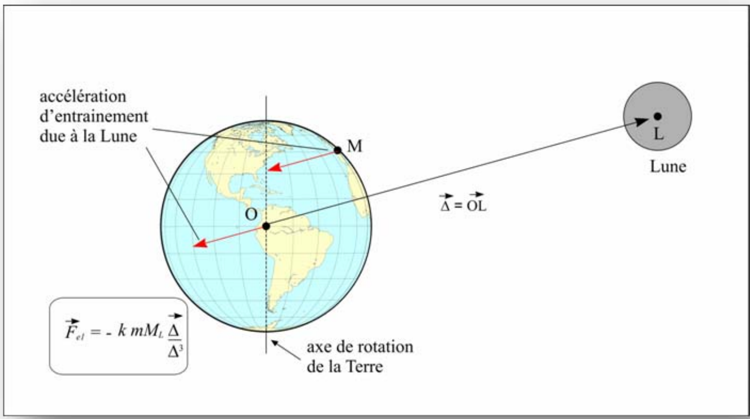


Figure 4 : la force d'inertie d'entrainement.

Il convient maintenant d'appliquer le principe fondamental de la mécanique : le produit de la masse *m* de la particule par l'accélération absolue est égal à la somme des forces extérieures appliquées à la masse *m*. Pour la particule *M*, ces forces sont au nombre de quatre :

$\vec{P} =$ les forces de pression hydrostatique,

$\vec{F_R} =$ les forces de frottement,

$\vec{G} =$ la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre,

$\overrightarrow{J_A(\mathrm{M})} =$ les forces d'attraction gravitationnelles exercées sur la masse *m* par chaque corps *A* du système solaire.

$$m\overrightarrow{\gamma_a} = \vec{P} + \vec{F_r} + \vec{G} + \sum_A \overrightarrow{J_A(M)} \qquad (2)$$

Si la particule est fixe dans le référentiel terrestre, sa vitesse relative et son accélération relative sont nulles. De même, la force de Coriolis et les forces de frottement sont nulles. Enfin, dans le cas d'un équilibre hydrostatique, les forces de pression hydrostatique équilibrent la pesanteur. On a donc $\vec{P} = -m\vec{g}$.

Si l'on remplace l'accélération absolue de l'équation (1) par sa valeur obtenue dans l'équation (2). On obtient l'équation suivante :

$$m\vec{g} = \vec{G} + \overrightarrow{F_{e2}(M)} + \left(\overrightarrow{J_A(M)} + \overrightarrow{F_{e1}(M)}\right)$$

La force de pesanteur est donc la somme de trois forces, la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre, la force d'inertie d'entrainement axifuge et une troisième force qui est la somme de la force d'attraction gravitationnelle exercée par chaque corps perturbateur et de la force d'inertie d'entrainement due à la translation du centre du repère lié à la Terre. C'est cette troisième force que l'on appelle force de marée. Si l'on décompose la force d'inertie d'entrainement sous la forme de forces d'inertie dues à chaque corps du système solaire, on peut considérer la force générale de marée comme la somme des forces de marées dues à chaque corps du système solaire. Les plus fortes sont celles dues à la Lune et au Soleil.

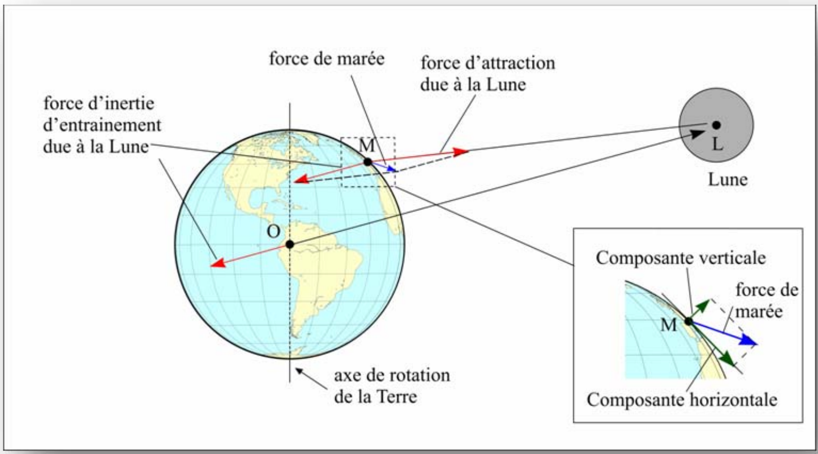


Figure 5 : la force de marée.

