

LES MAREES

par

P. BOUTELOUP

I.U.F.M. Versailles; Centre de Cergy

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 18^e siècle voyait la cause des marées dans la fusion des glaces polaires!

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.

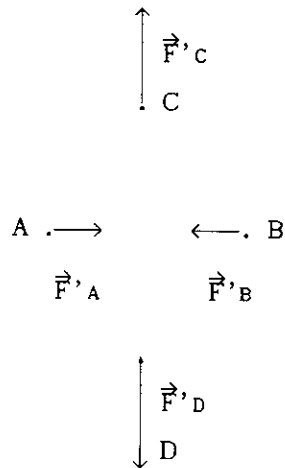
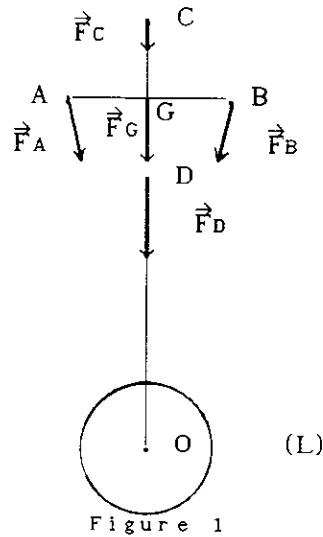
2. L'effet de marée

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 $1/r^2$ $\|\vec{F}_C\| < \|\vec{F}_G\| < \|\vec{F}_D\|$; 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'entraînement $-m\vec{\gamma}$ 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.



Figur 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.

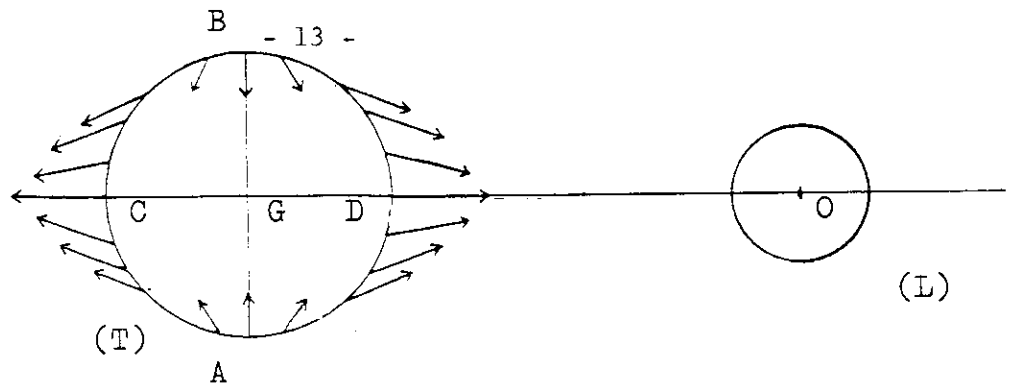


Figure 3

3. Théorie statique de Newton

Cette théorie suppose que les particules d'eau des océans prennent instantanément 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) :

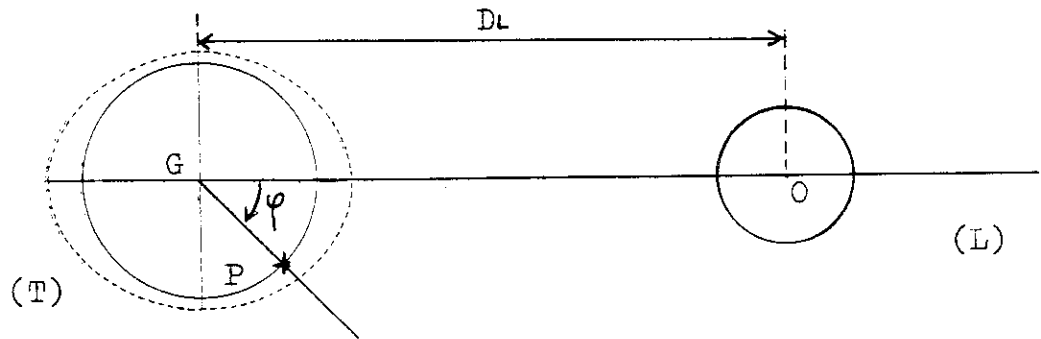


Figure 4

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 où 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.

