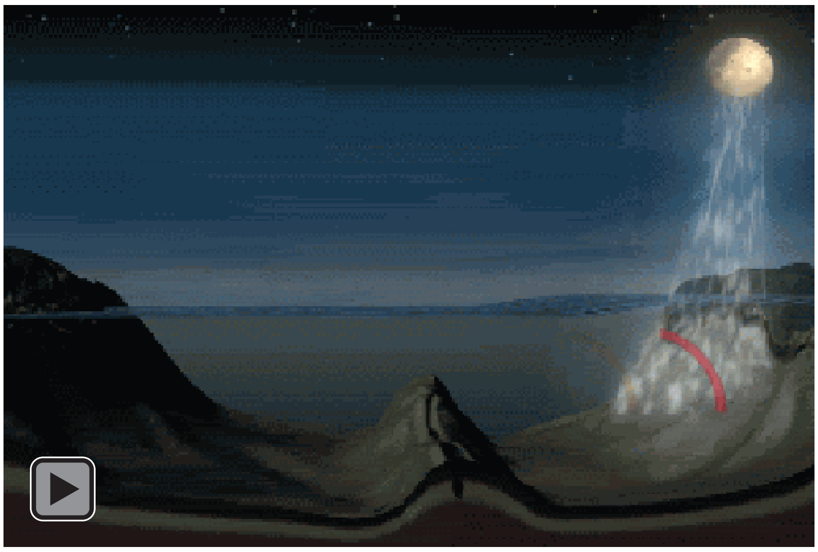
Retour entrée astronomie

Pierre BOUTELOUP

LES MARÉES



1- Historique

Avant NEWTON, et depuis l'antiquité, les opinions les plus disparates ont été émises sur l'origine des marées. Certes, quelques philosophes, ou de sagaces observateurs, avaient bien eu l'intuition que la Lune jouait un rôle important. POSIDONIUS avait donné un tableau des concordances qu'il avait observées sur la côte d'Espagne entre les variations diurnes, mensuelles, et même annuelles, des marées et les mouvements de la Lune et du Soleil. Mais, à côté de cette vision exacte, que d'opinions bizarres!

La marée est due au vent, comme le pensait ARISTOTE. D'après PLATON, elle était due aux oscillations d'un liquide contenu dans des cavernes souterraines et correspondait à une sorte de respiration de la terre. Le grand KEPLER lui-même reprit cette idée insoutenable. BERNADIN de SAINT-PIERRE au 18e siècle voyait la cause des marées dans la fusion des glaces polaires!

GALILÉE avait bien vu le lien entre la rotation de la Terre et la périodicité des marées, mais refusait l'influence de la Lune comme sentant trop l'astrologie!

Enfin, NEWTON lui-même donna une explication détaillée du phénomène à partir de la gravitation universelle. LAPLACE fixa les bases définitives de la théorie. Citons encore l'américain HARRIS, Henri POINCARÉ et bien d'autres...

L'explication définitive des marées représente une grande victoire de l'esprit humain en face de phénomènes aussi complexes.

2- L'effet de marée

Considérons sur la figure 1, 5 points matériels immobiles A, B, C, D , G situés à grande distance d'un astre (L) (ce sera la Lune). La droite CD passe par le centre de l'astre : O, tandis que la droite AB est perpendiculaire à CD. $GA = GB = GC = GD$. Sur la figure sont tracées les forces gravitationnelles subies par les 5 points. On voit qu'à cause de la dépendance en $\frac{1}{r^2}$,

$\|\vec{F}_C\| < \|\vec{F}_G\| < \|\vec{F}_D\|$; tandis que du fait que la force est centrale, $\vec{F}_A$ et $\vec{F}_B$ sont inclinées par rapport à la droite GO.

Si on veut appliquer la mécanique newtonienne dans le référentiel ayant l'accélération de chute libre en G : $\vec{\gamma}$, il faut ajouter les forces d'inerties d'entrainement $-m\vec{\gamma}$ aux forces précédentes. Le résultat est alors le suivant (figure 2).

$\vec{F'}_C = \vec{F}_C - m\vec{\gamma}$; idem pour les autres forces. On peut montrer que $\|\vec{F'}_C\|$ et $\|\vec{F'}_D\|$ sont égales et doubles de $\|\vec{F'}_A\|$ et $\|\vec{F'}_B\|$ qui sont aussi égales.

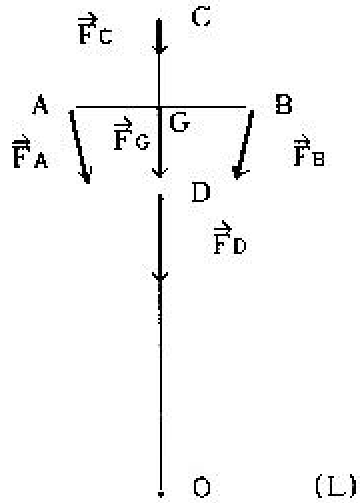


Figure 1

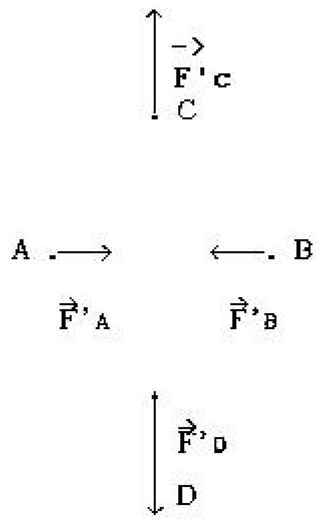


Figure 2

Considérons maintenant un astre sphérique solide (*T*) (ce sera la Terre), en chute libre en étant attiré par l'astre (*L*). Le solide prend l'accélération de chute libre qu'aurait un point matériel isolé situé au centre de gravité *G*. (*T*) reste à distance constante de (*L*) en étant constamment en chute libre, emportée par son mouvement tangentiel. Dans le référentiel lié au solide en chute libre, les forces appliquées aux points de la surface, sommes des forces de gravitation dues à (*L*) et des forces d'inerties, ont alors l'allure suivante (figure 3) :

Tel est bien le cas de la Terre animée à chaque instant d'une accélération dirigée vers la Lune. Le bilan total des forces appliquées à un point de la surface terrestre suppose d'ajouter à cette force de marée la force d'attraction terrestre.

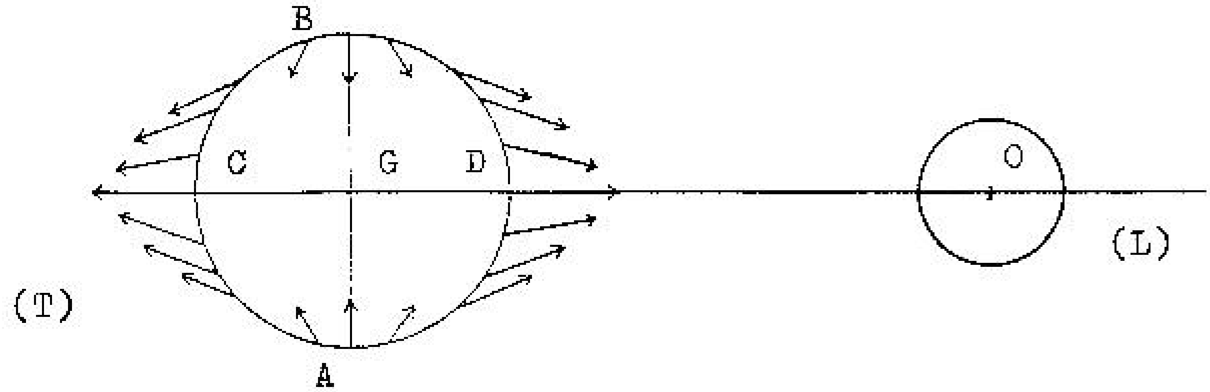


Figure 3

3- Théorie statique de Newton

Cette théorie suppose que les particules d'eau des océans prennent <u>instantanément</u> la position d'équilibre correspondant aux forces précédentes. La surface de l'eau prend alors la forme d'un ellipsoïde dont le grand axe est porté par la droite joignant la Terre à la Lune (figure 4) :