Si l'on s'intéresse à un corps particulier, par exemple la Lune. Alors la force d'attraction due à la Lune est proportionnelle à la masse de la Lune et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre la particule *M* et le centre *L* de la Lune. Alors la force de marée est **la somme de cette force d'attraction due à la Lune et de la force d'inertie d'entrainement due à la Lune**. Ces deux forces n'ont pas la même direction donc la force résultante, **la force de marée n'est pas dirigée vers la Lune** (figure 5), sauf pour le lieu ayant la Lune au zénith.

De nouveau cette force de marée peut être décomposée en deux composantes, une composante verticale et une composante horizontale (zoom de la figure 5). La composante horizontale est la force génératrice de la marée et c'est le mouvement horizontal de l'eau, à la recherche continuelle d'une position d'équilibre qui est à l'origine des variations du niveau des océans et qui constitue la marée. Dans le cas d'un équilibre statique, la surface d'équilibre des océans à la forme d'un ovoïde et présente deux bourrelets ayant pour direction la direction centre de la Terre-centre de la Lune (figure 6).

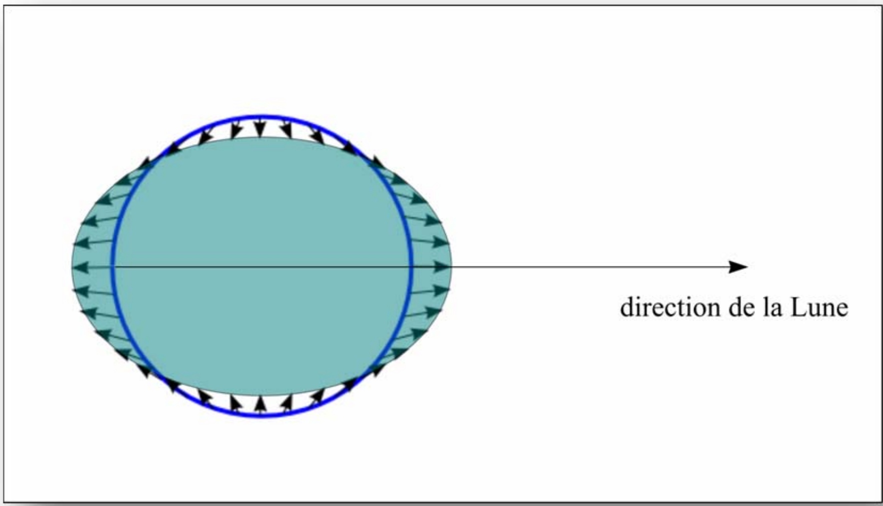


Figure 6 : Figure d'équilibre de la marée statique due à la Lune (les proportions ne sont pas respectées)

La nature de la force de marée

Pour un astre perturbateur donné (Lune ou Soleil), on peut montrer que l'intensité de cette force est proportionnelle à la masse du corps perturbateur et inversement proportionnelle au cube de sa distance et qu'elle dépend aussi de la hauteur de l'astre sur l'horizon, donc de sa déclinaison et de son angle horaire. Cette force n'est jamais nulle, elle présente des maximums lorsque l'astre se trouve dans le méridien du lieu et elle est minimale lorsque l'astre est à l'horizon (dans la mesure où l'astre se lève et se couche pour le lieu considéré). C'est une force extrêmement faible comparée avec la force de pesanteur terrestre. Ainsi les accélérations moyennes de marée dues respectivement à la Lune et au Soleil sont de $5{,}62\ 10^{-8}$ g et de $2{,}58\ 10^{-8}$ g (g étant l'accélération moyenne de la pesanteur g = 9,81m/s^2 = 981 Gal[3]). La force de marée de la Lune est donc d'environ 2,18 fois plus forte que la force de marée du Soleil. Ce qui explique que la marée océanique suive le mouvement de la Lune. Vu sa très faible intensité, la force de marée est négligeable dans la plupart des applications terrestres à l'exception des marées océaniques et des expériences nécessitant une très grande précision (géodésie, accélérateurs de particules).

On peut également démontrer que cette force dérive d'un potentiel et que l'expression donnant la variation de hauteur de la marée se décompose, en première approximation, en trois termes.