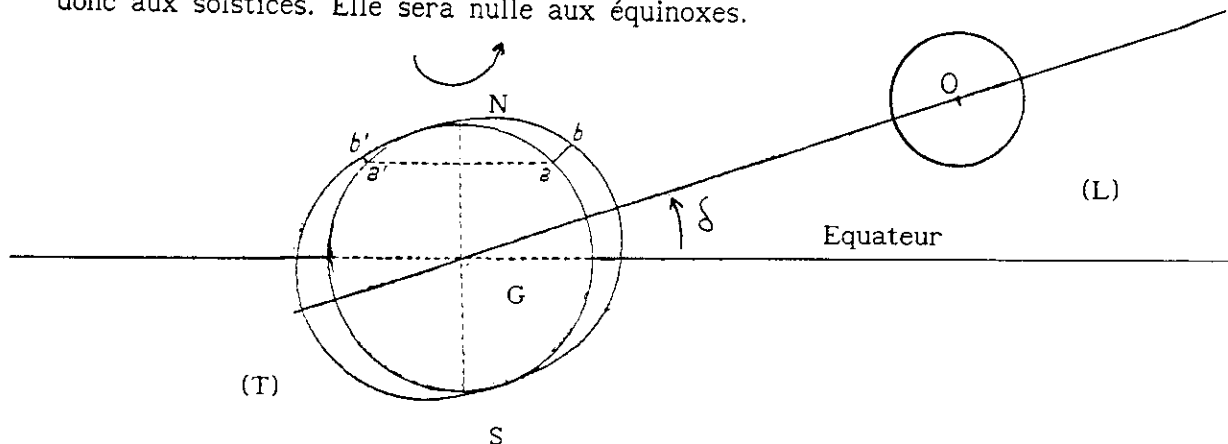


Figure 5

4. Quelques formules

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

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

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

Le point fondamental est la dépendance en $1/D_L^3$.

L'amplitude (dénivellation entre la basse mer et la haute mer) due à la Lune s'obtient par la différence $h(\varphi = 0) - h(\varphi = \pi/2)$. 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 :

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

Exprimons (figure 6) la hauteur h en fonction de la déclinaison 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.

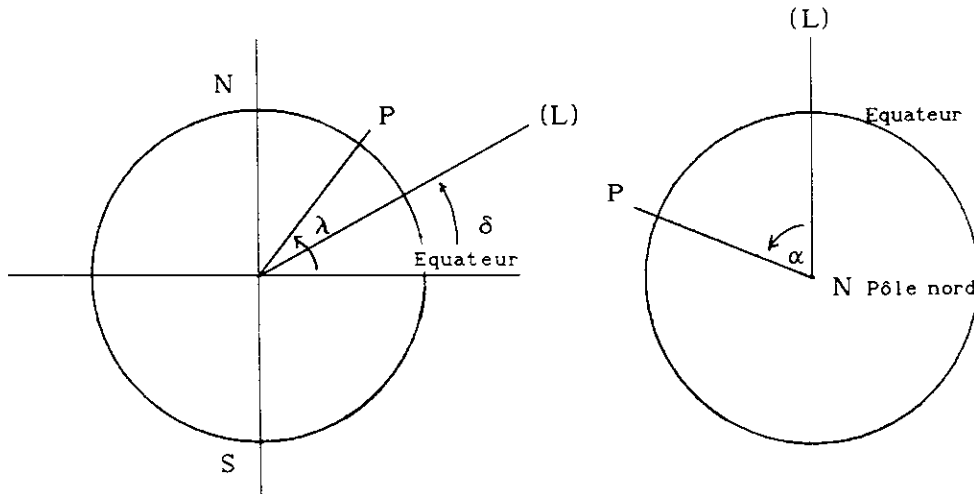


Figure 6

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 Sterne (lignes d'égales heures de haute mer). 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 amphidromique 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. 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 $v = \sqrt{g z}$ z étant la profondeur; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

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

$$v = \frac{2 l}{T} ; \quad T = \frac{2 l}{\sqrt{g z}}$$

c'est la formule de Mérian.