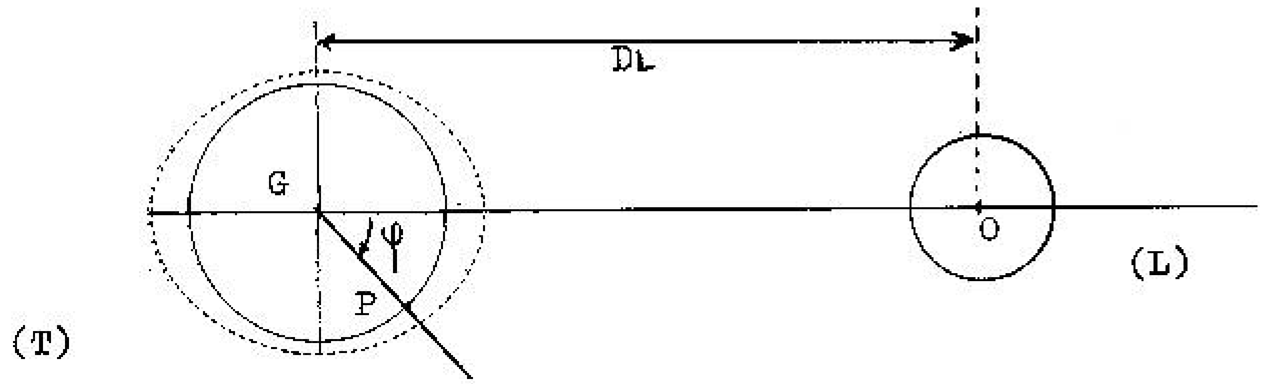


Figure 4

Le Soleil est également à l'origine d'un effet de marée. L'ellipsoïde d'origine solaire est indépendant de l'ellipsoïde d'origine lunaire, et chacun d'eux donne un bourrelet positif, au dessus, de la surface primitive, dans la direction de l'astre et dans la direction opposée, bourrelet compensé par un aplatissement équivalent dans le plan normal à la droite joignant le centre de l'astre au centre de la Terre, en raison de la constance du volume total de la mer.

La hauteur d'eau en chaque point est la somme algébrique des intumescences positives ou négatives provoquées par chacun des deux astres. Lors des syzygies (Pleines Lunes ou Nouvelles Lunes), les grands axes des ellipsoïdes lunaire et solaire étant en coïncidence, les marées sont fortes. On a les grandes marées, ou marées de vive-eau. Lors des quadratures (Premier ou Dernier Quartier), les marées sont faibles parce que les grands axes sont à 90° l'un de l'autre. On a les petites marées ou marées de morte-eau.

En faisant intervenir la rotation de la Terre, on voit que la marée doit avoir une périodicité semi-diurne et une périodicité diurne. En effet, si l'astre perturbateur n'est pas dans le plan de l'équateur (déclinaison δ non nulle), on voit sur la figure 5 que les points situés sur le parallèle *aa*'éprouvent deux pleines mers *ab* et *a*'*b*' nettement différentes. Il y aura donc une périodicité diurne puisqu'une fois par jour la marée sera plus forte, et cela au moment ou l'astre passe au méridien supérieur du lieu. Cette périodicité diurne sera d'autant plus marquée que la déclinaison de l'astre sera plus forte, donc aux solstices. Elle sera nulle aux équinoxes.

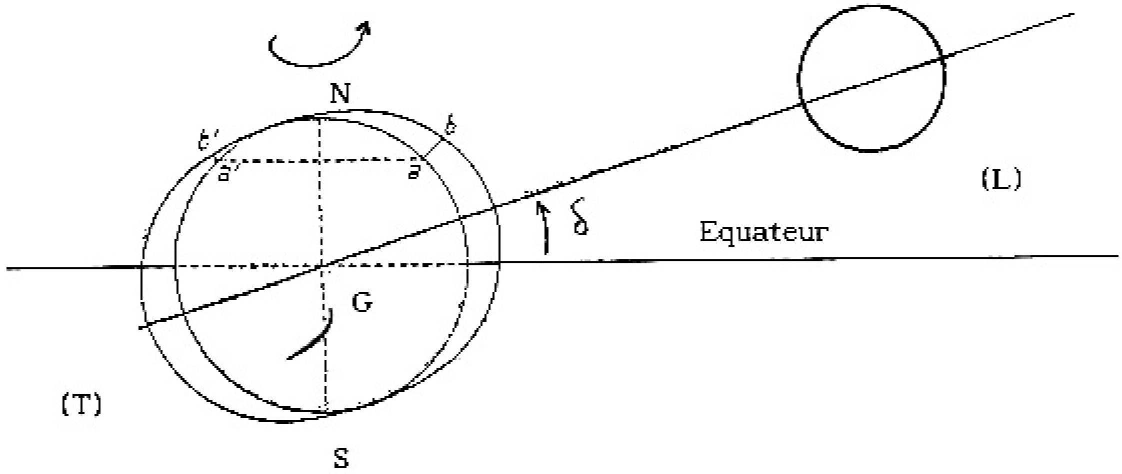


Figure 5

4- Quelques formules

Un calcul complet donne la valeur algébrique *h* de l'écart au niveau moyen. φ est l'angle $\left(\overrightarrow{GO}, \overrightarrow{GP}\right)$ (figure 4).

$$h = \frac{GM_L R^2}{2g{D_L}^3}\left(3\cos^2\varphi - 1\right)$$

M_L masse de la Lune ; $g = 9.81 m/s^2$
D_L distance Terre-Lune ; G constante de la gravitation universelle
R rayon de laTerre

Le point fondamental est la dépendance en $\frac{1}{{D_L}^3}$.

L'amplitude (dénivellation entre la basse mer et la haute mer) due à la Lune s'obtient par la différence $h(\varphi = 0)$ - $h(\varphi = \frac{\pi}{2})$. On trouve 54 cm. Les amplitudes réelles sont souvent bien supérieures à cela. Nous en verrons l'explication au paragraphe 5. Le rapport de l'amplitude due à la Lune à celle due au Soleil vaut :

$$r = \frac{M_L}{M_S}\left(\frac{D_S}{D_L}\right)^3 = 2.18$$

On peut montrer que ce rapport *r* est proportionnel au rapport des densités de la Lune et du Soleil.

Exprimons (figure 6) la hauteur *h* en fonction de la déclinaison δ de l'astre (angle avec le plan équatorial), de la latitude λ du lieu d'observation, et de l'angle horaire α de l'astre (angle entre le méridien du lieu et celui où l'astre culmine). On trouve :

$$3\cos^2\varphi - 1 = \frac{3}{2}\cos^2\lambda\cos^2\delta\,\cos 2\alpha + \frac{3}{2}\sin 2\lambda\sin 2\delta\,\cos\alpha$$
$$+\frac{1}{2}\left(1 - 3\sin^2\lambda\right)\left(1 - 3\sin^2\delta\right)$$

On retrouve la périodicité semi-diurne par le terme en $\cos 2\alpha$. Cette périodicité est maximale aux équinoxes quand $\cos^2\delta$ est maximal.