- Un terme semi-diurne qui dépend du double de l'angle horaire de l'astre, il présente deux extrémums par jour (aux passages aux méridiens), il est responsable de la marée semi-diurne.
- Un terme diurne qui dépend de l'angle horaire de l'astre, il présente un extrémum par jour (au passage au méridien supérieur), il est responsable de la marée diurne.

[3] Le gal (symbole Gal), dénommé ainsi en l'honneur de Galilée, vaut 1 cm/s^2

- Un terme mixte qui ne dépend pas de l'angle horaire de l'astre, mais qui dépend du double de la déclinaison de l'astre, sa période est donc la demi-révolution sidérale de la Lune pour la marée lunaire et la demi-année sidérale pour la marée solaire.

L'amplitude de la marée est la somme de ces trois termes. L'observation des marées montre que le terme semi-diurne est souvent prépondérant, notamment sur les côtes françaises et sur la côte est de l'océan Atlantique. Mais il n'en est pas toujours ainsi. On distingue à la surface de notre planète quatre types de marées.

1. La marée semi-diurne : les termes diurnes sont négligeables devant les termes semi-diurnes. Il y a donc deux marées par jour, d'importance presque égale.
2. La marée semi-diurne à inégalité diurne : les termes diurnes ne sont plus négligeables devant les termes semi-diurnes. On a encore deux pleines mers et deux basses mers par jour, mais les hauteurs de ces marées peuvent être très différentes (en basse mer ou en pleine mer) : Cap St Jacques, océan Indien et certaines parties du Pacifique.
3. La marée mixte : les termes diurnes prédominent, mais les termes semi-diurnes apparaissent en fonction de la valeur de la déclinaison de la Lune. On a ainsi deux marées par jour lorsque la Lune est proche de l'équateur (déclinaison = 0) et une seule marée par jour lorsque la déclinaison de la Lune est proche de son maximum (Indonésie, Viêtnam, Antilles, côtes de Sibérie et Alaska).
4. Les marées diurnes : les termes semi-diurnes sont négligeables devant les termes diurnes, on n'a alors qu'une marée par jour (océan Pacifique et côtes de Sibérie orientale, golfe du Tonkin). Les amplitudes des marées sont maximales lorsque la déclinaison de la Lune est extrême (dans les tropiques) d'où leur nom de « marées tropiques », et elles sont minimales lorsque la Lune est dans l'équateur.

Comme la force de marée est fonction des distances des astres perturbateurs, de leurs déclinaisons et des phases lunaires, on va retrouver dans les variations des forces de marée des cycles qui sont des combinaisons des révolutions anomalistiques (retour au périgée pour la Lune et retour au périhélie pour le Soleil), des révolutions draconitiques par les nœuds équatoriaux (passage aux nœuds équatoriaux de l'orbite lunaire, passage aux équinoxes pour le Soleil apparent) et de la révolution synodique (retour de la même phase lunaire).

Passage de la marée statique à la marée dynamique

La marée d'équilibre ainsi décrite constitue la marée statique, elle est purement théorique. Elle n'explique pas les décalages horaires par rapport aux passages de la Lune aux méridiens, ni le décalage des plus fortes marées de vives-eaux et des plus faibles marées de morte-eau par rapport aux phases lunaires. Pour expliquer ces décalages, on doit utiliser une formulation beaucoup plus complexe tenant compte de la mécanique des fluides pour modéliser les déplacements des particules d'eau. La marée est également influencée par la structure des bassins océaniques et des paramètres environnementaux locaux (pression atmosphérique, température de l'eau, salinité, courants marins, hauteur des fonds marins, etc.).

La première théorie permettant de modéliser la marée en un lieu donné fut celle élaborée par Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827). En 1775 il publie dans « *La mécanique céleste* » le développement de la force de marée statique en fonction de l'angle horaire, de la déclinaison et de la distance aux astres. Il montre que la marée réelle est proportionnelle à la marée statique avec des décalages horaires. Les coefficients de proportionnalité et les déphasages pour un lieu donné peuvent être déduits de l'observation de la marée en ce lieu. Les formules permettant ce calcul sont basées sur l'hypothèse de linéarité reposant sur deux principes fondamentaux : le principe des oscillations forcées et le principe de superposition des petits mouvements. En France, le premier annuaire des marées sera publié en 1839 par l'ingénieur hydrographe Rémi Chazallon[4] (1802 – 1872) grâce aux observations de la marée effectuées à Brest. On doit également à Laplace l'introduction du système des coefficients de marée qui permet de donner simplement la hauteur de la marée. Ce système toujours en usage de nos jours est spécifique à la France.

