Marées océaniques

Stéfan Renner
(Univ. Lille)

- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) : www.shom.fr

- « Tout savoir sur les marées », Odile Guérin, Editions Ouest-France

Introduction

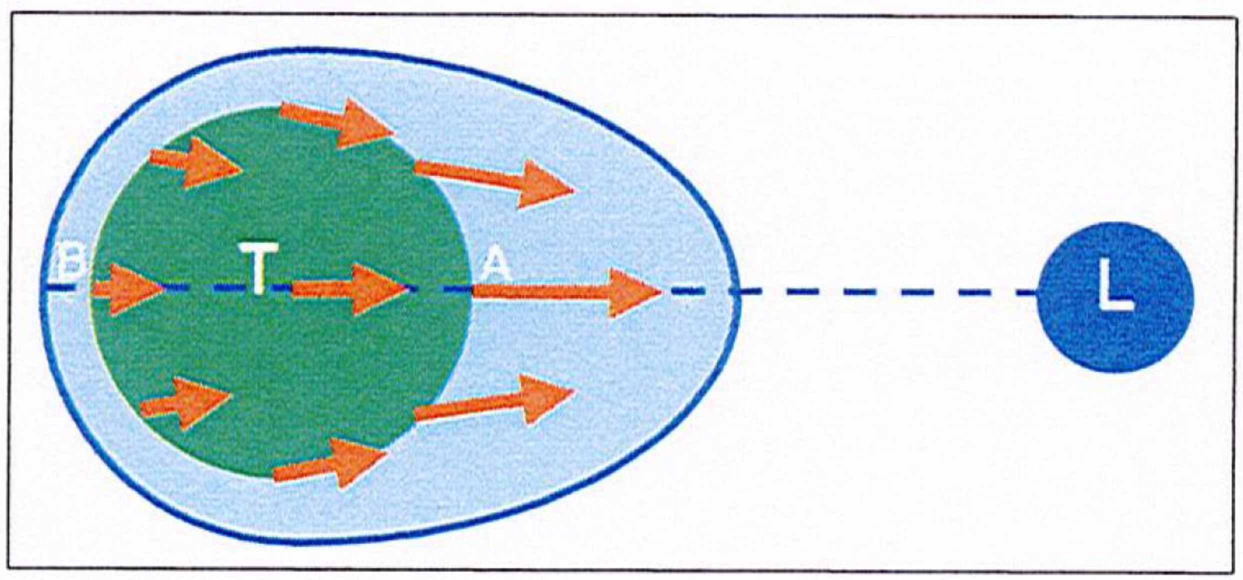
- Marée = conséquence de l'attraction gravitationnelle qui *varie avec la distance*

- Explication satisfaisante du phénomène de marée par la théorie de la gravitation de Newton

- Marées océaniques sur Terre = effet exercé par la Lune (et le Soleil) sur les océans

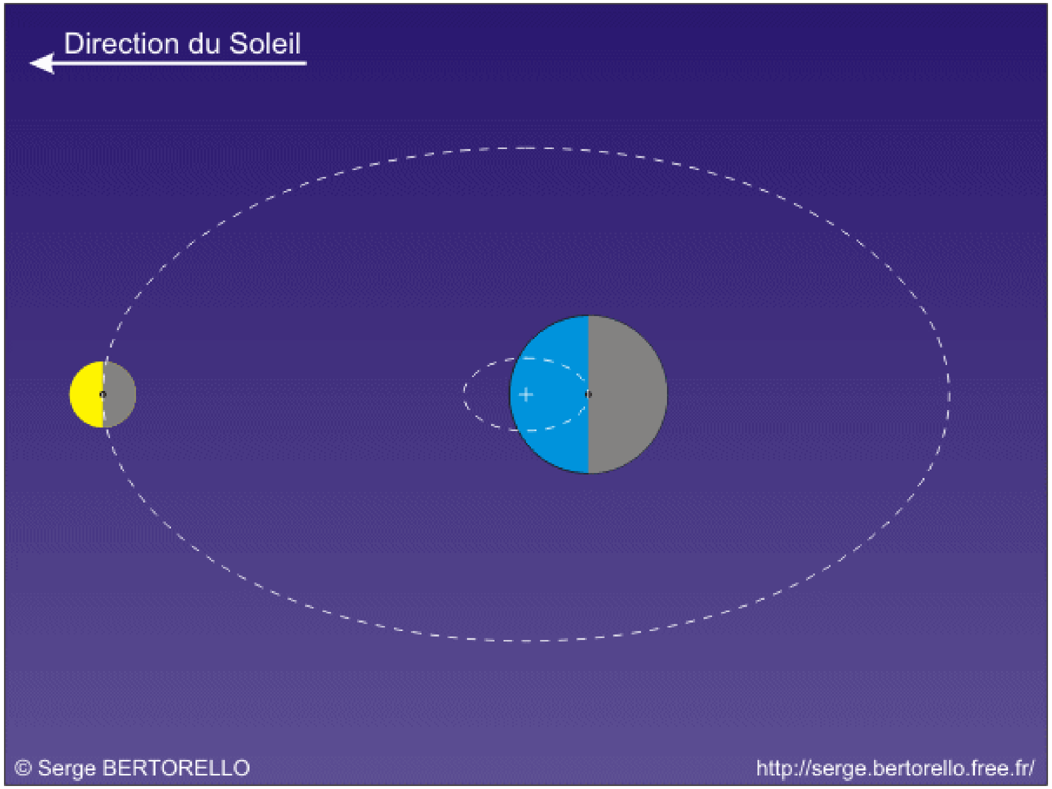
Définition de la force de marée

- L'intensité de l'attraction gravitationnelle est variable car elle dépend de la distance à la Lune : plus un point est proche de la Lune, plus l'attraction est forte.



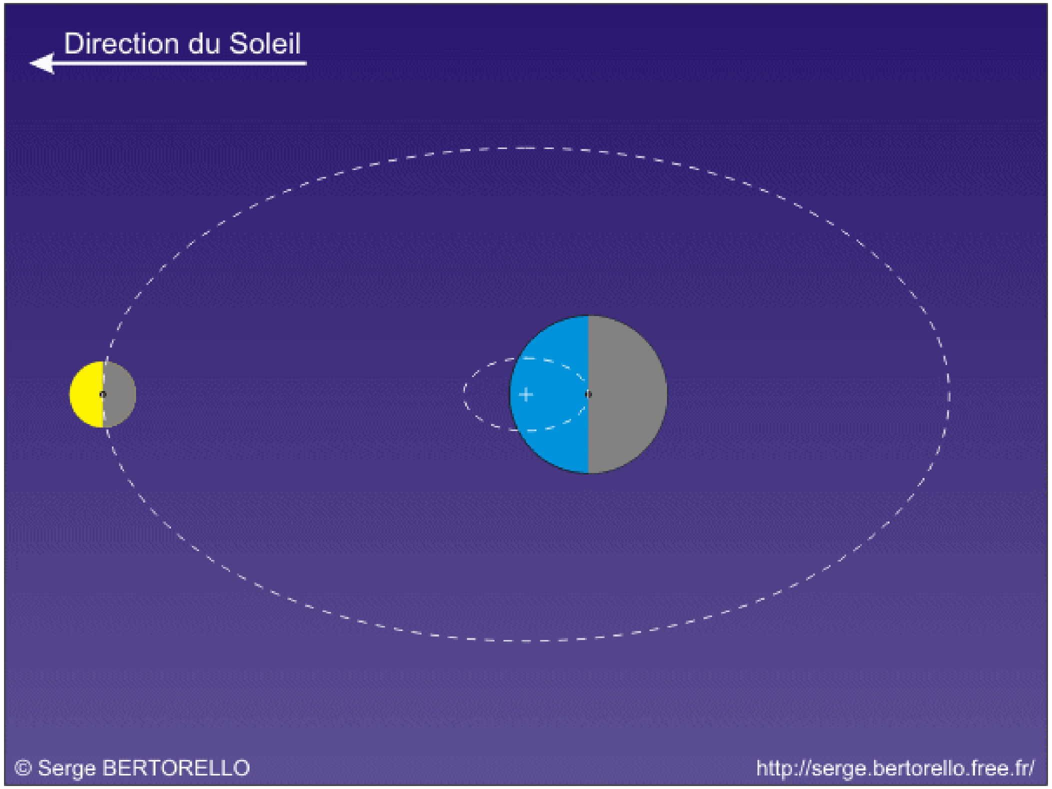
Définition de la force de marée

- Soumis à l'interaction gravitationnelle, les deux corps tournent autour de leur barycentre commun (en 27,32 jours).



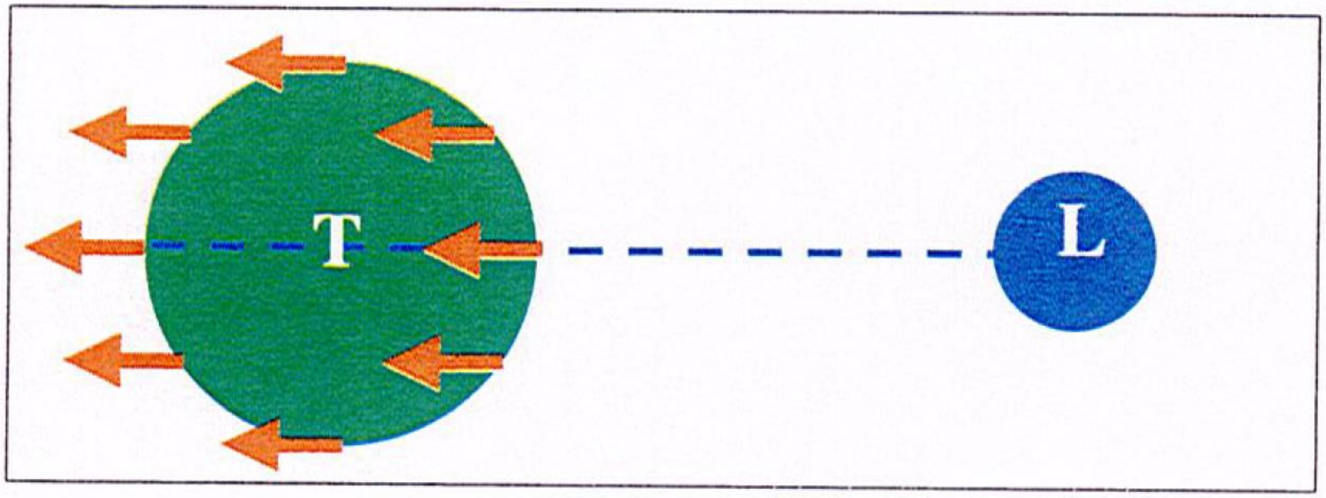
Définition de la force de marée

- Dans le référentiel terrestre, la Terre est donc soumise à une force centrifuge qui équilibre l'attraction lunaire.



Définition de la force de marée

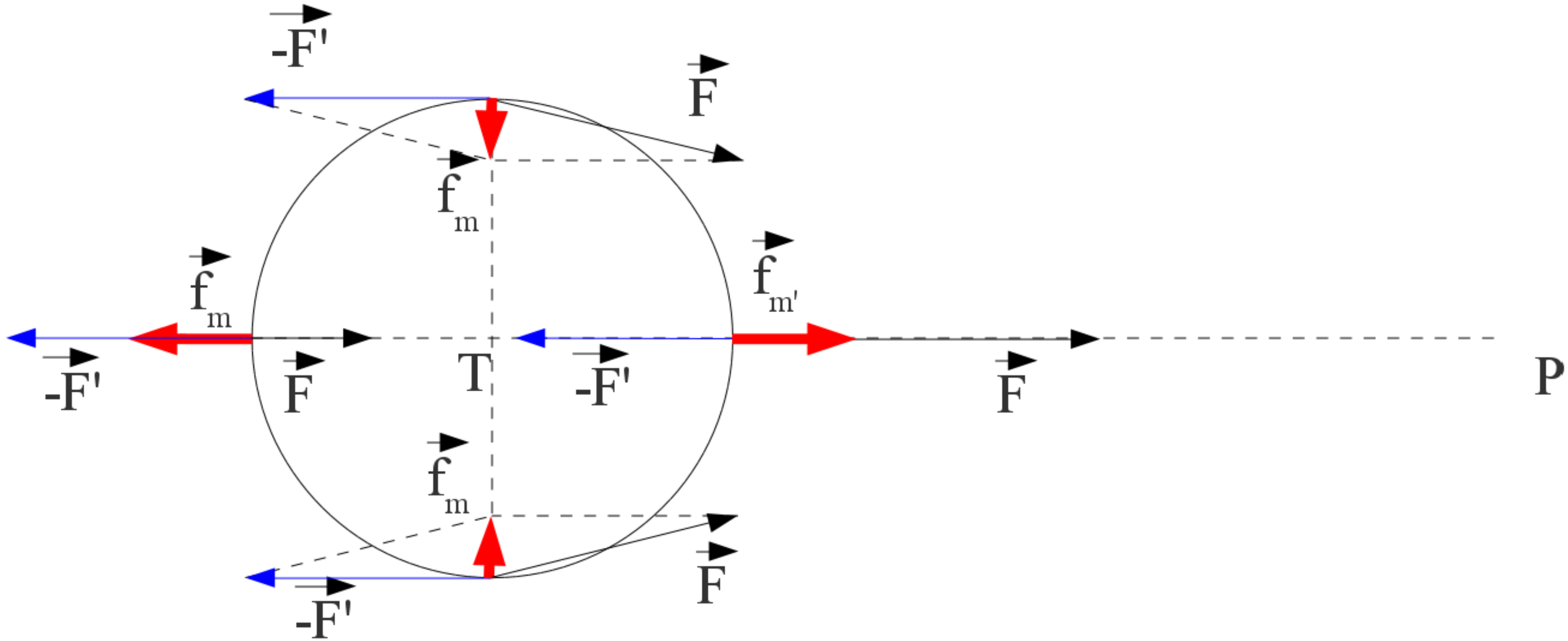
- L’intensité de la force centrifuge est constante sur la Terre, et est égale à la force de gravitation exercée au centre de la Terre.