On retrouve également la périodicité diurne par le terme en $\cos\alpha$.

Cette périodicité est nulle aux équinoxes, quand $\sin 2\delta$ est nul, comme nous l'avons vu au & 3.

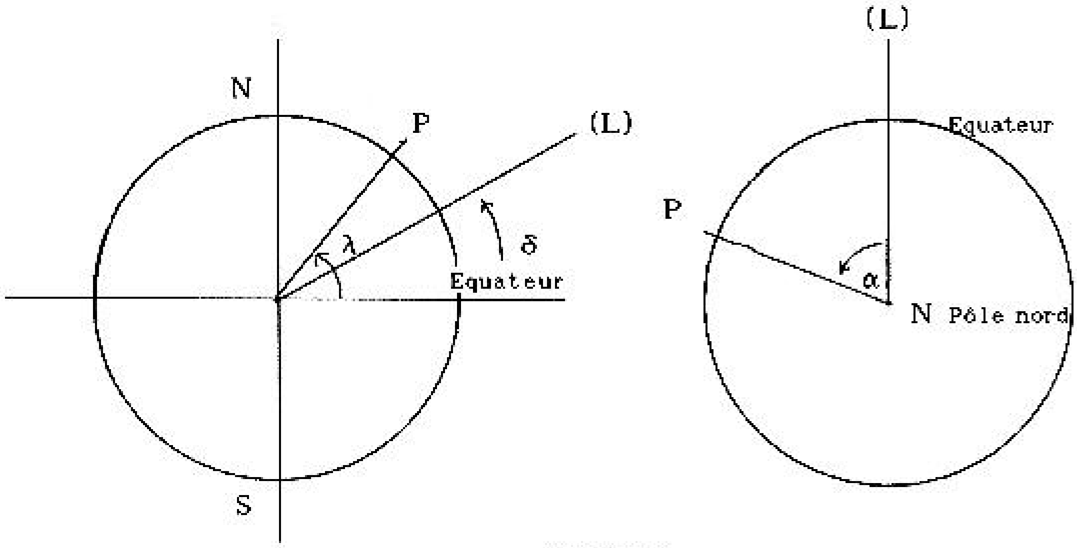


Figure 6

5- Théorie de Laplace

En fait, les marées constituent un phénomène dynamique. La rotation de la Terre demande au bourrelet d'eau, pour pouvoir rester aligné avec l'astre à l'origine de la marée, de se propager par rapport aux fonds marins. Il y a donc formation d'une onde de marée progressive. Mais les bassins océaniques constituent des systèmes clos. Il va donc se créer par de multiples réflexions des ondes stationnaires. Il va alors apparaître le phénomène de résonance lorsque la période propre d'oscillation d'un bassin océanique coïncidera avec une période astronomique d'excitation.

LAPLACE suppose que dans l'intervalle de temps considéré (quelques périodes de marées) tous les paramètres astronomiques peuvent être pris comme constants, les bassins océaniques étant soumis aux excitations diurnes et semi-diurnes solaires et lunaires. C'est alors l'expérience qui donne l'amplitude et la phase de la réponse (le calcul théorique est effroyable).

Considérons par exemple, sur la figure 7, la carte des lignes cotidales de l'Océan Atlantique, élaborée par HARRIS et STERNEK (lignes d'égales heures de haute mer). Cette carte a été vérifiée récemment par mesures satellitaires. Le point central marqué par un rond dans l'Atlantique nord est un point amphidromique (amplitude de marée nulle). De ce point à Brest, la mer est haute à 4h simultanément pour tous les points de la ligne. Pendant ce temps la mer est basse du point amphidromique au Labrador, puisqu'elle est haute 6h plus tard à 10h.

On a donc une onde stationnaire. La mer est haute en France pendant qu'elle est basse au Canada. L'amplitude est très faible entre ce point amphidronique et l'Islande, sans être nulle, à cause de l'existence d'une onde stationnaire perpendiculaire à la précédente; la force de Coriolis en effet, crée un déplacement transversal des eaux du bassin dès qu'elles se mettent en mouvement (Ondes de KELVIN; c'est à cause de ces ondes que les marées dans la manche sont plus fortes en France qu'en Angleterre). Les lignes cotidales doivent se succéder autour des points amphidromiques dans le sens contraire à celui des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord.

Considérons sur la figure 8 un bassin de longueur l. On sait que lorsque la longueur d'onde est très supérieure à la profondeur du bassin, la vitesse de propagation vaut $v = \sqrt{gz}$; z étant la profondeur; $g = 9.81 m/s^2$.

La période T d'oscillation correspond au temps d'aller et retour de l'intumescence et l'on a :

$$v = \frac{2l}{T} \qquad ; \qquad T = \frac{2l}{\sqrt{gz}}$$

c'est la formule de MÉRIAN.

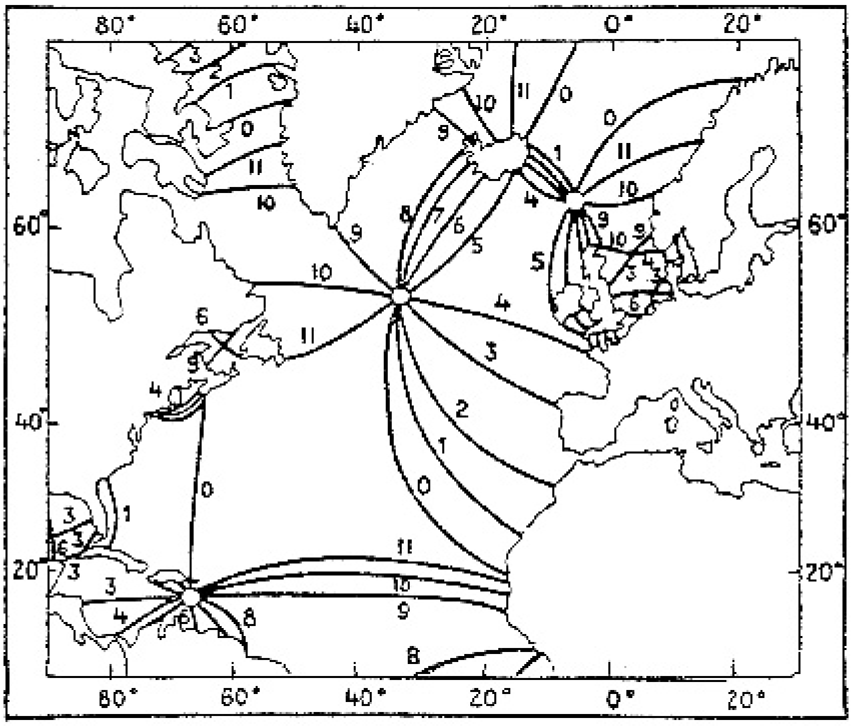


Figure 7

Dans le cas de l'Atlantique Nord, $l \simeq 4000km$, distance de Brest au Labrador, et $z \simeq 3000m$. On trouve $T \simeq 12.8h$. Ainsi, l'Atlantique Nord résonne très bien sur l'onde semi-diurne lunaire de période $12.4h$. Ceci explique le fait que les marées sur nos côtes soient fortes.