En 1869, Daniel Thomson (1824 - 1907) introduit la méthode d'analyse harmonique à partir de la décomposition du potentiel de la force de marée. Il invente en 1876 une machine mécanique, le *Tide Preditor*, pour calculer et prévoir la marée. En 1921, A.T. Doodson (1890 – 1968), en utilisant la théorie de la Lune de E.W. Brown, calcule le premier développement véritablement harmonique du potentiel générateur de marée. Il détermine environ 400 composantes du potentiel et utilise cinq angles fondamentaux ainsi que le temps lunaire moyen. La nomenclature des différents harmoniques utilisés par Doodson, ainsi que son formalisme sont encore en usage de nos jours.

Avec l'apparition des ordinateurs de nouvelles méthodes numériques vont voir le jour. En 1971 avec des méthodes d'analyse numérique complètement différentes (FFT, *Fast Fourier Transform*, transformée de Fourier rapide) et en utilisant de nouveaux paramètres, Cartwrigth et Tayler calculent un nouveau développement du potentiel générateur qui confirme les résultats obtenus cinquante ans auparavant par Doodson.

En 1994 – 1995, Hartmann et Wenzel calculent un développement contenant 12935 ondes, dont 1483 ondes directement dues aux effets des planètes. Ils prennent en compte les potentiels générateurs astronomiques de la Lune, du Soleil et des planètes Vénus, Jupiter, Mars, Mercure et Saturne. Une telle précision est inutile pour le calcul de la marée océanique, mais devient nécessaire pour modéliser le champ de pesanteur. En effet, de nos jours, les gravimètres permettent des mesures de la pesanteur tellement précises (1 µGal) qu'il peut être nécessaire de connaître l'accélération de marée avec une très grande précision.

Il faut bien comprendre que si les équations décrivant la marée sont les mêmes pour tous les lieux à la surface de la Terre, la résolution de ces équations se fait pour un lieu donné à l'aide des observations de la marée en ce lieu. En France, la hauteur de l'eau est donnée par rapport au zéro hydrographique c'est-à-dire le niveau de la plus basse des basses mers astronomiques, qui est également le niveau zéro de la cartographie marine française depuis 1838. Ce zéro est mis en usage par Charles de Beautemps-Beaupré (1766 – 1854), le père de

[4] Rémi Chazallon a introduit de nouveaux harmoniques dans le développement du potentiel de la force de marée, notamment l'onde quart-diurne.

l'hydrographie française. En France les calculs de marées et l'établissement des cartes marines sont effectués et publiés par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM).

L'étude des équations décrivant la marée a également permis de prédire la propagation des ondes de marées dans les océans et l'existence de points amphidromiques (points où l'amplitude de la marée est nulle) d'où partent des lignes cotidales correspondant aux lignes de crêtes de l'onde de marée, c'est-à-dire les lieux où la pleine mer a lieu à la même heure par rapport à l'heure du passage de la Lune au méridien de Greenwich.

La marée à l'échelle globale

Si la prédiction des horaires et des hauteurs de la marée sont indispensables à la sécurité de navigation côtière, ces informations ont un caractère purement local. Depuis les années 1970, l'altimétrie satellitaire (satellites GEOS, TOPEX-POSEIDON, JASON) permet de mesurer avec une précision de plus en plus grande la hauteur des océans. Ces hauteurs sont calculées à partir des distances satellite-surface de l'océan obtenues par méthode radar et la connaissance de la position du satellite dans un repère de référence géocentrique, ces positions de très grande précision (quelques centimètres) sont obtenues par des méthodes de positionnement de plus en plus performantes (GPS, télémétrie laser, système DORIS).

Cela a permis de modéliser la hauteur des océans à l'échelle mondiale. Dans un premier temps, on s'est contenté de modéliser la hauteur des océans en pleine mer. Plus récemment, en combinant les observations satellitaires et les observations des marégraphes, on a été capable de modéliser et de prévoir la hauteur des océans à l'échelle globale, notamment proche des côtes. C'est le cas du modèle *Mercator Océan* (http://www.mercator-ocean.fr/) qui permet la description et la prévision de l'océan jusqu'à 14 jours (température, salinité, courant et hauteur de l'océan).