Définition de la force de marée

- Tout élément de la surface des océans est ainsi soumis à deux forces opposées :
  - ➢ attraction gravitationnelle
  - ➢ force centrifuge
- L’addition de ces deux forces constitue la force génératrice des marées.

Définition de la force de marée

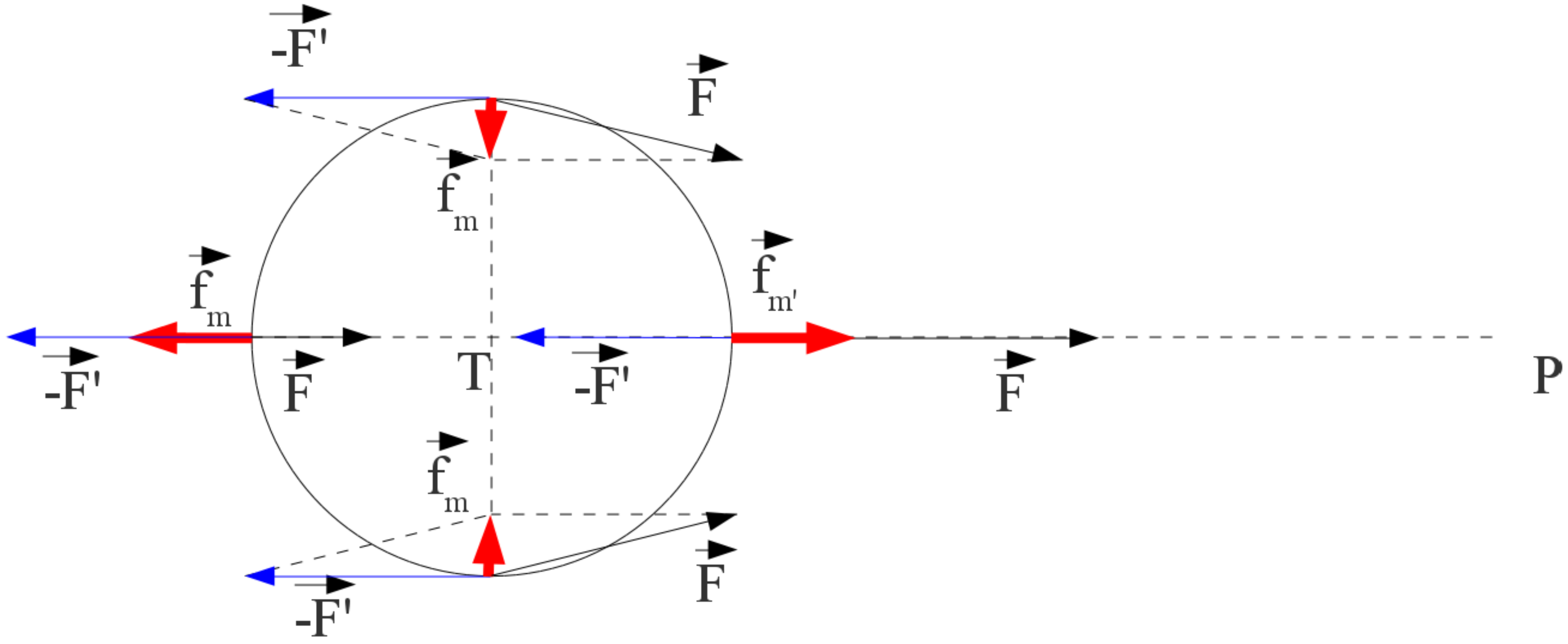


Force de marée $\boldsymbol{f_m} = \boldsymbol{F - F'}$ (vecteur en rouge)

F : attraction d’un astre P au point considéré (en noir)

F’ : attraction de P au centre de la Terre.
Le vecteur ***−F’*** (en bleu) est donc la force centrifuge

Définition de la force de marée

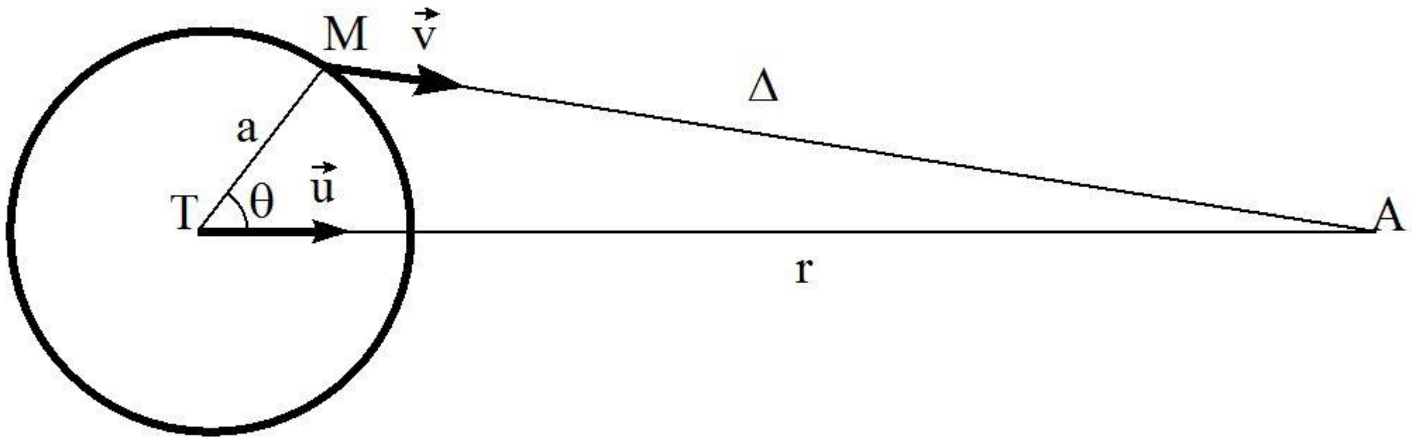


Remarque : sachant que la Terre tourne sur elle-même, on comprend donc aisément d'après cette définition pourquoi on observe deux marées hautes par jour en un lieu donné.

Construction de Proctor

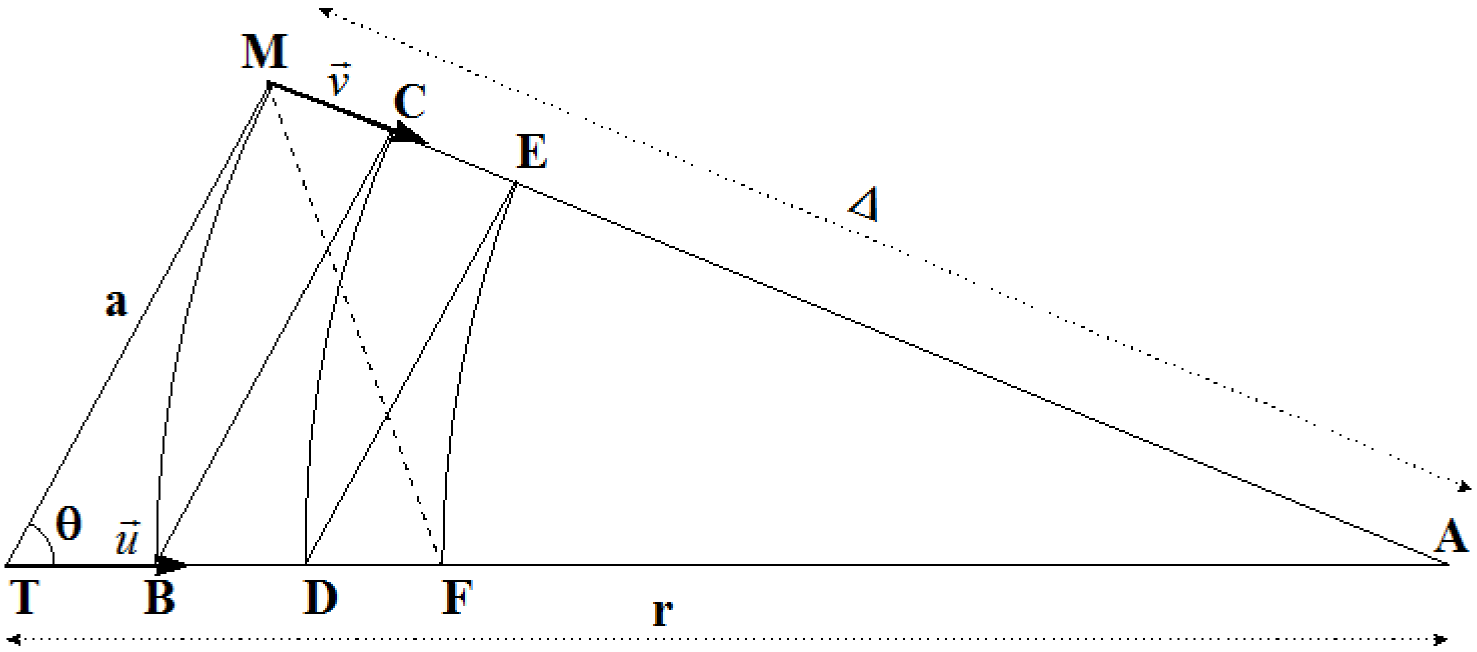
- Force génératrice de la marée exercée au point M (de masse unité) par l'astre A (***v***, ***u*** unitaires) :

$$\boldsymbol{F_m} = GmA\left[\frac{\boldsymbol{v}}{\Delta^2} - \frac{\boldsymbol{u}}{r^2}\right]$$



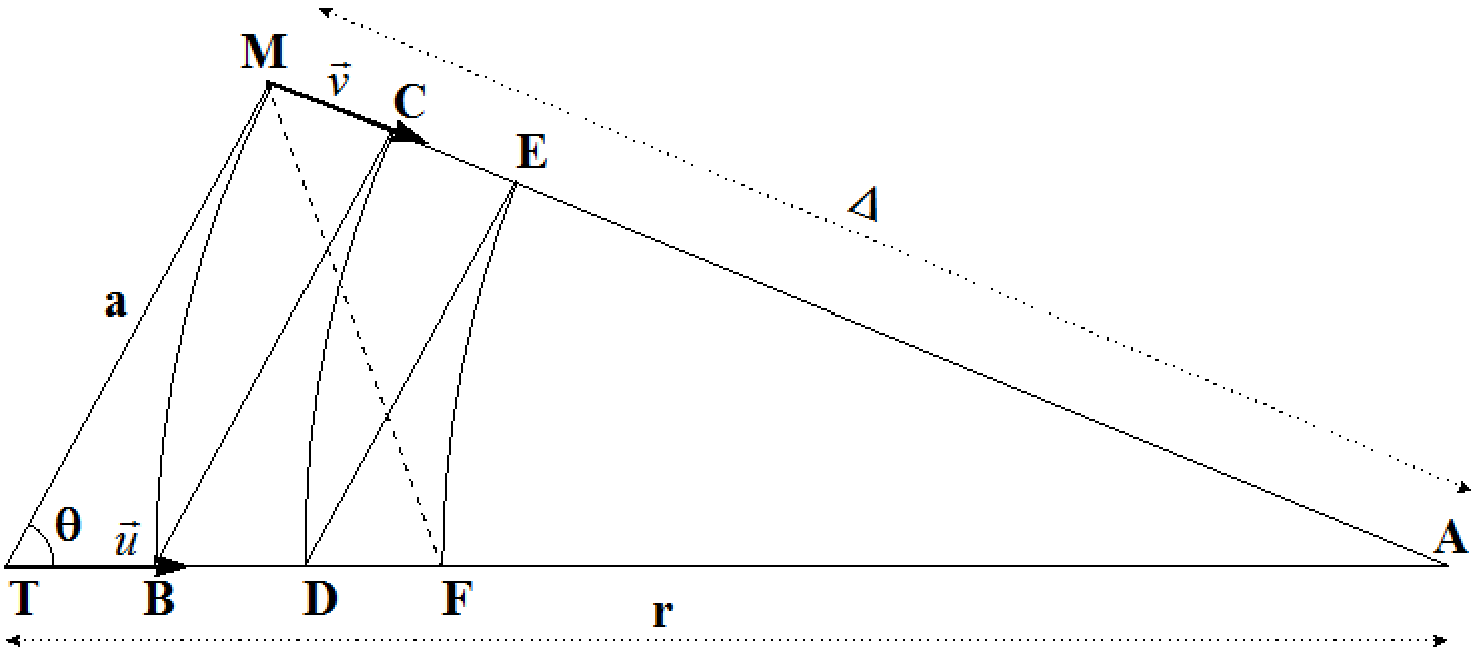
Construction de Proctor

- Construction géométrique permettant d'obtenir une expression simple de la force de marée