Cependant, on est dans le cas d'un oscillateur amorti (les courants de marée frottent sur le fond des océans), avec une fréquence excitatrice supérieure à la fréquence de résonance. Il en résulte que le moment de la hauteur maximale d'eau est déphasé de 180°, donc de 6h (la période est de 12h) par rapport au moment où la Lune culmine (ou est à l'opposé de la culmination). Ainsi, sur les côtes bordant l'atlantique, la mer est haute quand la Lune se lève ou se couche. Pour les marées dans la manche, il s'agit de la marée de l'atlantique qui s'engouffre dans la manche, sous la forme d'une onde de Kelvin, donc plus élevée à droite (France) qu'à gauche (Angleterre) à cause de la déviation par la force de Coriolis, et qui avance lentement (mer peu profonde). L'heure de la haute mer n'a donc plus rien à voir avec la culmination de la Lune. Le fait que l'onde ait une amplitude plus grande à droite qu'à gauche, entraîne qu'en France les marées sont plus fortes qu'en Angleterre dans la manche. Dans la mer du Nord, c'est le contraire, l'onde de l'océan arrivant par le nord.

D'autres cas existent. Ainsi, à Tahiti, il y a résonance sur l'onde semi-diurne solaire et la mer est haute tous les jours à midi et à minuit; mais l'amplitude est faible.

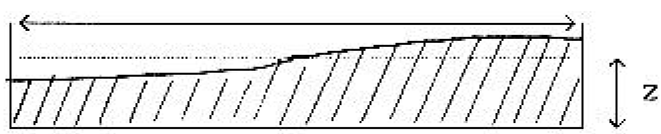


Figure 8

6- Les marées sur les côtes de France bordant la Manche ou l'Atlantique

Pour les marées sur ces côtes, nous ne garderons donc dans l'expression théorique de h que les termes semi-diurnes lunaire et solaire, la résonance étant pratiquement nulle sur l'onde diurne. On obtient donc la Formule de LAPLACE, privée des termes diurnes :

$$h = L\cos^2\delta\,\cos 2(\alpha - a) \;+\; S\cos^2\delta'\,\cos 2(\alpha + P_h - b)$$

Les amplitudes L et S ainsi que les phases a et b sont à déterminer expérimentalement. P_h représente l'angle que font le Soleil et la Lune entre eux :

l'angle des phases de la Lune. $P_h = \left(\overrightarrow{GS}, \overrightarrow{GL}\right)$ (figure 9).

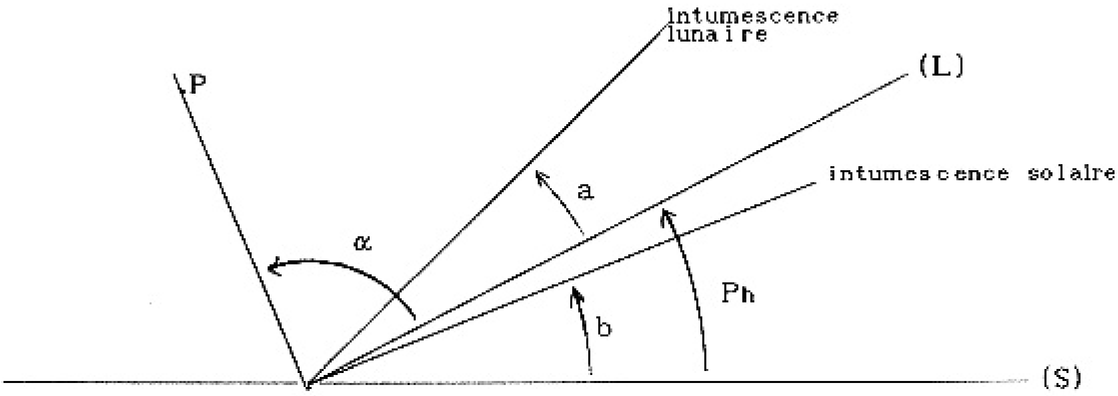


Figure 9

a est <u>l'établissement corrigé du port</u> : retard entre le moment de la haute mer et le passage de la Lune au méridien lors des grandes marées (ondes lunaire et solaire en phase). L'établissement corrigé du port à Brest vaut 3*h*46*mn* , ce qui donne $a = 360 \times 3.77/24 = 57^{\circ}$. Notons que l'heure de la haute mer est de plus en plus tardive lorsque l'on s'enfonce dans la Manche par le retard de l'onde venant de l'Atlantique lors de sa progression.

On peut montrer que le retard entre le moment de la marée haute et le passage de la Lune au méridien ne varie pas beaucoup en un endroit donné. La marée se décale donc régulièrement, comme la Lune, d'un jour à l'autre. Elle se décale plus au moment des marées de morte-eau. Il résulte de cela, en particulier, qu' en un lieu donné, la mer est haute toujours à la même heure en grande marée : 7*hT.U.* et 19*hT.U.* au Mont Saint Michel, 11*hT.U.* et 23*hT.U.* au Havre.

Les grandes marées se produisent lorsque les intumescences lunaire et solaire sont en phase (figure 10), ce qui donne :

$$2(\alpha - a) = 2(\alpha + P_h - b) + 2k\pi$$

$$P_h = b - a + k'\pi$$

$k' = 0$ à la nouvelle Lune, et $k' = \pi$ à la pleine Lune.

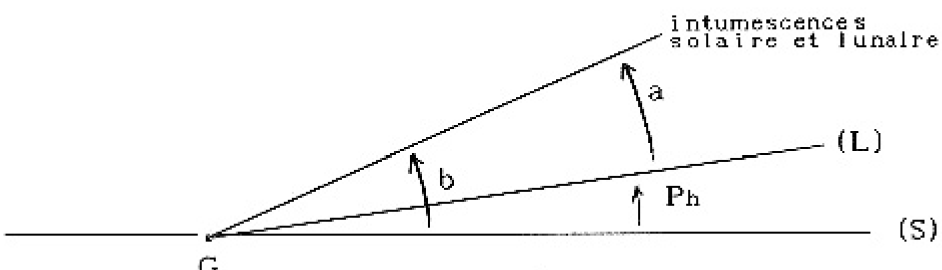


Figure 10

b - a est <u>l'âge de la marée</u> : décalage entre les grandes marées et les syzygies (la grande marée a lieu un peu après la Pleine Lune ou la Nouvelle Lune). Pour Brest $b - a = 19^{\circ}$; or P_h varie de 19° en 37 heures. La grande marée est donc la troisième après celle la plus voisine de la conjonction ou de l'opposition.

7. Formule approchée du coefficient en grande marée

On peut donner une formule approchée très simple pour les coefficients des grandes marées sur nos côtes (Atlantique et Manche) :

Lors d'une grande marée, les ondes solaire et lunaire sont en phase, et à marée haute, $h = L\cos^2\delta + S\cos^2\delta'$. Mais la distance Terre-Lune varie. On introduit la parallaxe lunaire *p*, angle sous lequel on voit depuis la Lune le rayon terrestre. La parallaxe moyenne $< p >$ vaut 57'.

La dépendance en $\frac{1}{D_L^3}$ donne, l’action moyenne de la Lune étant trouvée égale à 3 fois celle du Soleil :

$$h = S\left[3\left(\frac{p}{<p>}\right)^3 \cos^2\delta + \cos^2\delta'\right]$$

D’un port à l’autre, sur nos côtes, les amplitudes des marées sont toujours proportionnelles entre elles. Une fois les rapports connus, l’intensité de la marée sera connue quand on la connait en un lieu. On définit ainsi le coefficient de marée *C*, qui par définition vaut 100 pour une grande marée ayant lieu lorsque le Soleil et la Lune ont une déclinaison nulle, la Lune étant à sa distance moyenne de la Terre. Les coefficients peuvent varier de 20 à 120. On obtient l’amplitude de la marée en un lieu en multipliant $\frac{C}{100}$ par la hauteur du port (variation au lieu considéré entre le niveau moyen et la haute mer en coefficient 100), puis par 2 pour passer de la hauteur à l’amplitude.