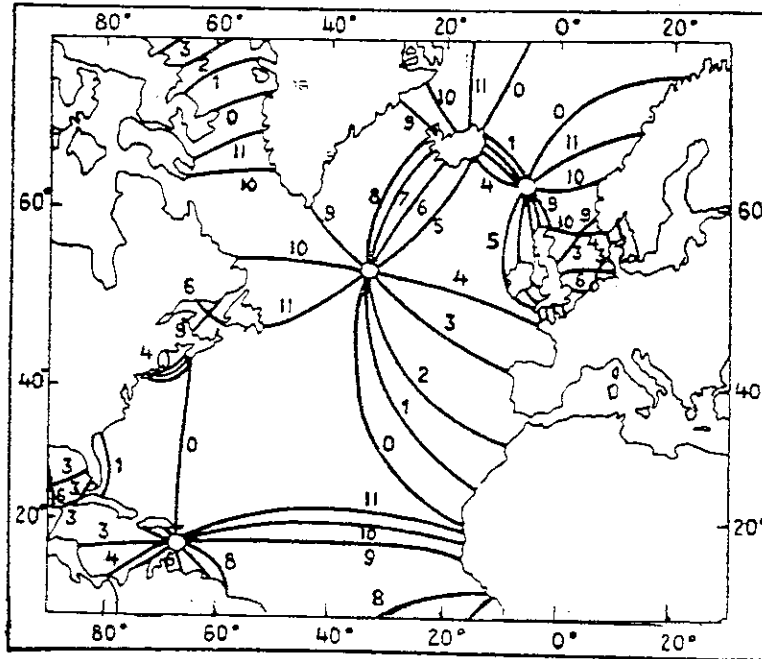


Figure 7

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

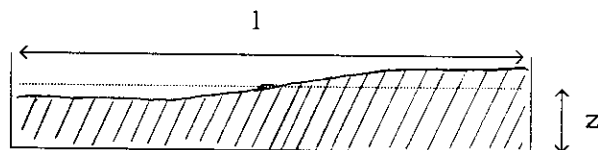


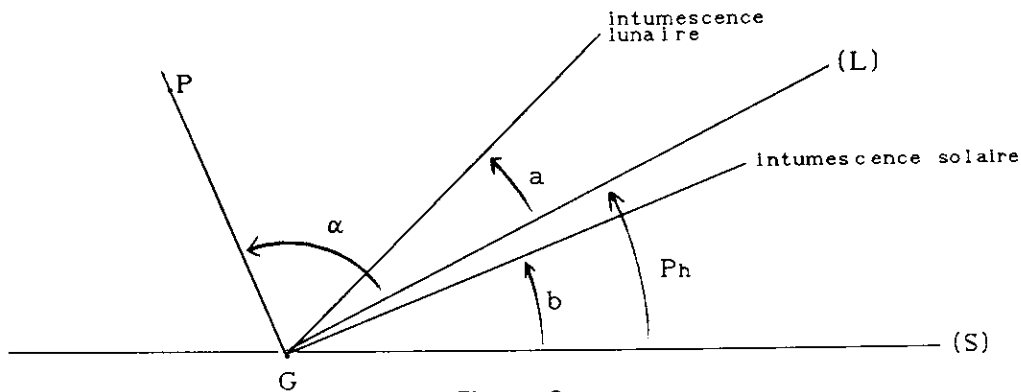
Figure 8

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 lunaires et solaires, la résonance étant pratiquement nulle sur l'onde diurne. On obtient donc la Formule de Laplace, privée des termes diurnes :

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

Les amplitudes L et S ainsi que les phases a et b sont à déterminer expérimentalement. Ph représente l'angle que font le Soleil et la Lune entre eux : l'angle des phases de la Lune. $Ph = (\overrightarrow{GS}, \overrightarrow{GL})$ (figure 9).



a est l'établissement corrigé du port : 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 3h 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.