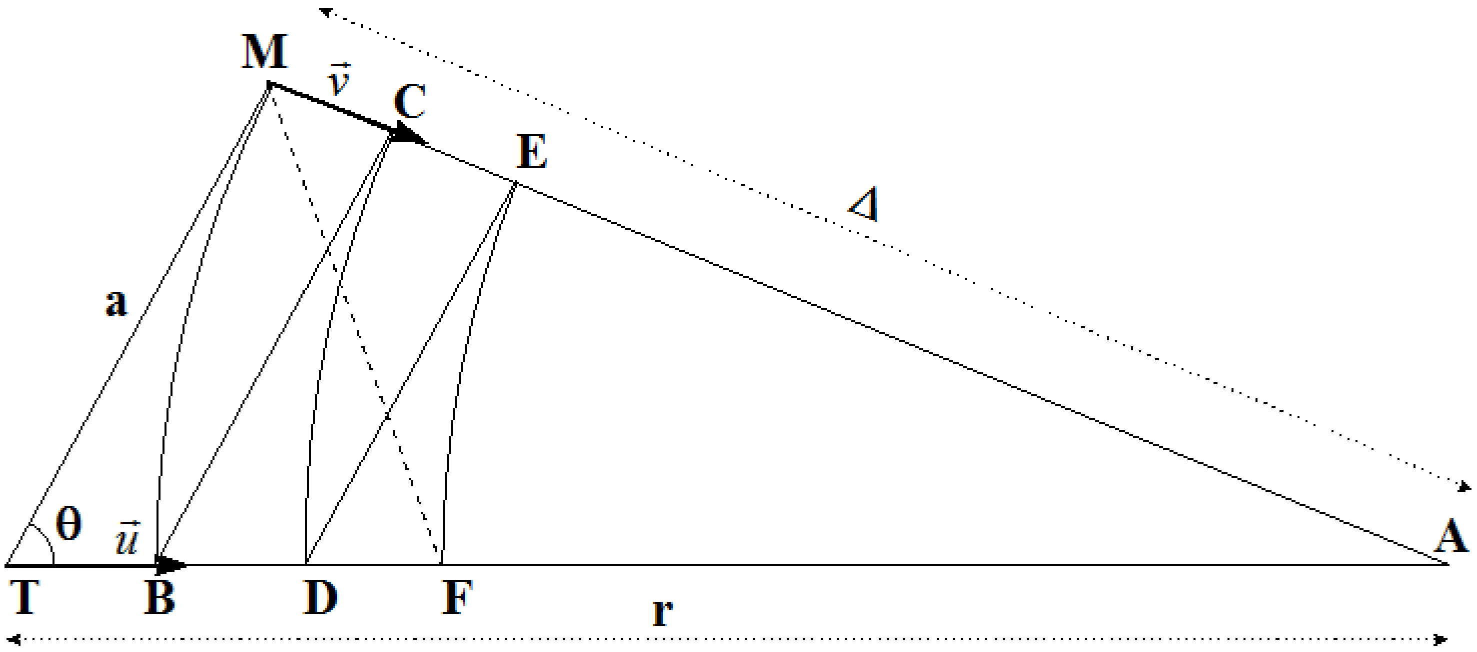
Construction de Proctor

- Plaçons le point B sur le segment TA tel que MB soit l'arc de cercle de centre A et de rayon Δ.



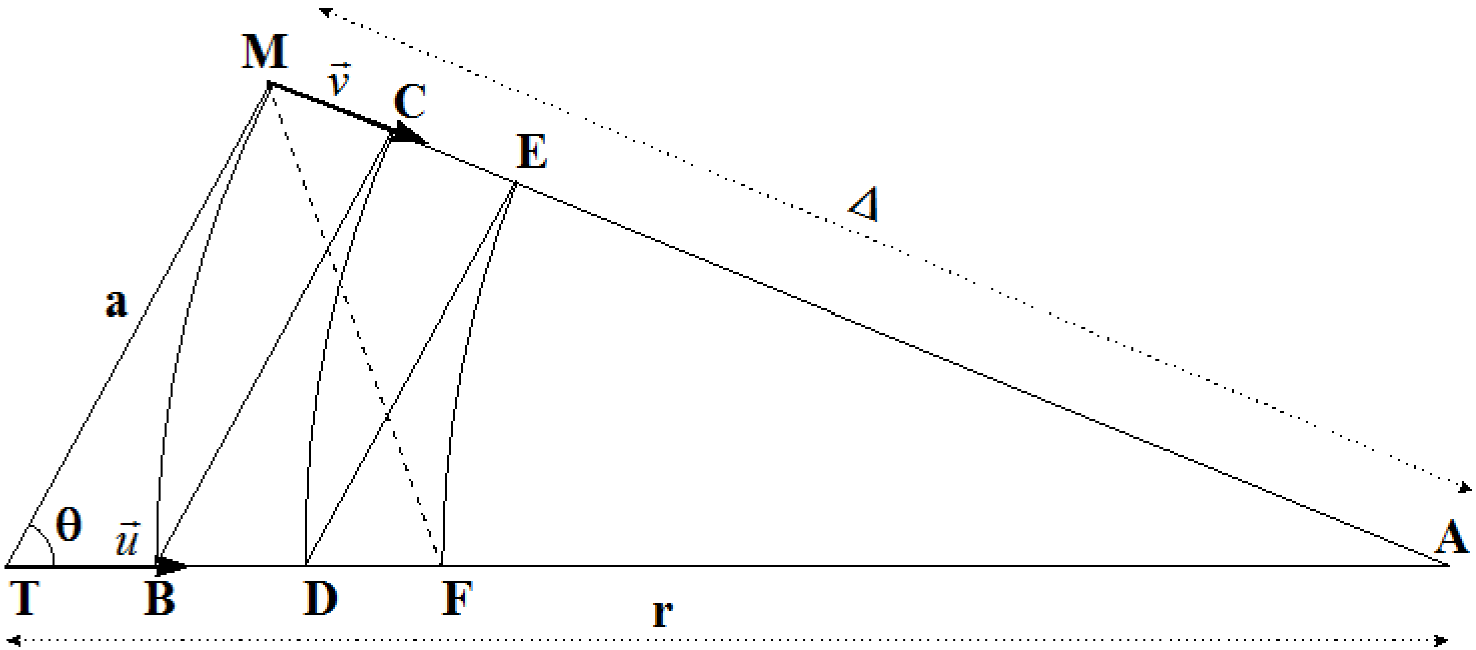
Construction de Proctor

- Plaçons C sur le segment AM tel que BC soit parallèle à TM. D'après le théorème de Thalès appliqué aux triangles ABC et ATM on a : AC=AB.AM / AT = Δ^2 / r



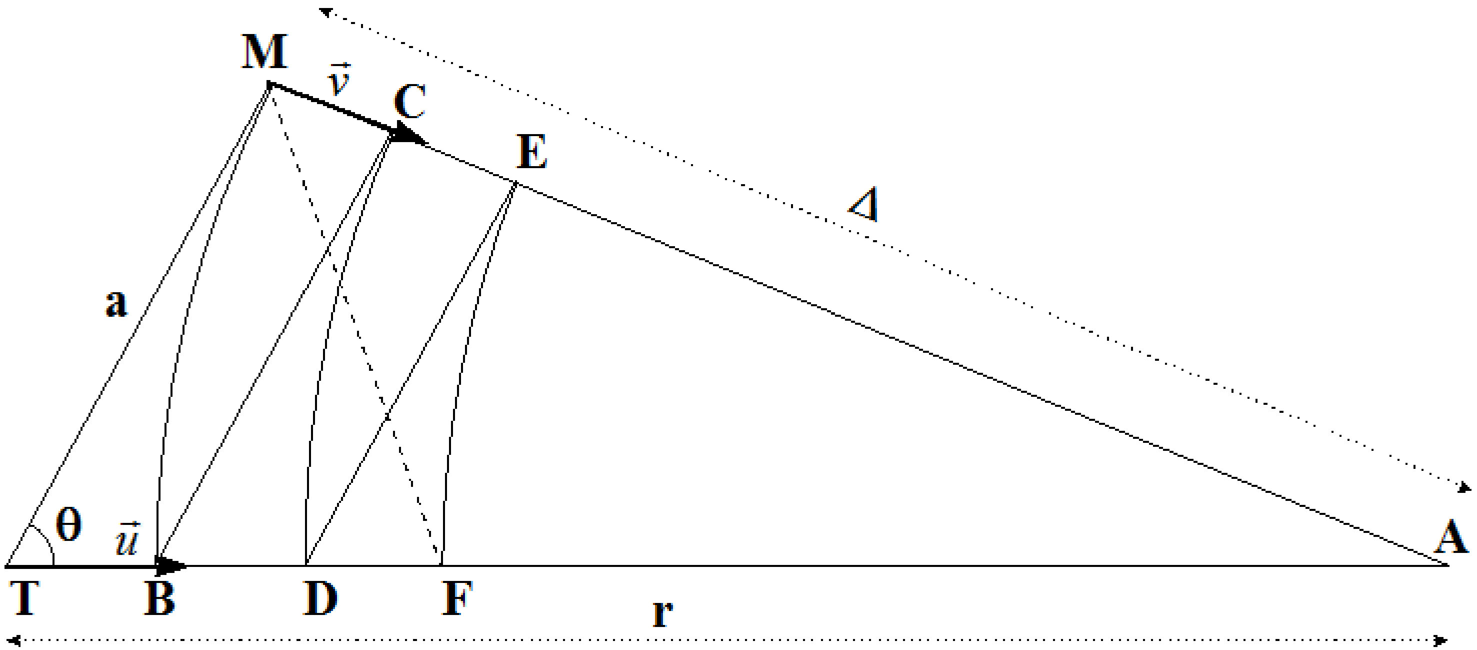
Construction de Proctor

- Plaçons D sur le segment TA tel que AD=AC = Δ^2 / r



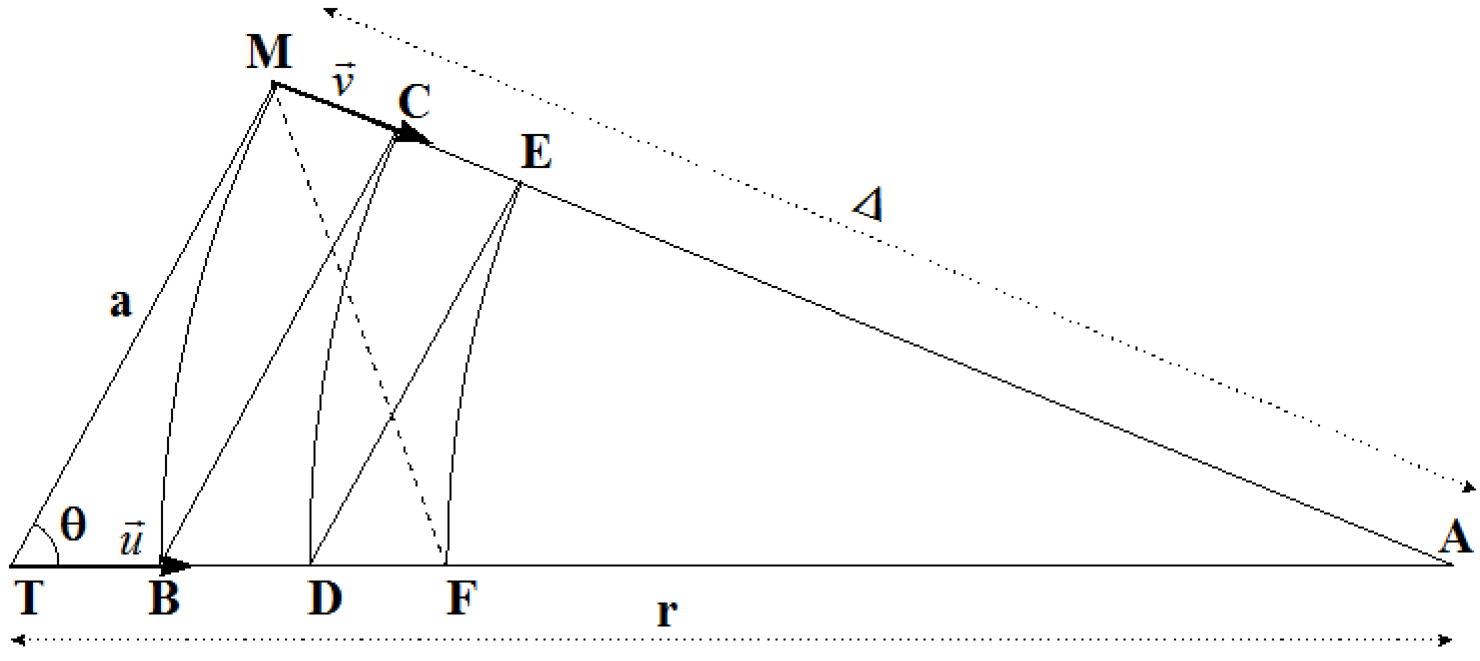
Construction de Proctor

- Plaçons E sur le segment AM tel que DE soit parallèle à TM. D’après le théorème de Thalès appliqué aux triangles ADE et ATM on a : AE=AD.AM / AT = Δ^3 / r^2