Notre formule approchée donne alors :

$$C = 25\left[3\left(\frac{p}{<p>}\right)^3 \cos^2\delta + \cos^2\delta'\right]$$

Donnons un exemple de calcul :

Les tables des marées donnent pour le 9 mars 1993 : *C* = 119 . Les éphémérides donnent :

δ' = -4° 34.6'; δ = -3° 18.2'; *p* = 61' 26” . La formule donne *C* = 118.5.

8- Examen des Grandes Marées

La Lune décrit une ellipse autour de la Terre, comme tout satellite.

Négligeant l’inclinaison du plan de l’orbite de la Lune sur l’écliptique et P_h, on a $\delta \simeq \delta'$. L’amplitude d’une grande marée dépend donc essentiellement de deux choses : *p* auquel correspond la distance Terre-Lune, et δ déclinaison du Soleil. Une très forte marée correspond à une Lune au périgée (le périgée est lui-même variable, la Lune passant plus ou moins près!) au voisinage de l’équinoxe (δ' = 0), au moment d’une Nouvelle Lune ou d’une Pleine Lune.

Si la Lune est proche du périgée à la Nouvelle Lune par exemple, il est clair qu’elle sera près de l’apogée à la Pleine Lune, ce qui fait qu’une grande marée sur deux a un coefficient supérieur à 100. Les très grandes marées ont donc lieu une fois par mois au voisinage des équinoxes.

Un petit schéma (figure 11) nous montre que si, au printemps, on a de très grandes marées (périgée) de Pleines Lunes, à l’automne, on aura de très grandes marées de Nouvelles Lunes (et vice versa), la précession du périgée étant négligeable sur six mois.

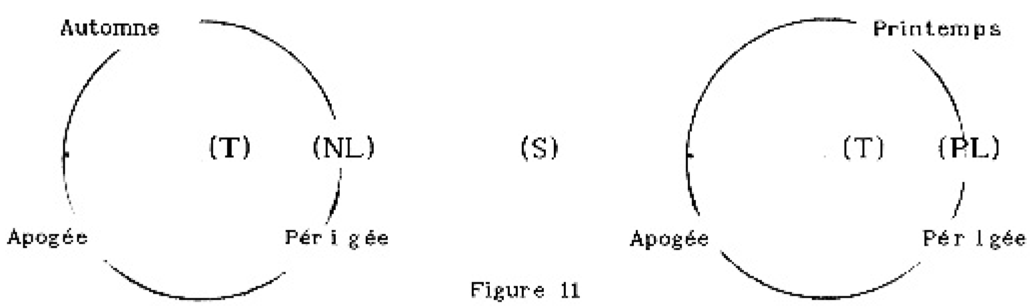
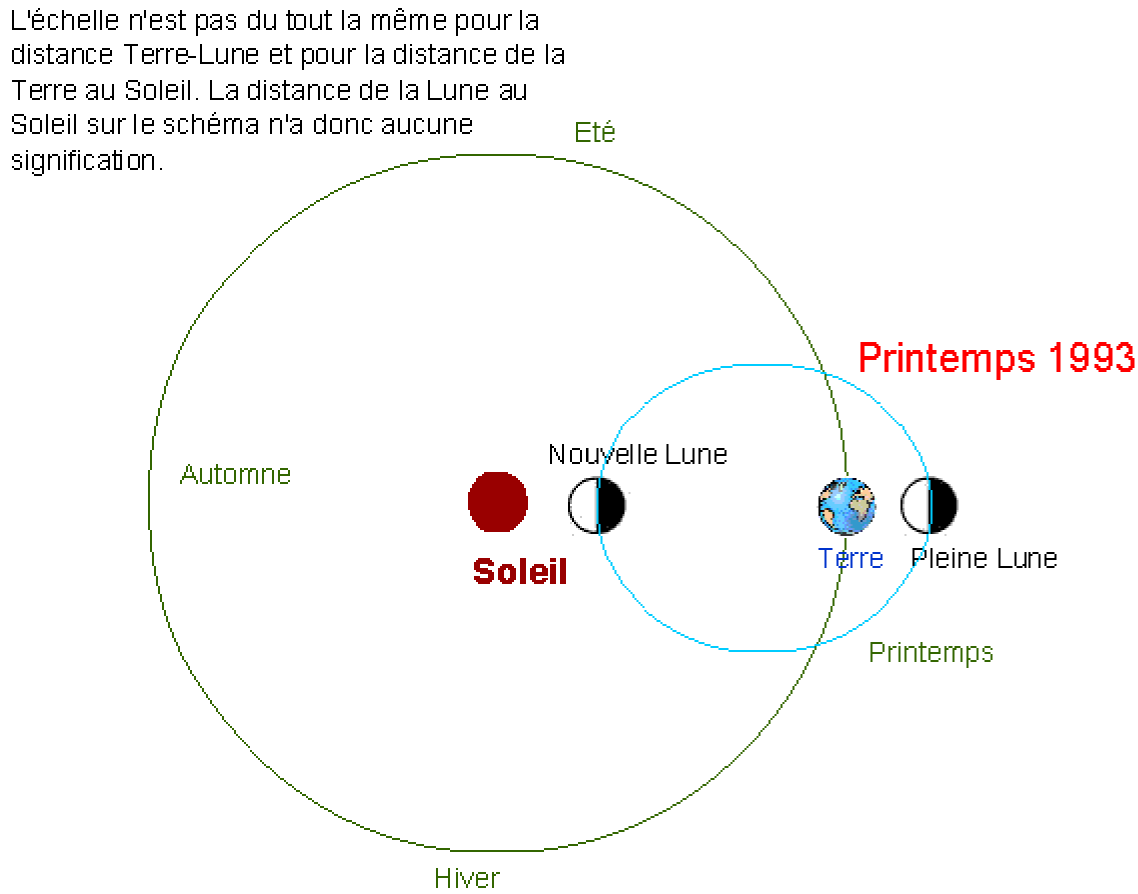
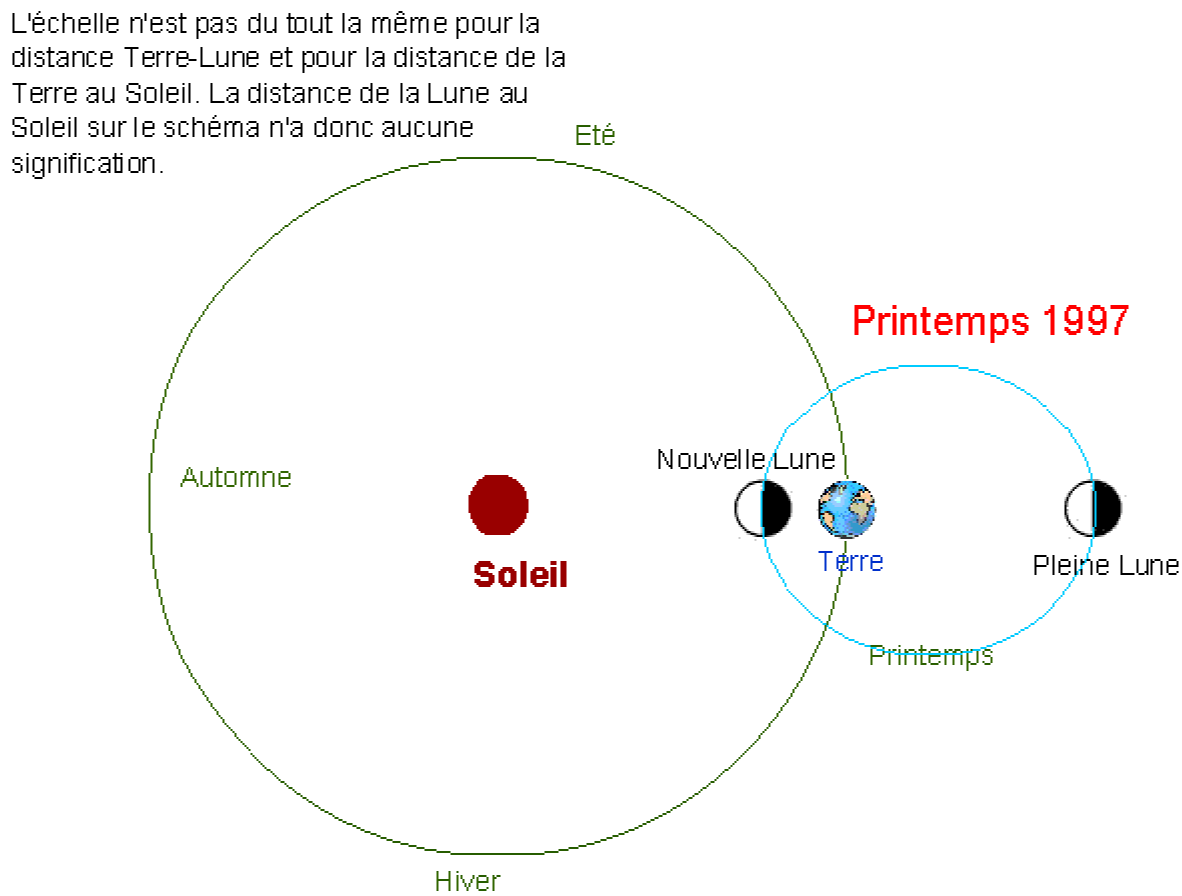