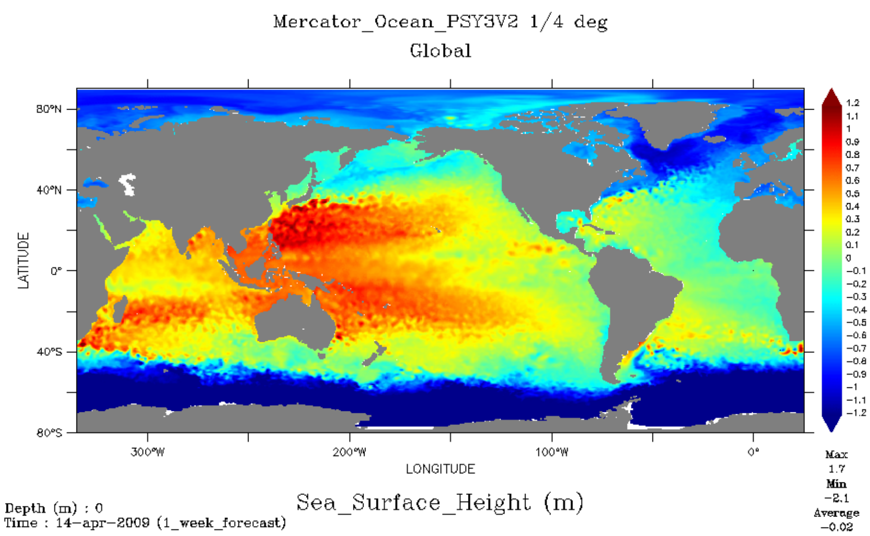


Figure 7 : Exemple de prédiction à 14 jours du niveau des océans © *Mercator Océan*.

La marée terrestre

Les forces de marée agissent également sur la croûte terrestre. L'amplitude de la marée terrestre est de l'ordre d'environ 30 à 40 cm. Le décalage entre la marée terrestre et le passage au méridien de la Lune est d'environ 30 secondes. La marée luni-solaire modifie la répartition des masses à la surface de la Terre, elle modifie donc les forces perturbatrices dues à la planète Terre. Ces forces perturbatrices entrent, à leur tour, dans le calcul de la théorie de la Lune.

La marée sur la Lune

Les forces de marée sont universelles. Sur la Lune, il y a donc des forces de marée dues à la Terre et au Soleil. Sur la Lune, la force de marée due à la Terre est responsable du synchronisme entre la révolution sidérale de la Lune autour de la Terre et de la rotation sidérale de la Lune sur elle-même ; ainsi la Lune montre toujours la même face à la Terre.

Petite bibliographie

Livres faciles à lire :

La marée, Les guides du SHOM, édition SHOM, 1997.

Une histoire des marées, André Gillet, édition Belin, 1998.

Tout savoir sur les marées, Odile Guérin, éditions Ouest-France, 2004.

Livres plus complexes :

Encyclopédie scientifique de l'Univers " la terre, les eaux, l'atmosphère " du Bureau des longitudes, édition Gauthier – Villars, 1986.

Modélisation des marées océaniques à l'échelle globale, Thèse de Fabien Lefèvre, 2000, Université Toulouse III (http://fabien.lefevre.free.fr/These_HTML/docframe.htm).

Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale, thèse de Guy Wöppelmann, 1997 : (http://www.sonel.org/~guy/THES/sommaire.html).

La Marée, La marée océanique côtière, Bernard Simon, éditeur Institut océanographique, 2007.

Sites internet :

SHOM : http://www.shom.fr/

Mercator Océan : http://www.mercator-ocean.fr/html/mercator/index_fr.html

LEGOS (Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales) : http://www.legos.obs-mip.fr/