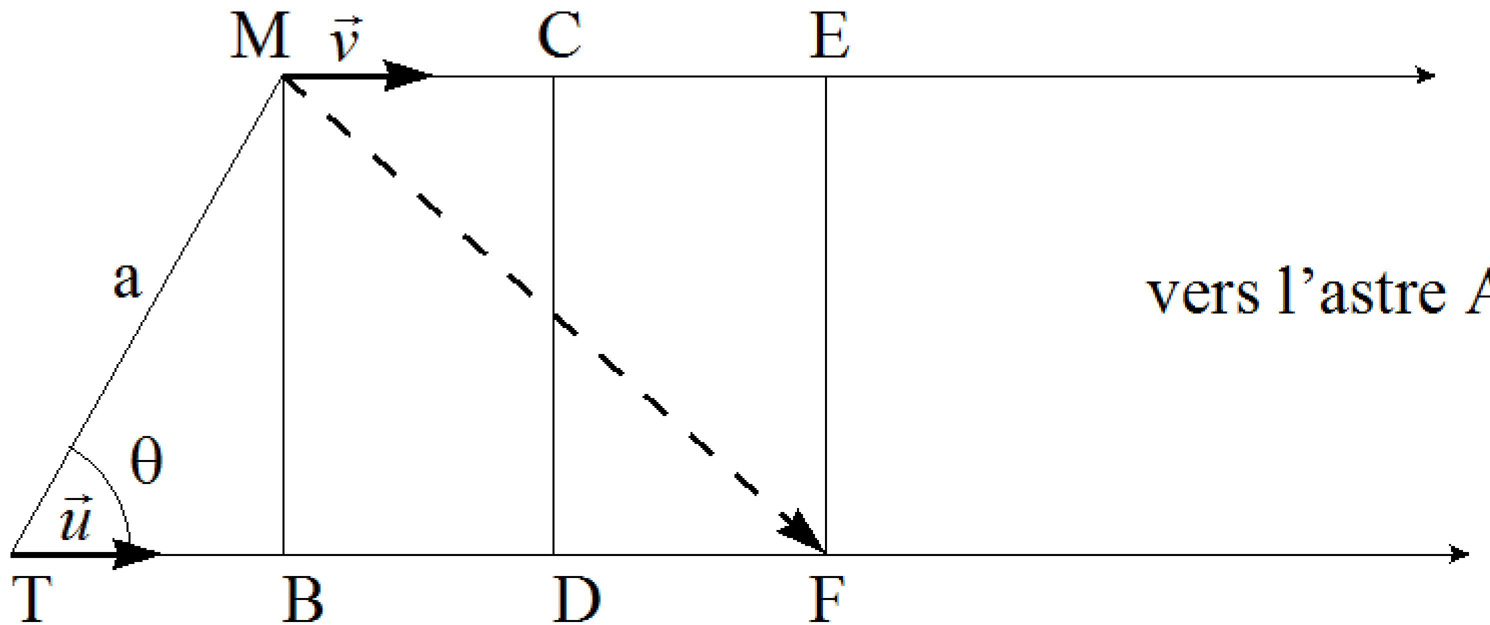
Construction de Proctor

- Plaçons F sur le segment TA tel que AF=AE = Δ^3 / r^2
- Puisque ***MF*=*AF*-*AM***, on en déduit $\boldsymbol{MF} = \Delta^3 \left[\frac{\boldsymbol{v}}{\Delta^2} - \frac{\boldsymbol{u}}{r^2}\right]$
- Donc $\boldsymbol{F_m} = \frac{Gm_A}{\Delta^3}\boldsymbol{MF}$



Construction de Proctor

- En supposant l’astre à l’infini, cette construction se simplifie : les arcs MB, CD et EF deviennent des segments de droite égaux, perpendiculaires à (AT), et le point F est situé à une distance du centre de la terre T égale à trois fois la projection du point M sur la droite joignant T à l’astre.



Construction de Proctor

- $\boldsymbol{F_m} = \frac{Gm_A}{\Delta^3}\boldsymbol{MF}$

- dans le triangle MTF :

$MF^2 = MT^2 + TF^2 - 2\,MT.TF.\cos\theta = a^2(1+3\cos^2\theta)$

- $|\boldsymbol{F_m}| = \frac{Gm_A}{\Delta^3}a\sqrt{1+3cos^2\theta}$

- Avec $g=Gm_T/a^2$ (accélération de la pesanteur), $\Delta \sim r$:

$$|\boldsymbol{F_m}| \sim g\frac{m_A}{m_T}\left(\frac{a}{r}\right)^3\sqrt{1+3cos^2\theta}$$

Comparaison Lune / Soleil

- Lune :

$$\frac{m_L}{m_T}\left(\frac{a}{r_L}\right)^3 = 4{,}63\ 10^{-8}$$

- Soleil :

$$\frac{m_S}{m_T}\left(\frac{a}{r_S}\right)^3 = 2{,}33\ 10^{-8}$$

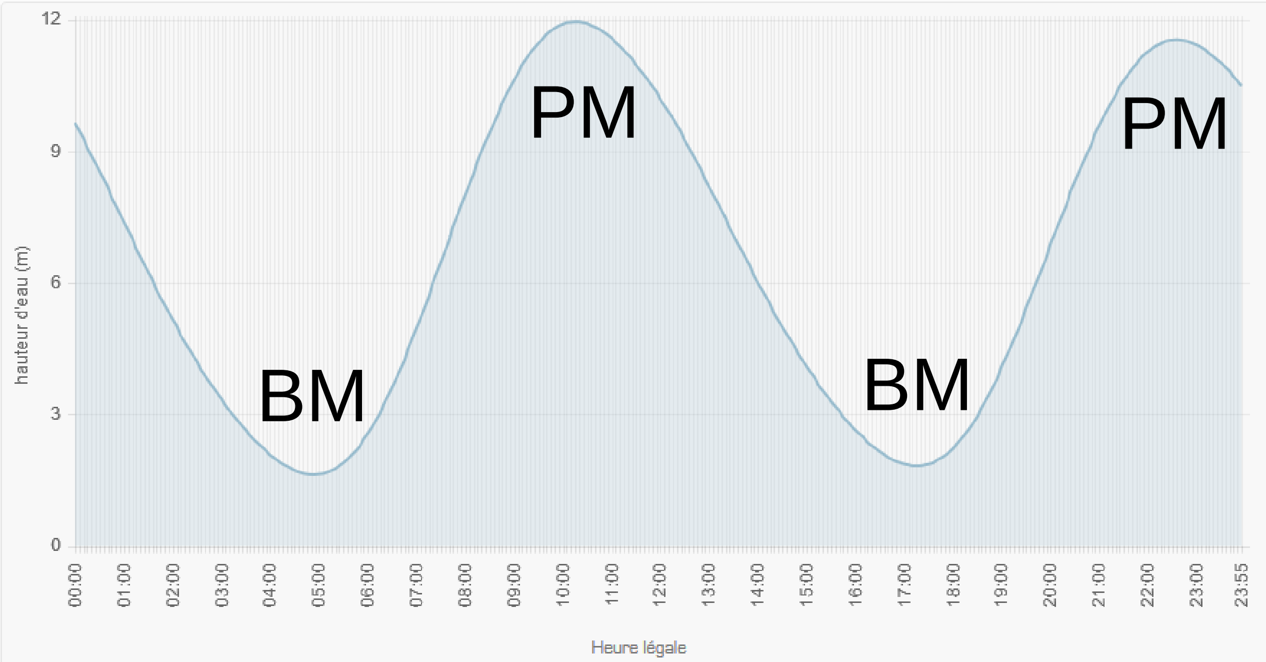
$\Rightarrow$ La force exercée par la Lune est environ deux fois plus importante que celle exercée par le Soleil.

Premier rythme : deux marées par jour = pleines mers et basses mers

- Observation :

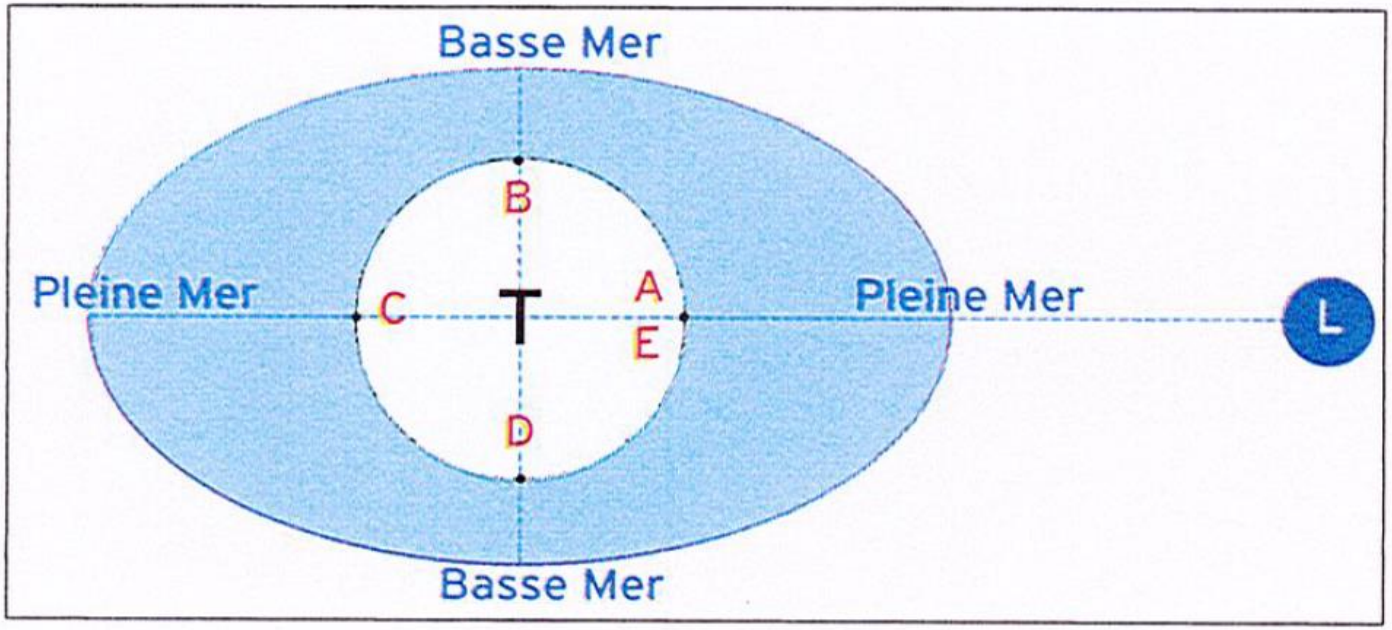
Saint-Malo

Vendredi 3 mars 2017			
	Heure	Hauteur	Coefficient
BM	04:53	1.63	–
PM	10:15	11.96	89
BM	17:14	1.83	–
PM	22:35	11.55	84



Premier rythme : deux marées par jour = pleines mers et basses mers

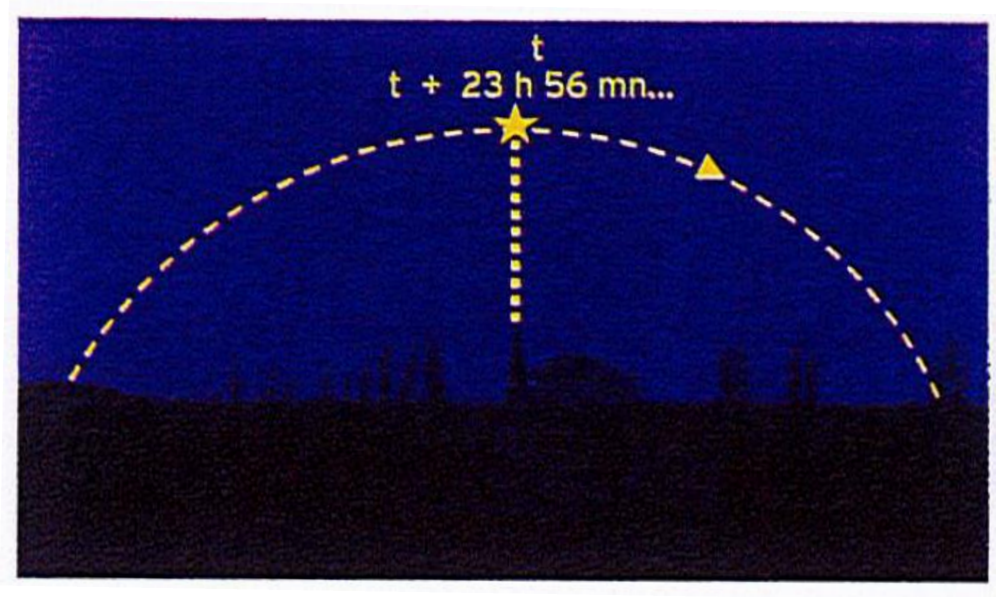
- Explication de la marée *semi-diurne* :