Figure 11

D’autre part, si il y a une très bonne coïncidence entre sysygies, passage au périgée et proximité de l’équinoxe une année, on peut vérifier, compte tenu de la précession du périgée (Révolution Anomalistique) et de la durée de la Lunaison, que la situation se reproduit convenablement environ 4 ans plus tard, mais la Pleine Lune est remplacée par la Nouvelle Lune et vice versa. En effet, le grand axe de l'ellipse orbite de la Lune fait un tour complet dans le sens positif en environ 9 ans, à cause de la perturbation gravitationnelle du Soleil, donc un demi-tour en un peu plus de 4 ans. Les très grandes marées ont donc lieu environ tous les 4 ans, quand cet axe est aligné avec la direction Soleil-Terre à l'équinoxe. Si une année, au printemps, la très grande marée a lieu à la Pleine Lune, 4 ans après, elle aura lieu à la Nouvelle Lune, et vice versa.





Citons ainsi :

1980	18 mars	118	Nouvelle Lune
1985	6 avril	117	Pleine Lune
1989	10 mars	117	Nouvelle Lune

1993	9 mars	119	Pleine Lune
1997	10 mars	119	Nouvelle Lune

Citons également le Saros : la hauteur de la mer n'étant fonction dans le même lieu que des positions relatives du Soleil, de la Lune et de la Terre, elle doit redevenir la même au bout de la période qui ramène la même position des trois astres. Cette période est appelée Saros. Elle vaut 6585.5 jours soit 18 ans 11 jours. Il y a donc tout de même un lent décalage par rapport à l'équinoxe.

9- Encore quelques réflexions

En ce qui concerne la hauteur du port, elle est amplifiée dans les baies par effet de conservation de l'énergie de l'onde dans un espace réduit : resserrement des côtes et hauts fonds. C'est le cas de la baie du Mont Saint Michel (hauteur de 6.25 m à Granville).

Il faut également parler du mascaret : L'onde de marée se propage plus vite en aval d'un fleuve où la profondeur est plus grande qu'en amont. Il y a donc déformation progressive de l'onde de marée lors de sa montée dans le fleuve. Cela peut aller jusqu'à la formation, en tête de l'onde, d'un ressaut hydraulique. Une vague remonte le fleuve avec le flot. C'est le mascaret.

Il y a des mascarets en Angleterre sur la Severn, et également sur la Dee près de Chester; sur le Petitcodiac au Canada (1.50 m de hauteur); dans l'Amazone (5 à 6 m).

En France, il y a un mascaret dans le Couesnon d'une hauteur de quelques dizaines de centimètres (la hauteur est fonction de la profondeur du fleuve); dans la Garonne entre Bordeaux et Cadillac; dans la Dordogne à Saint Pardon, où l'on fait du surf sur le mascaret. Dans la Seine, avant les travaux d'endiguement (digue du Ratier) et d'approfondissement du chenal, le mascaret atteignait une hauteur de 2.50 m à Caudebec, là ou maintenant il a disparu. Mais il existe encore au débarcadère du bac de Sahurs en aval de Rouen pour les coefficients supérieurs à 100 où il arrive 12 minutes avant l'heure de la haute mer au Havre. Il se forme au niveau de Duclair et est bien visible dès l'amont de Duclair.

10- Analyse harmonique des marées

En fait, la théorie de Laplace supposait tous les paramètres astronomiques constants pendant l'intervalle d'une marée : distance Terre-Lune, déclinaisons etc. Or ces paramètres varient. La réponse d'un océan à ces paramètres variables doit également être déterminée expérimentalement, avec encore la possibilité de résonances modifiant l'amplitude de la réponse. On développe alors tous les paramètres astronomiques ayant une influence sur les marées en fonctions sinusoïdales : les harmoniques, et on détermine expérimentalement la réponse de l'océan à chacune de ces harmoniques. On arrive alors à une précision de quelques centimètres sur les hauteurs, et de quelques minutes sur les heures des marées. C'est la méthode utilisée actuellement pour construire les tables des marées.

Si l'on ne tient compte que des ondes semi-diurnes, diurnes et des périodes plus longues, la courbe donnant la variation de la hauteur d'eau au cours d'une marée est très voisine d'une sinusoïde. Mais la présence d'harmoniques de périodes plus courtes peut la déformer considérablement. Ainsi, la baie de Seine possède l'harmonique quart-diurne la plus forte du monde. Elle entraîne une très longue étale de pleine mer (plusieurs heures), à l'origine de la construction du Havre par FRANÇOIS *I*er, et une montée du flot très rapide en grande marée.

11- Les harmoniques de la baie de Seine

Les marées dans la manche sont causées par la remontée dans la manche des marées de l'atlantique. En grande marée, du fait que la manche est peu profonde, la variation relative de profondeur entre la marée haute et la marée basse est importante. Il en résulte que la zone de marée haute avance beaucoup plus vite vers le Pas-de-Calais que la zone de marée basse du fait que la vitesse d'avancée de l'onde est proportionnelle à la racine carré de la profondeur. À partir d'un profil sinusoïdal, l'onde de marée se déforme donc considérablement ce qui crée de nombreuses harmoniques. En particulier une harmonique quart-diurne et une harmonique sixième-diurne très importantes. *Le Provost et al.,1986* indique par exemple, pour une amplitude de 261 cm de l'onde semi-diurne, une amplitude de 49 cm de l'onde quart-diurne et une amplitude de 41 cm de l'onde sixième-diurne. Il y a en effet une résonance importante de la manche sur ces deux harmoniques, ce qui les amplifie beaucoup.

La manche ressemble un peu, entre Cherbourg et le pas-de-Calais à un rectangle (figure 12).