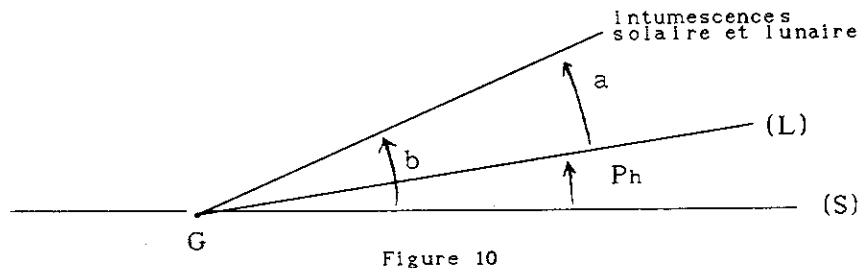
On peut montrer que le retard entre le moment de la marée haute et le passage de la Lune au méridien ne varie pas beaucoup en un endroit donné. La marée se décale donc régulièrement, comme la Lune, d'un jour à l'autre. Elle se décale plus au moment des marées de morte-eau. Il résulte de cela, en particulier, que en un lieu donné, la mer est haute toujours à la même heure en grande marée : 7h T.U. et 19h T.U. au Mont Saint Michel, 11h T.U. et 23h T.U. au Havre.

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

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

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

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



$b - a$ est l'âge de la marée : 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 Φ_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 $\langle p \rangle$ vaut $57'$.

La dépendance en $1/DL^3$ donne, l'action moyenne de la Lune étant trouvée égale à 3 fois celle du Soleil :

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

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 connaît 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 $C/100$ 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 :

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

Donnons un exemple de calcul :

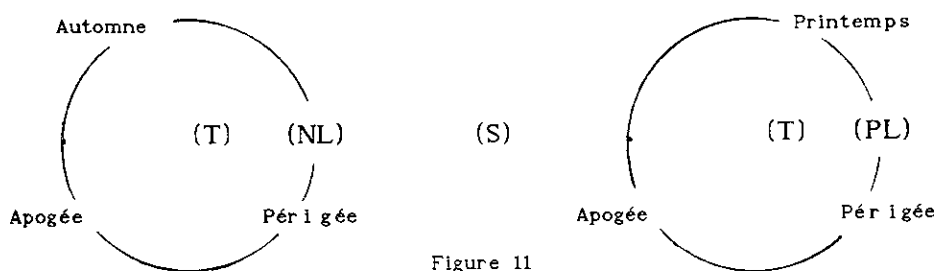
Les tables des marées donnent pour le 9 mars 1993 : $C = 119$. Les éphémérides donnent $\delta' = -4^\circ 34.6'$; $\delta = -3^\circ 18.2'$; $p = 61' 26''$. La formule donne $C = 118.5$.

8. Examen des Grandes Marées

Négligeant l'inclinaison du plan de l'orbite de la Lune sur l'écliptique et Φ_h , on a $\delta \approx \delta'$. 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 ($\delta' = 0$), 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.



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 Lunaïson, que la situation se reproduit convenablement environ 4 ans plus tard, mais la Pleine Lune est remplacée par la Nouvelle Lune et vice versa. Les très grandes marées ont donc lieu environ tous les 4 ans. 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

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 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.

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 résonnances 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 1^{er}, et une montée du flot très rapide en grande marée.

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 I et II

Librairie et Bibliothèque

Librairie Maritime et d'Outre Mer, 17 rue Jacob 75006 Paris

Médiathèque du musée de la Villette, rayon Océanographie (3615 Villette)

Coefficients des marées etc

3615 SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Almanach du marin breton