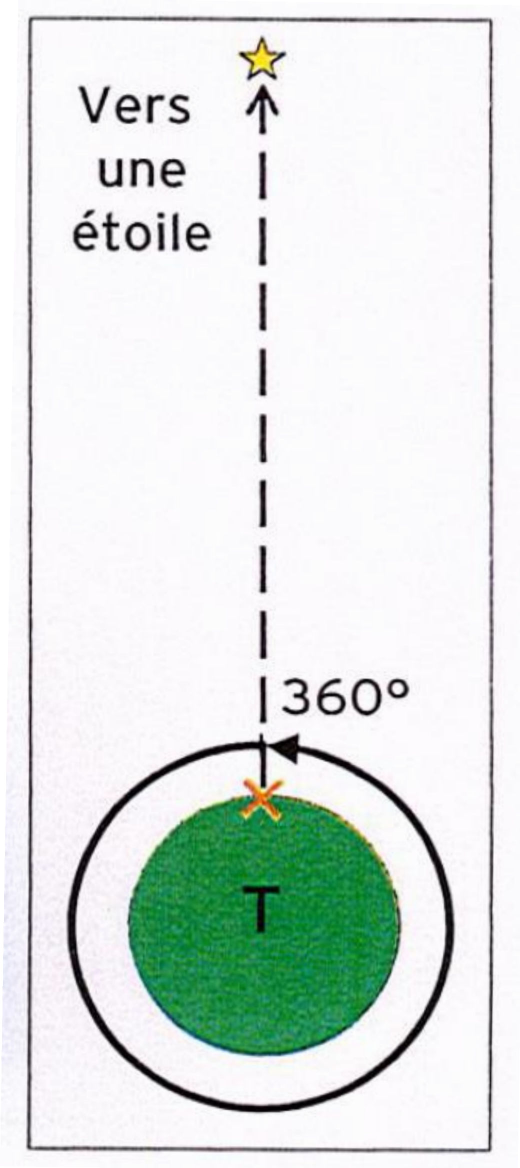


cf. définition de la force de marée …

Premier rythme : deux marées par jour = pleines mers et basses mers

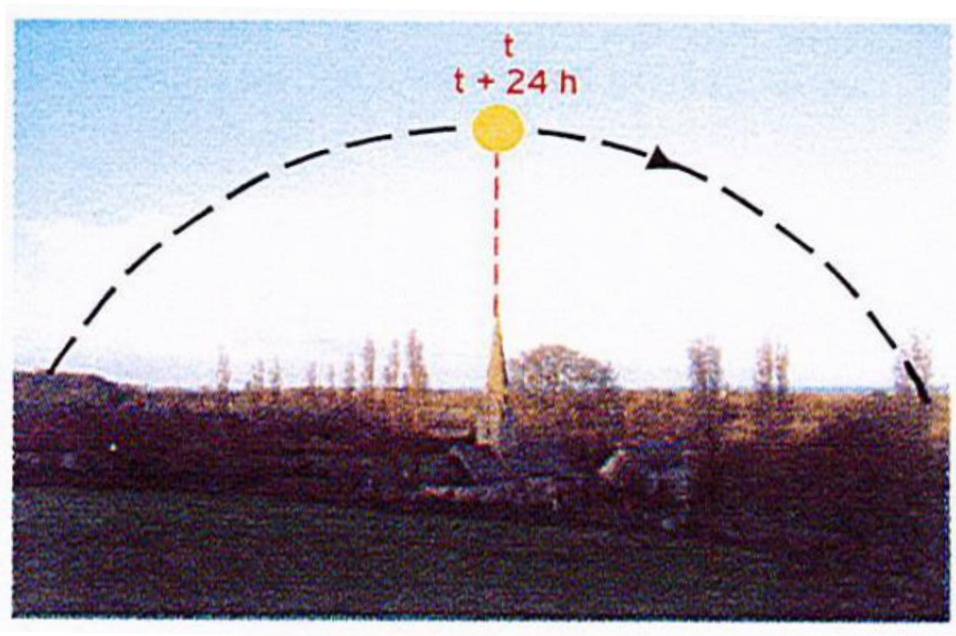
- Jour stellaire :

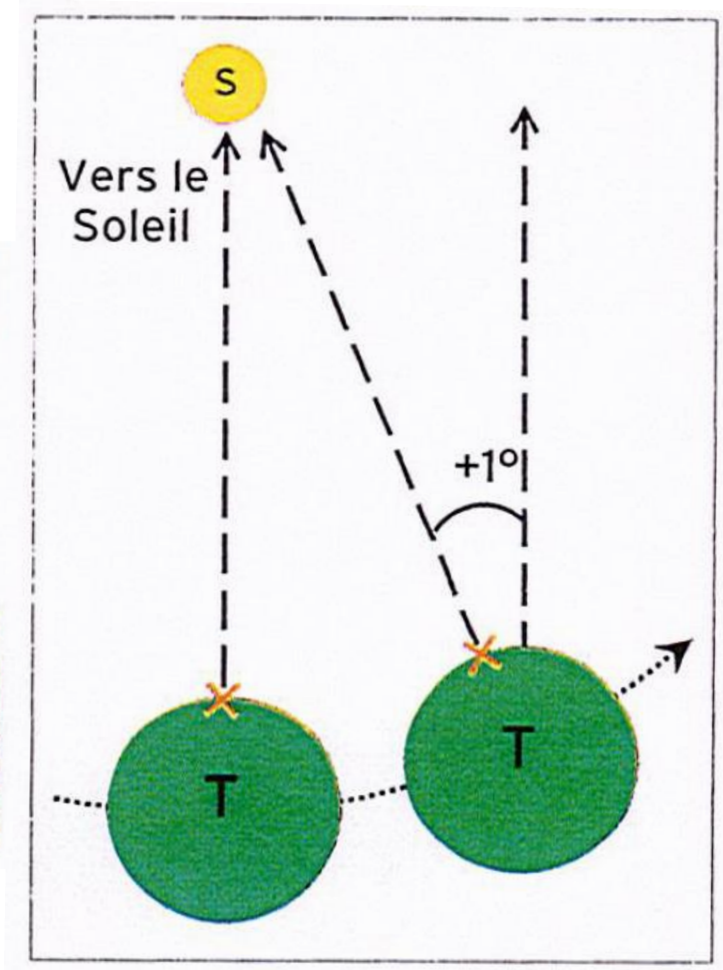




Premier rythme : deux marées par jour = pleines mers et basses mers

- Jour solaire :





⇒ deux marées par jour… solaire

Premier rythme : deux marées par jour = pleines mers et basses mers

- Décalage quotidien : une dérive systématique des heures de marée se produit jour après jour

- Exemple : à Saint-Malo

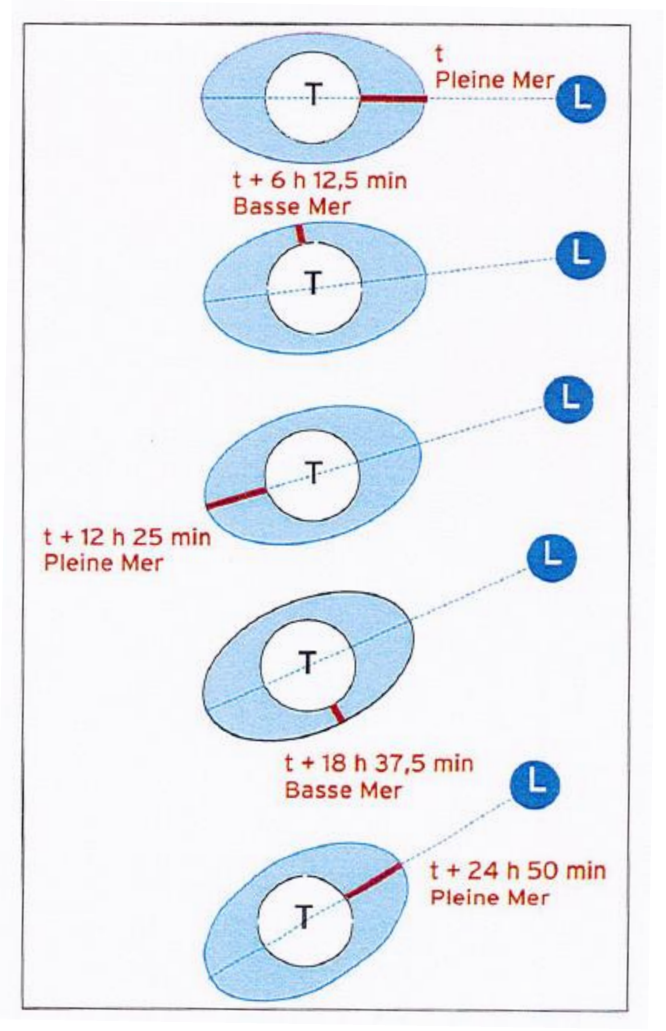
Samedi 4 mars 2017				Dimanche 5 mars 2017			
	Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient
BM	05:30	2.28	–	BM	06:13	3.05	–
PM	10:56	11.19	77	PM	11:44	10.31	63
BM	17:53	2.59	–	BM	18:40	3.39	–
PM	23:17	10.79	70	–	-:-	–	–

→ décalage de +50 min

- Temps moyen entre deux pleines mers :

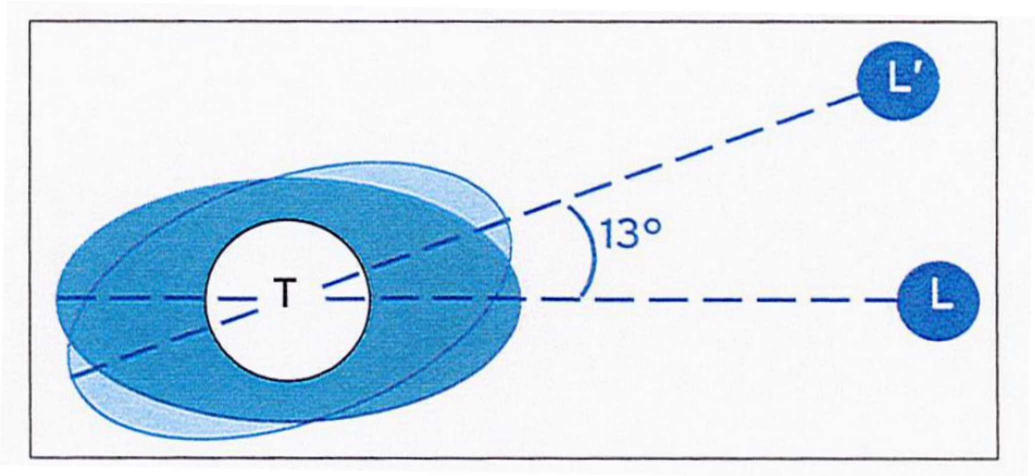
  24 h 50 min / 2 = 12h 25 min

Premier rythme : deux marées par jour = pleines mers et basses mers



- Explication

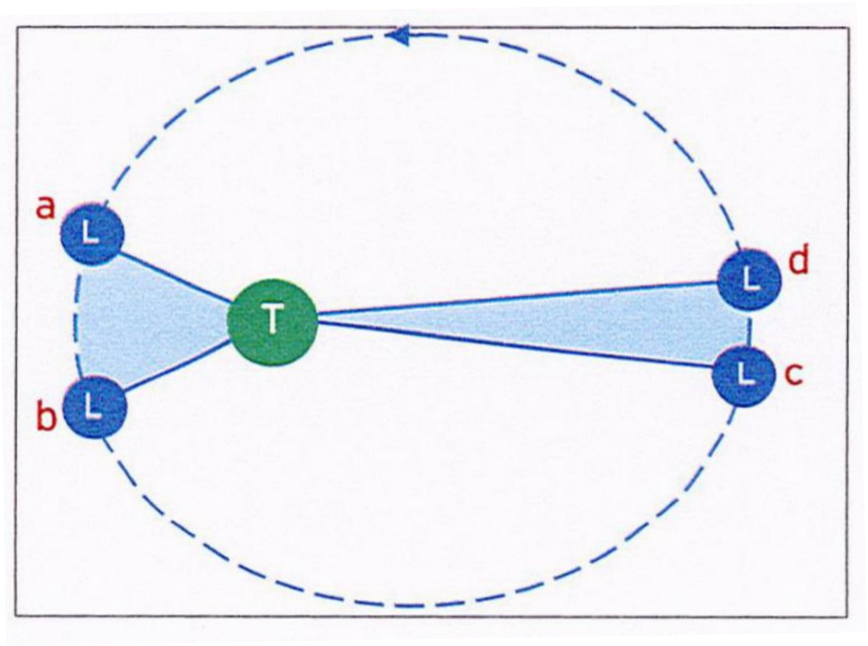
du décalage quotidien :