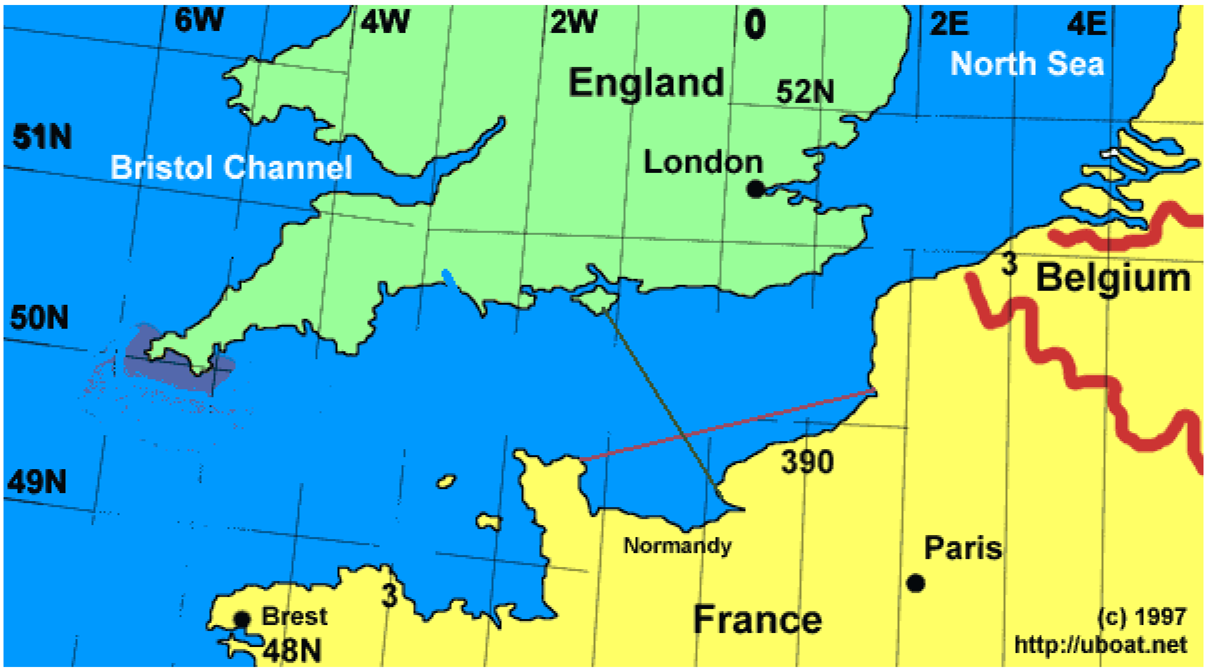


Figure 12

L'onde quart-diurne correspond à l'oscillation suivant la longueur, il s'agit d'une oscillation entre la pointe de Barfleur et la baie de Somme.

Rappelons la formule de Mérian :

$$v = \frac{2l}{T} \qquad ; \qquad T = \frac{2l}{\sqrt{gz}}$$

La distance est environ *l* = 210 km. Avec une profondeur moyenne de 40 m environ et *g* = 9.81, on trouve une période d'environ 6h. Pour l'onde sixième-diurne, il s'agit d'une oscillation suivant la largeur, entre la France et l'Angleterre. La distance entre le Havre et l'île de Wight vaut environ 144 km. Toujours pour une profondeur moyenne de 40 m, on trouve une période de 4h.

Nous montrons ci-dessous (figure 13) la courbe de marée à Trouville le Dimanche de Pâques 8 avril 2012 pour une marée de coefficient 114. On voit la très longue étale de pleine mer (presque 4h) et la montée très rapide du flot. Cette très longue étale de pleine mer due aux harmoniques quart diurne et sixième diurne les plus fortes du monde est à l'origine de la construction du port du Havre par François 1er. On voit apparaître, en grande marée, le phénomène de double pleine mer : la mer se met à redescendre un petit peu avant de remonter ! La marée descend en 6h et monte en 2h! De nombreuses personnes se font donc piéger tous les ans sur les bancs de sables de Trouville. À grande marée basse l'automne, on peut en effet pêcher dans le sable avec une pelle les équilles. C'est cette montée rapide du flot qui explique également le mascaret dans la Seine.

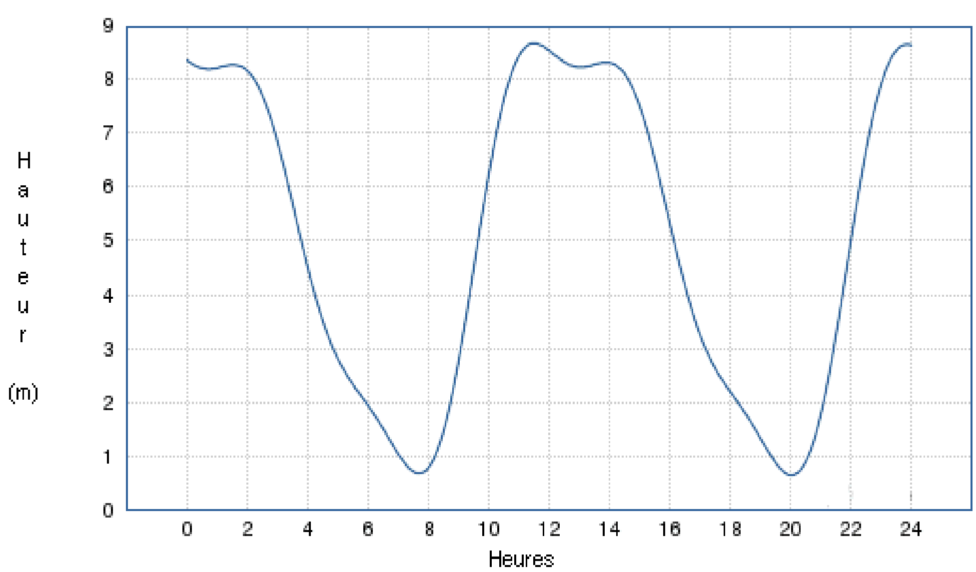


Figure 13

La figure suivante (figure 14) montre comment en ajoutant les composantes semi-diurne, quart-diurne et sixième-diurne, on reconstitue parfaitement la courbe de marée (les phases sont en degrés).