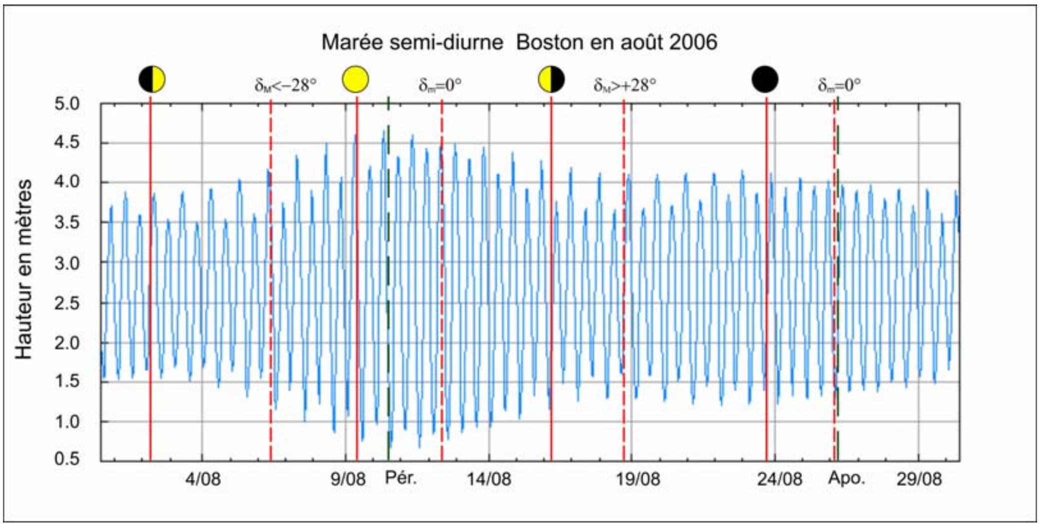
AVISO : Altimétrie, le relief des océans vu de l'espace http://www.jason.oceanobs.com/html/mod_actu/public/welcome_fr.php3

Observatoire de la Côte d'Azur (Équipe Géodésie et Mécanique Céleste) :
http://wwwrc.obs-azur.fr/cerga/GMC/GMCpacceuil.html

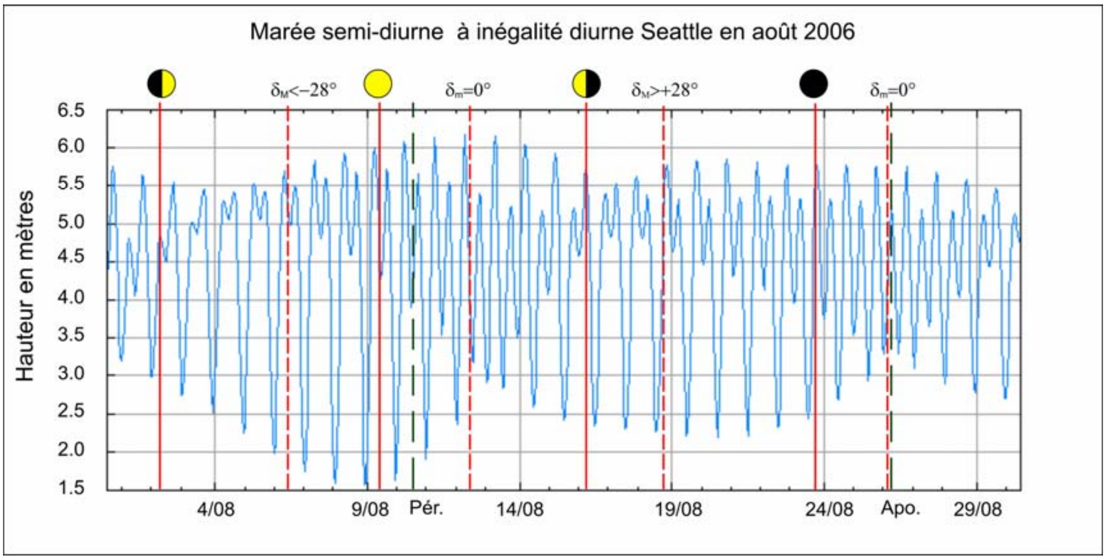
NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) : http://www.noaa.gov/
Center for Operational Oceanographic Products and Services :
http://tidesandcurrents.noaa.gov/