- La Lune se déplace en moyenne de 13°10’ par jour
- La Terre tourne de 13° sur elle-même en 50 min environ

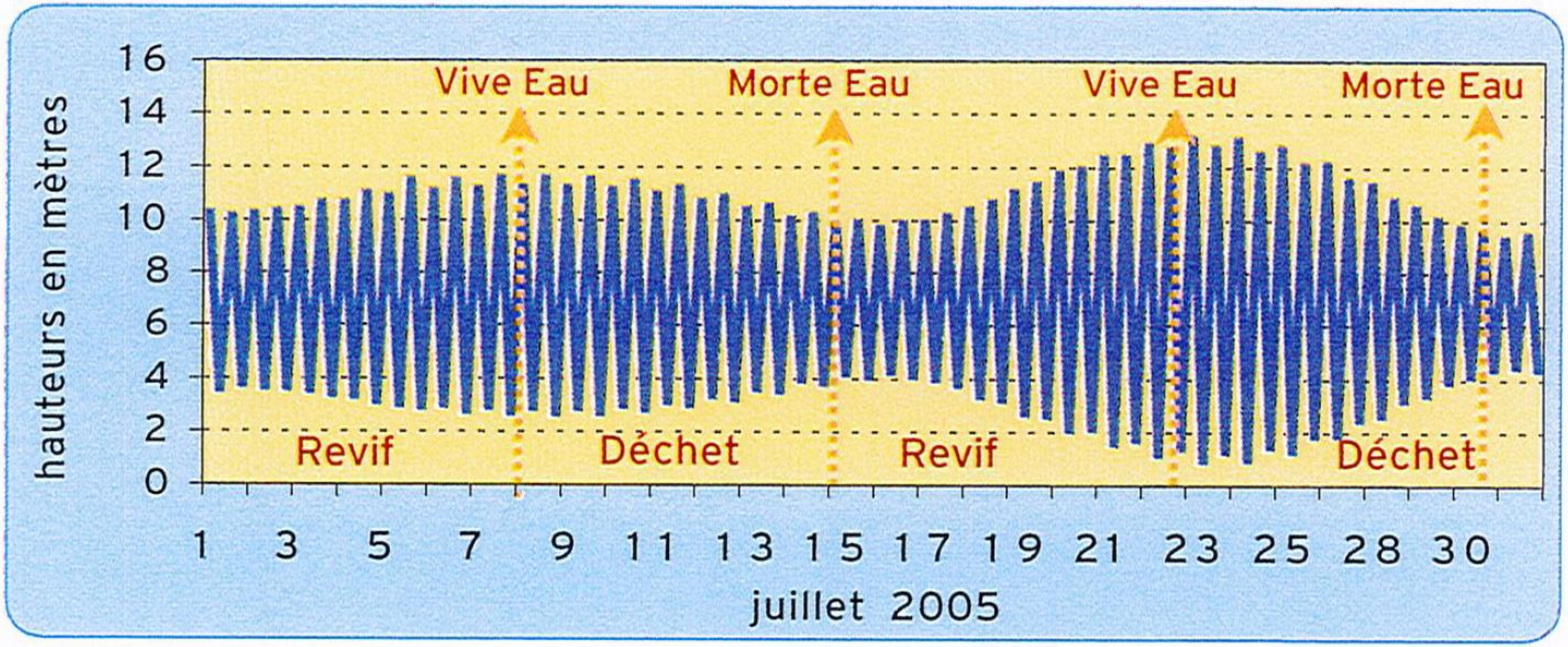
Premier rythme : deux marées par jour = pleines mers et basses mers

- A cause de l'ellipticité de l'orbite de la Lune (cf. loi des aires ci-dessous), l'angle varie entre 10,4° et 15,4°, et le décalage quotidien entre 40 et 60 minutes



Deuxième rythme : deux grandes marées par mois = vives eaux (et mortes eaux)

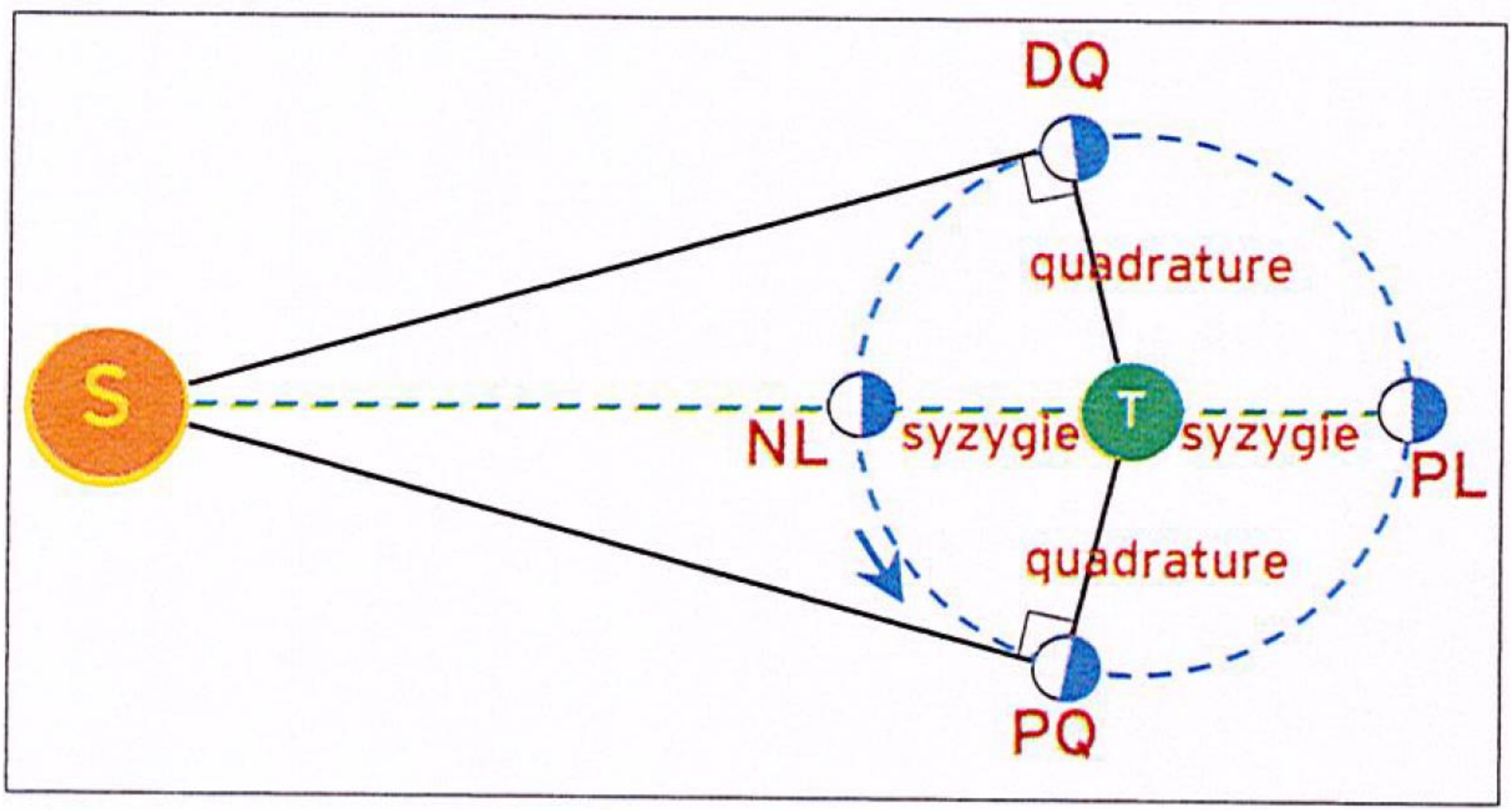
- Observation :



Hauteurs d'eau à Granville en juillet 2005 (d'après les données du logiciel du SHOM).

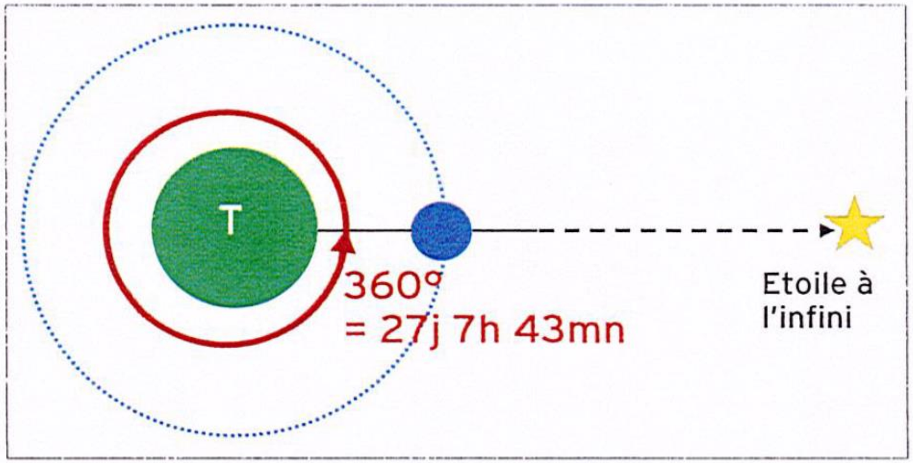
Deuxième rythme : deux grandes marées par mois = vives eaux (et mortes eaux)

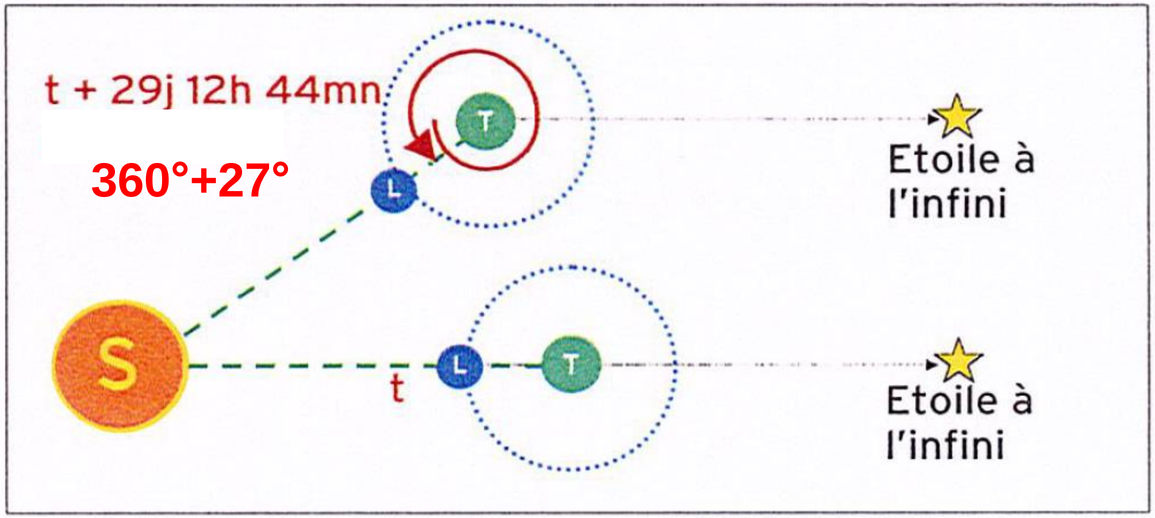
- Phases de la Lune :



Deuxième rythme : deux grandes marées par mois = vives eaux (et mortes eaux)

- Révolution sidérale et synodique de la Lune :





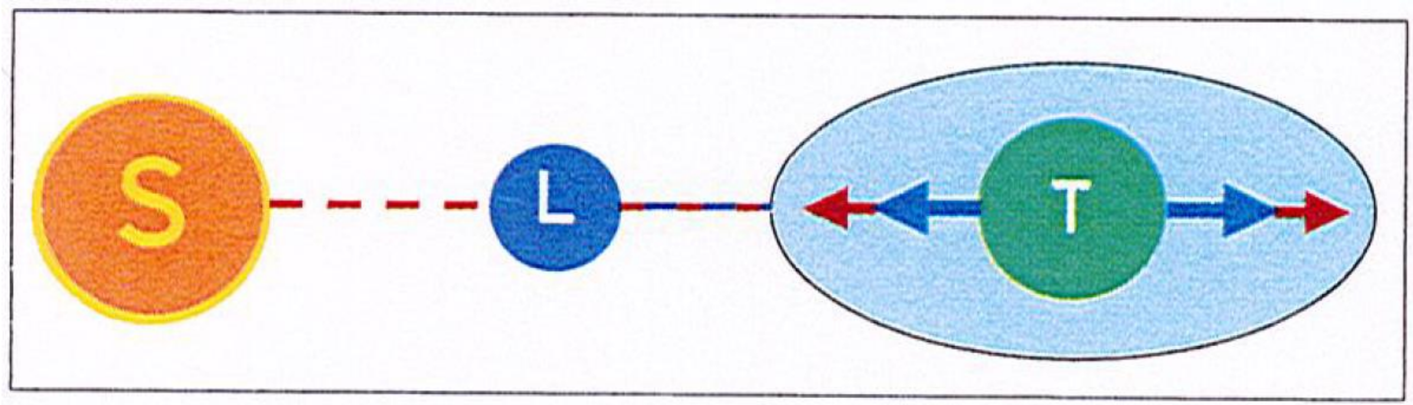
Révolution synodique
= lunaison
= intervalle de temps séparant deux phases identiques
de la Lune