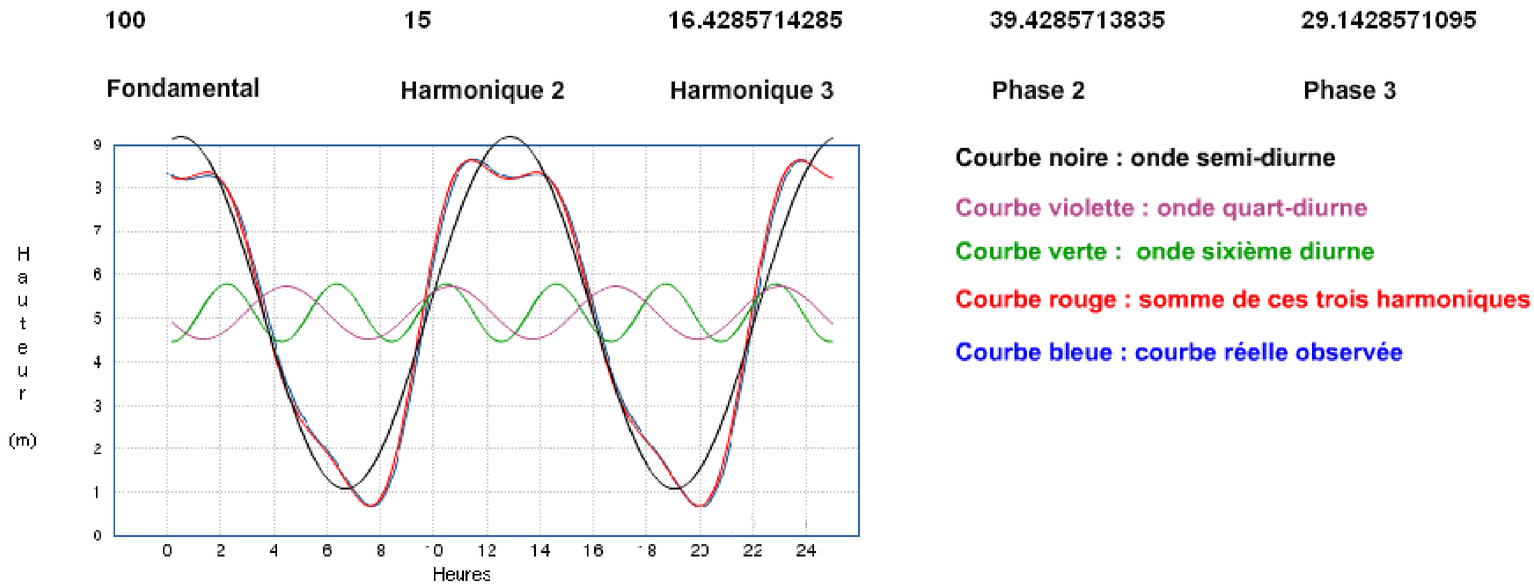


Figure 14.

On peut s'exercer à retrouver les bonnes valeurs de ces harmoniques (amplitudes et phases) avec [l'animation de ce lien](#).

Remarquons qu'une montée rapide, une longue étale de pleine mer et une descente lente correspondent bien à la déformation d'une onde où le sommet va plus vite que le creux, comme dans le cas de la formation du mascaret.

12- Éloignement de la Lune

À cause de la rotation de la Terre et du frottement de l'eau sur les fonds marins, le bourrelet de marée est déplacé en avant de la Lune si celle-ci tourne dans le même sens que la Terre, et en arrière dans le cas contraire.

Le bourrelet qui est proche de la Lune tire cette dernière vers l'avant et l'accélère (la ralentit dans le cas contraire), ce qui l'éloigne de la Terre (la rapproche dans le cas contraire), [d'environ 4 cm par an.](#). D'un autre côté, le frottement ralentit la Terre, et finalement, bien sûr, le moment cinétique total du système Terre-Lune est conservé.

Bibliographie

Que sais-je? Jacques BOUTELOUP : Vagues, marées, courants marins; P.U.F.

Jules ROUCH : Traité d'océanographie physique, Tome III; Les mouvements de la mer; Payot Paris 1948

Jules ROUCH : Les marées; Payot Paris 1961

Michel DARS : Les marées; E.N.S.T.A. Tome 1 et II

Odile GUÉRIN : Les marées

Les guides du S.H.O.M. : La Marée

Librairie et Bibliothèque

Médiathèque du musée de la Villette, rayon Océanographie

Coefficients des marées etc

3615 SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine; également un site internet.

Almanach du marin breton .

ANNEXE MARÉES

On retrouve le résultat de la fin du & 8 directement par le raisonnement suivant : La ligne d'apsides de la Lune est la droite qui joint le périgée à l'apogée; c'est encore le grand axe de l'ellipse lunaire. La ligne d'apsides fait un tour dans le sens direct en 8.8 années (3231.3 jours), elle avance donc de α = 6' 40"= 1.9392510^{-3} rd par jour.

La position du périgée fait donc un demi tour autour de la Terre en environ 4 ans.

La figure 16 nous montre alors que si une année, la ligne des apsides est parallèle à la direction Terre-Soleil à l'équinoxe, elle reprendra la même position 4 ans plus tard. Mais le périgée ayant fait un demi tour, si au printemps il y avait de très grandes marées de Pleine Lune, 4 ans plus tard, il y aura des très grandes marées de Nouvelle Lune.

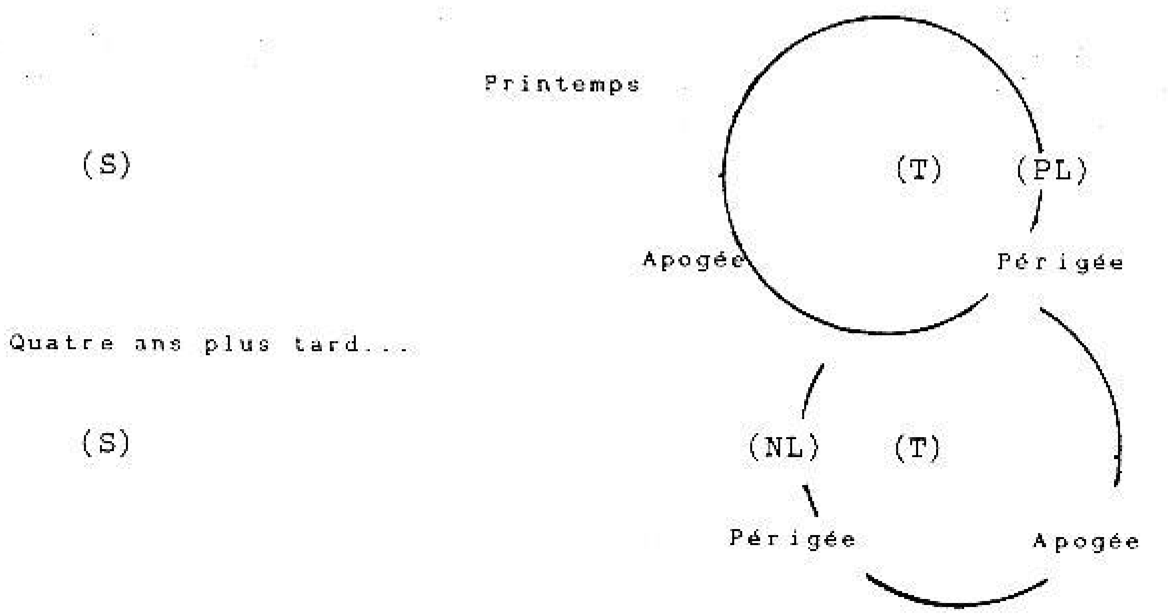


Figure 16

Les deux raisonnements peuvent être fait : l'utilisation directe de L = 29.530588 jours, durée de la Lunaison et de P = 27.554550 jours durée de la Révolution Anomalistique et deuxièmement révolution de la ligne des apsides.

On a, avec A = 365.256365 jours, durée de l'année et S = 27.32166140 jours période sidérale de la Lune :

$$L = \frac{S}{1 - \frac{S}{A}} \qquad\qquad P = \frac{S}{1 - \frac{S\alpha}{2\pi}}$$

Supposons que la ligne des apsides fasse exactement 1/2 tour en 4 ans. On a : $4A\alpha = \pi$.

Le nombre de lunaisons en 1 ans est : $\frac{A}{L} = \frac{A}{S} - 1$.

Le nombre de révolutions anomalistiques est : $\frac{A}{P} = \frac{A}{S} - \frac{A\alpha}{2\pi}$

La différence vaut : $1 - \frac{A\alpha}{2\pi}$

En 4 ans, on obtient : $4 - \frac{4A\alpha}{2\pi} = 4 - \frac{1}{2} = 3.5$

d'où un décalage d'une demie lunaison.

A l'équinoxe de printemps 1993, la ligne des apsides fait un angle de 12.06° avec la ligne Terre-Soleil à l'équinoxe, la Pleine Lune ayant lieu le 8 mars à 9h au même moment à quelques minutes près que le passage au périgée (ce qui explique la très grande marée du 9 mars) et l’équinoxe ayant lieu le 20 mars à 14H 41 .