Encadré sur les types de marées

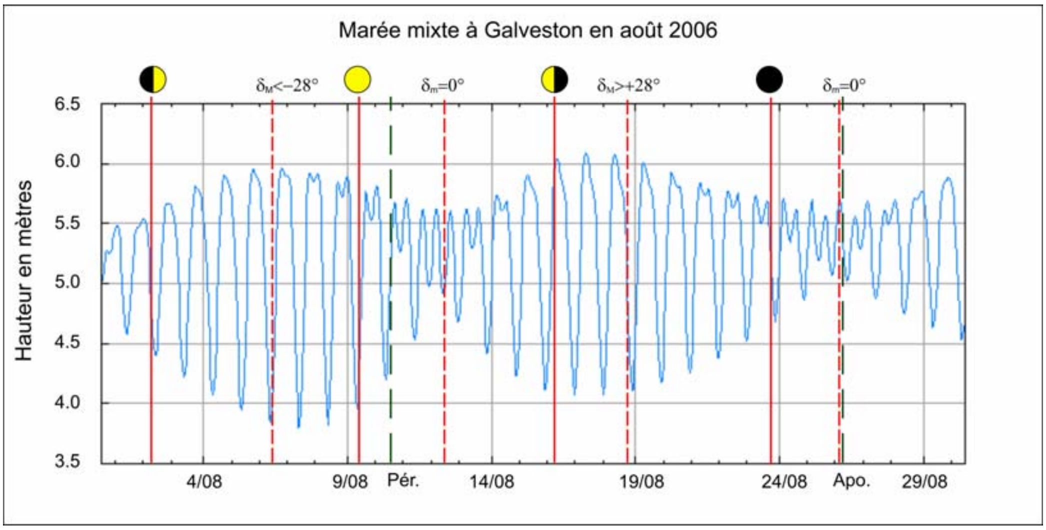
Sur chacune de ces courbes de marée, on a porté les dates des phases lunaires, les dates des extrémums et du zéro de la déclinaison de la Lune et les dates des passages de la Lune à son apogée et à son périgée.



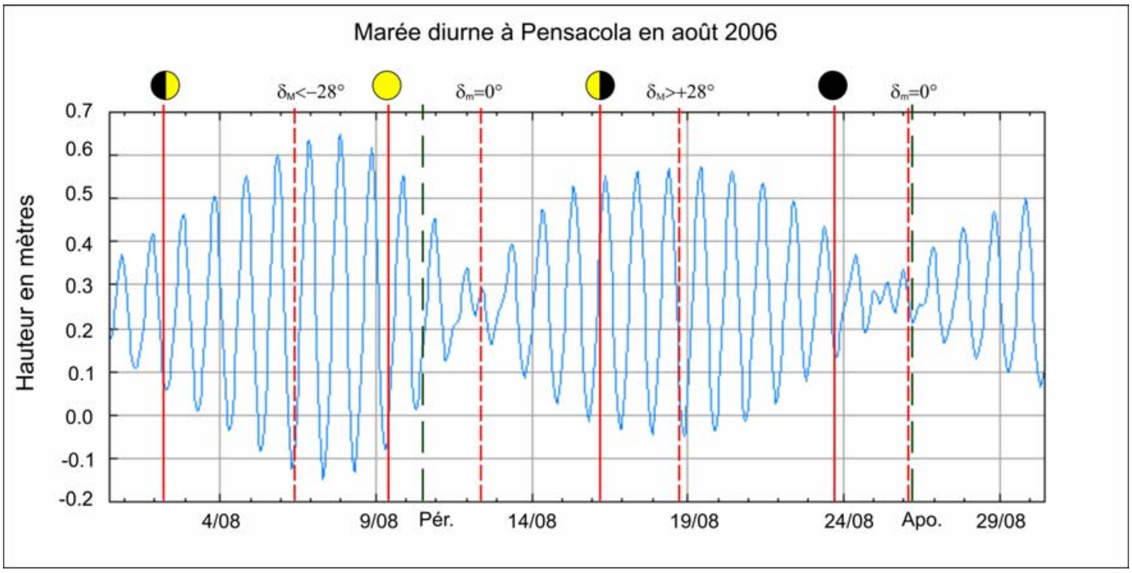
Marée semi-diurne : on remarque que les deux marées journalières sont quasiment de même amplitude. La seconde marée de vive-eau est très faible.



Marée semi-diurne à inégalité diurne : on remarque la grande différence d'amplitude entre les marées de basses mers consécutives.



Marée mixte : on remarquera la présence d'une seule marée par jour en début de mois et au voisinage du 17 août, la marée devient semi-diurne lorsque la Lune est proche de l'équateur (déclinaison nulle), les marées de vive-eau ne sont pas liées aux syzygies, mais aux fortes déclinaisons de la Lune.



Marée diurne : on remarquera qu'il n'y a qu'une marée par jour et que c'est la déclinaison de la Lune qui influence l'amplitude de la marée, les marées sont fortes lorsque la Lune a une forte déclinaison (marée tropique) et elles sont très faibles lorsque la Lune est dans l'équateur. Les marées de vives-eaux et de mortes-eaux ne suivent pas la lunaison. Les hauteurs de cette marée ne sont pas données par rapport au zéro hydrographique.