Deuxième rythme : deux grandes marées par mois = vives eaux (et mortes eaux)

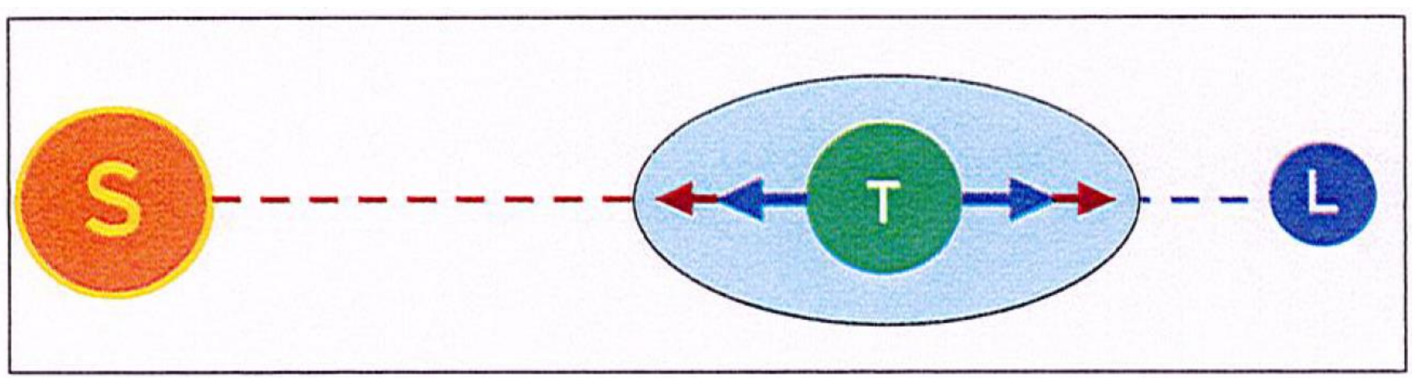
- Explication :

Marées de la Lune et du Soleil (vive eau)

Nouvelle Lune



Pleine Lune

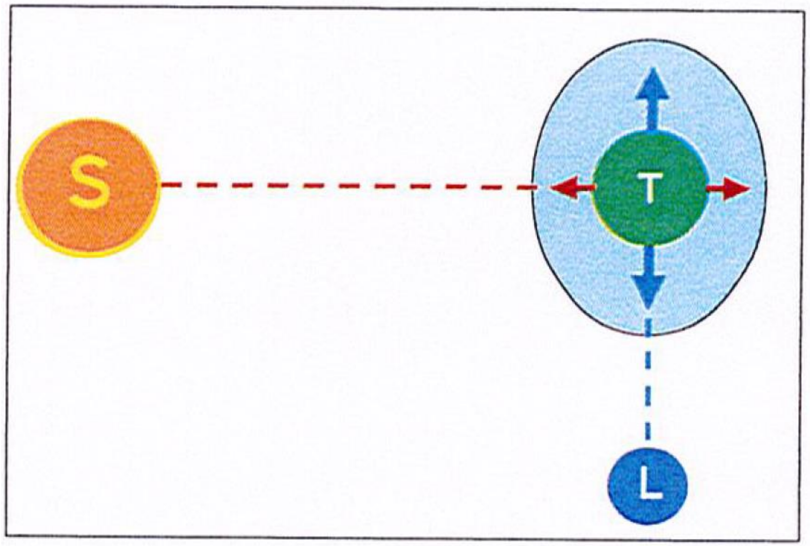


Deuxième rythme : deux grandes marées par mois = vives eaux (et mortes eaux)

- Explication :

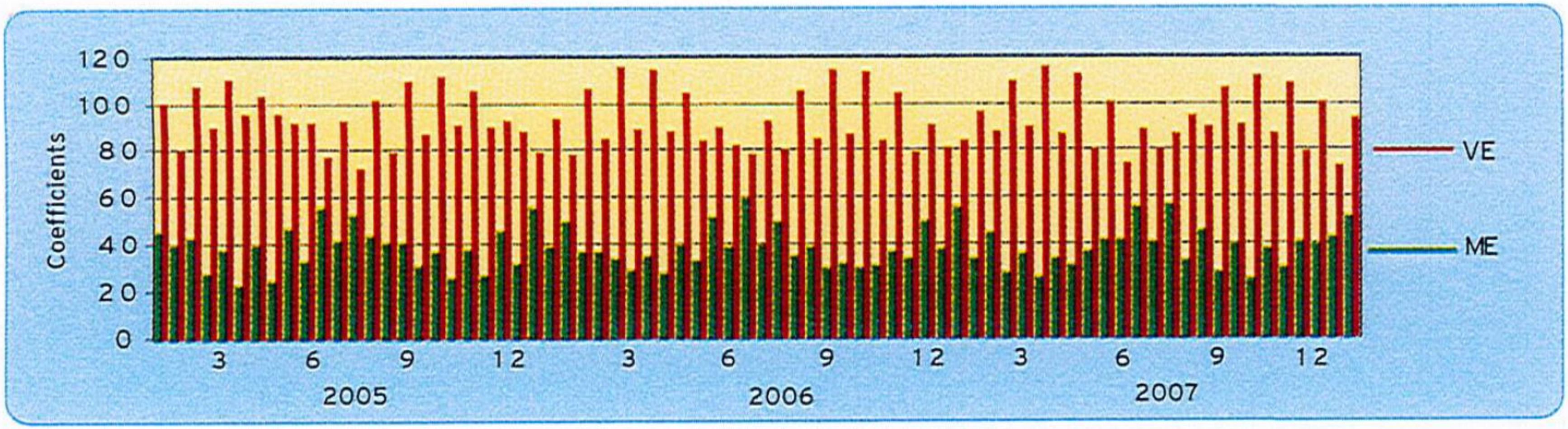
Marées de la Lune et du Soleil (morte eau)

Premier quartier



Troisième rythme : deux très grandes marées par an = marées d'équinoxe

- Observation :



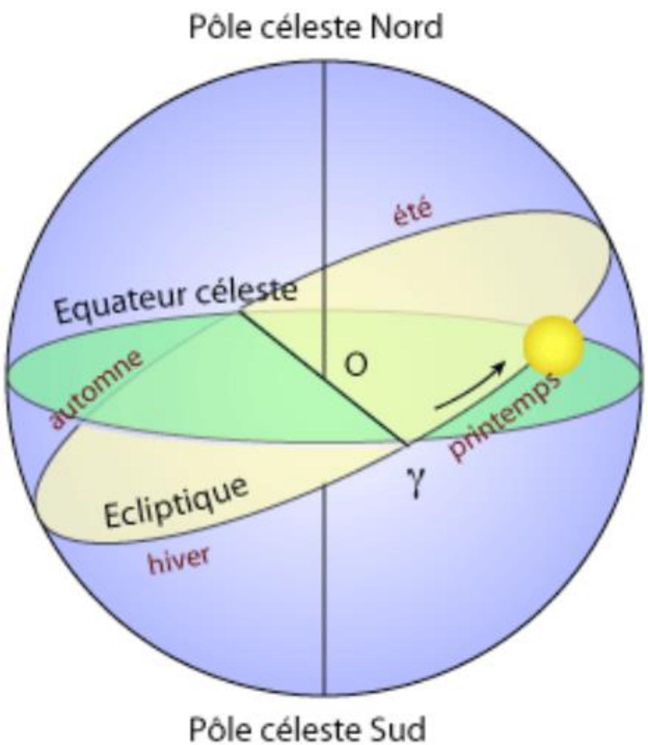
Coefficients de marée de vive eau et de morte eau en 2005, 2006, 2007
(référence Brest, d'après les données du logiciel du SHOM).

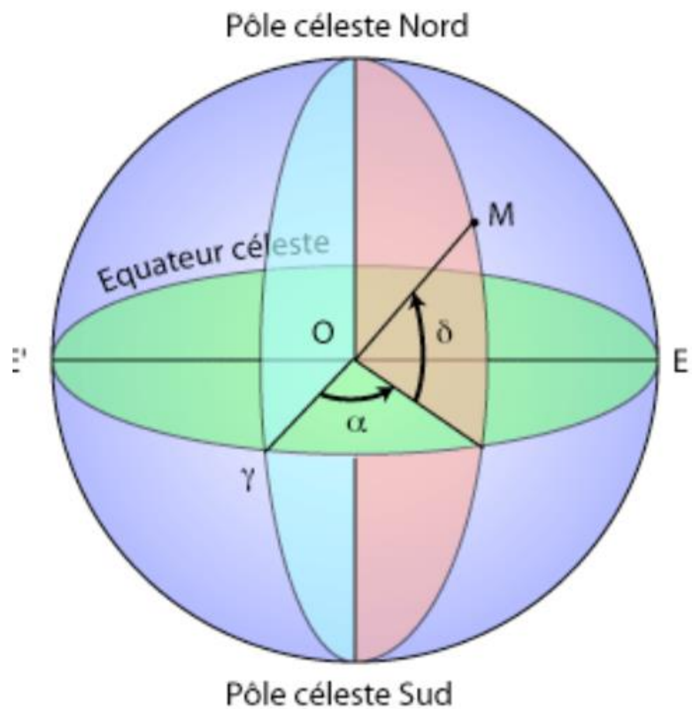
→ Vives (mortes) eaux les plus fortes (faibles) au voisinage de mars et septembre

→ Vives (mortes) eaux les plus faibles (fortes) au voisinage de juin et décembre

Troisième rythme : deux très grandes marées par an = marées d'équinoxe

- Variation de déclinaison du Soleil au cours de l'année





Troisième rythme : deux très grandes marées par an = marées d'équinoxe

- Explication :

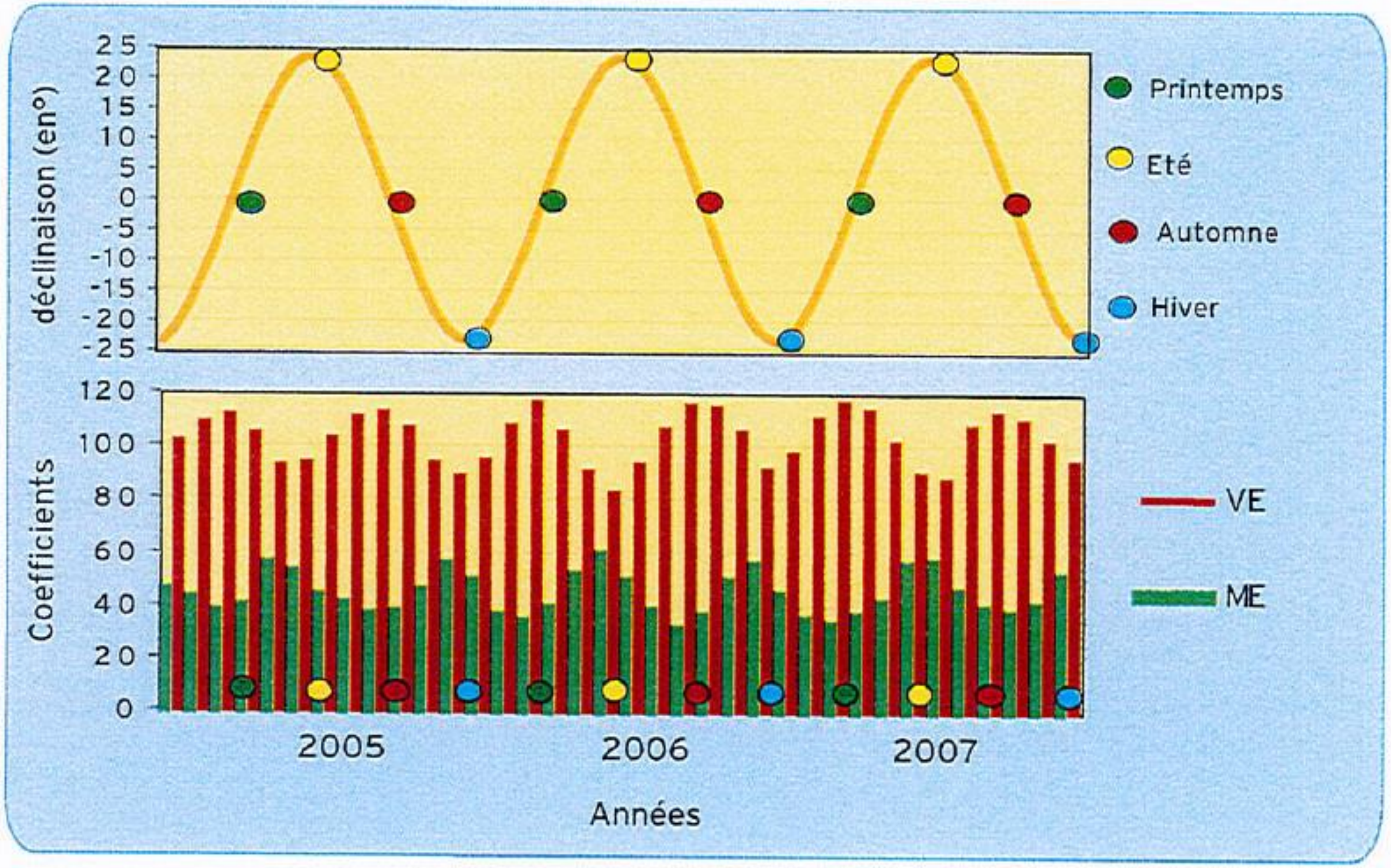
→ Effet du Soleil maximal aux équinoxes (déclinaison nulle)

$\Rightarrow$ augmentation des coefficients de vive eau et diminution des coefficients de morte eau

→ Effet du Soleil minimal aux solstices (déclinaison ± 23°26')

$\Rightarrow$ diminution des coefficients de vive eau et augmentation des coefficients de morte eau

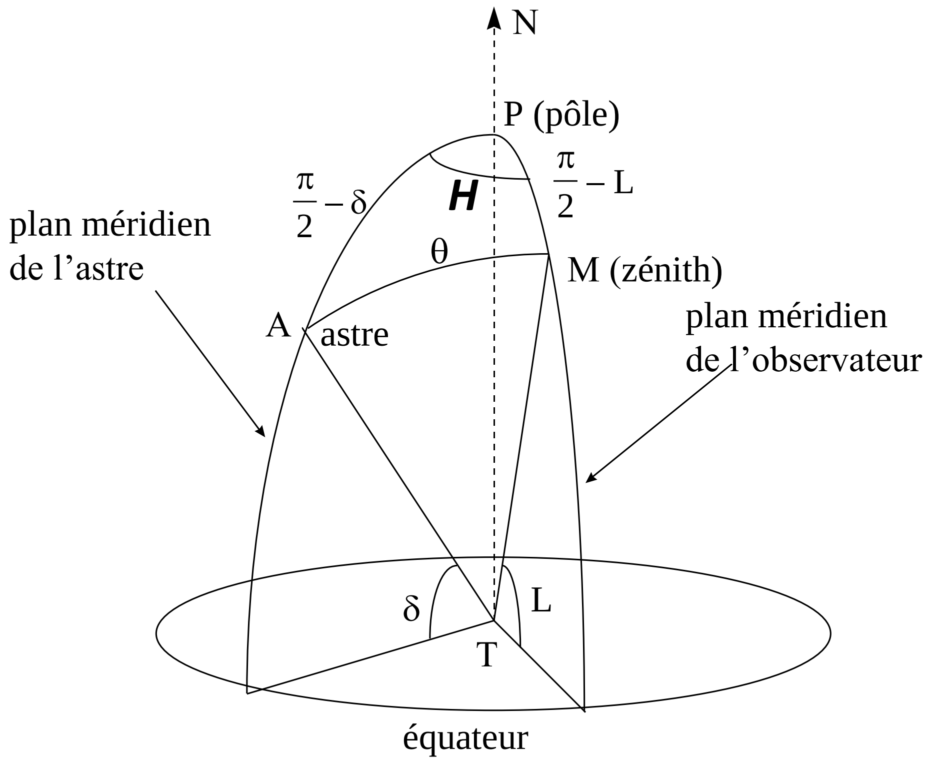
Troisième rythme : deux très grandes marées par an = marées d'équinoxe



Coefficient de marée de vive eau et de morte eau les plus forts chaque mois en 2005, 2006, 2007.
(Référence Brest, d'après les données du logiciel du SHOM)

Pourquoi la force de marée due au Soleil est-elle maximale aux équinoxes?

- $|\mathbf{F}| = g\,\frac{m_A}{m_T}\left(\frac{a}{r}\right)^3\sqrt{1+3\cos^2\theta}$



- $\cos\theta = \sin L \sin\delta + \cos L \cos\delta \cos H$

Pourquoi la force de marée due au Soleil est-elle maximale aux équinoxes?

$$\cos^2\theta = \sin^2 L \sin^2\delta$$

$$+\cos^2 L \cos^2\delta \cos^2 H$$

$$+2\sin L \sin\delta \cos L \cos\delta \cos H$$

$$\cos^2\theta = \sin^2 L \sin^2\delta + \frac{1}{2}\cos^2 L \cos^2\delta \qquad \textbf{(1)}$$

$$+\frac{1}{2}\cos^2 L \cos^2\delta \cos 2H \qquad \textbf{(2)}$$

$$+\frac{1}{2}\sin 2L \sin 2\delta \cos H \qquad \textbf{(3)}$$

Pourquoi la force de marée due au Soleil est-elle maximale aux équinoxes?

(1), (2), (3) termes à longue période, semi-diurne, diurne, respectivement

Le terme semi-diurne est d'amplitude maximale pour un observateur situé à l'équateur ($\cos^2 L = 1$) et au moment du passage de l'astre à l'équateur ($\cos^2 \delta = 1$)

La force centrifuge est constante sur Terre

- On considère un satellite de masse m_S (la Lune) en orbite circulaire de rayon r autour d'une planète de masse m_P (la Terre).

- L'intensité de la force gravitationnelle agissant sur les deux masses (ici considérées ponctuelles) est

$$F = G \frac{m_P m_S}{r^2} .$$

La force centrifuge est constante sur Terre

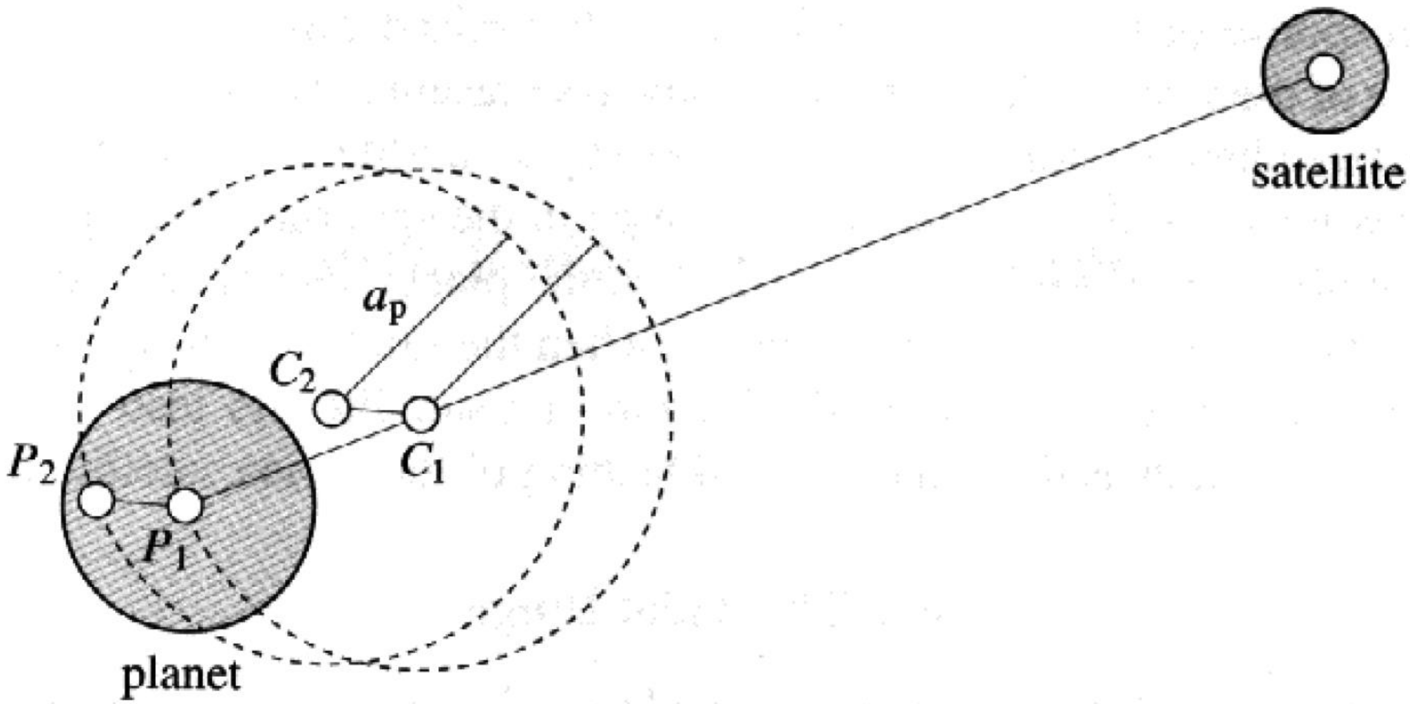
- Dans un tel mouvement, les deux corps sont en fait en orbite circulaire par rapport à leur centre de masse commun, avec des rayons orbitaux r_S et r_P tels que :

$$\frac{r_S}{r_P} = \frac{m_P}{m_S},$$

$$r_S + r_P = r.$$

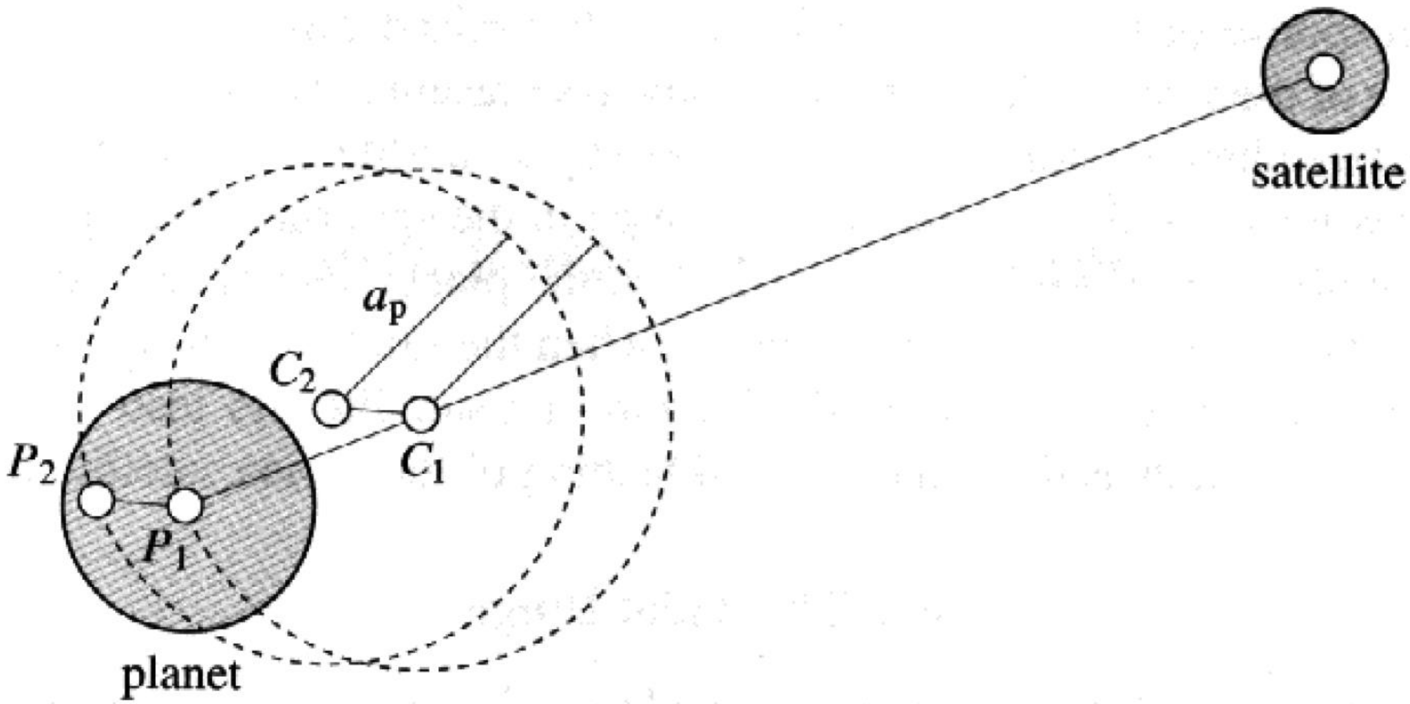
- Ainsi le centre de la Terre décrit en 27.32 jours (période orbitale de la Lune) un petit cercle de 4652 km de rayon autour du barycentre Terre-Lune.

La force centrifuge est constante sur Terre



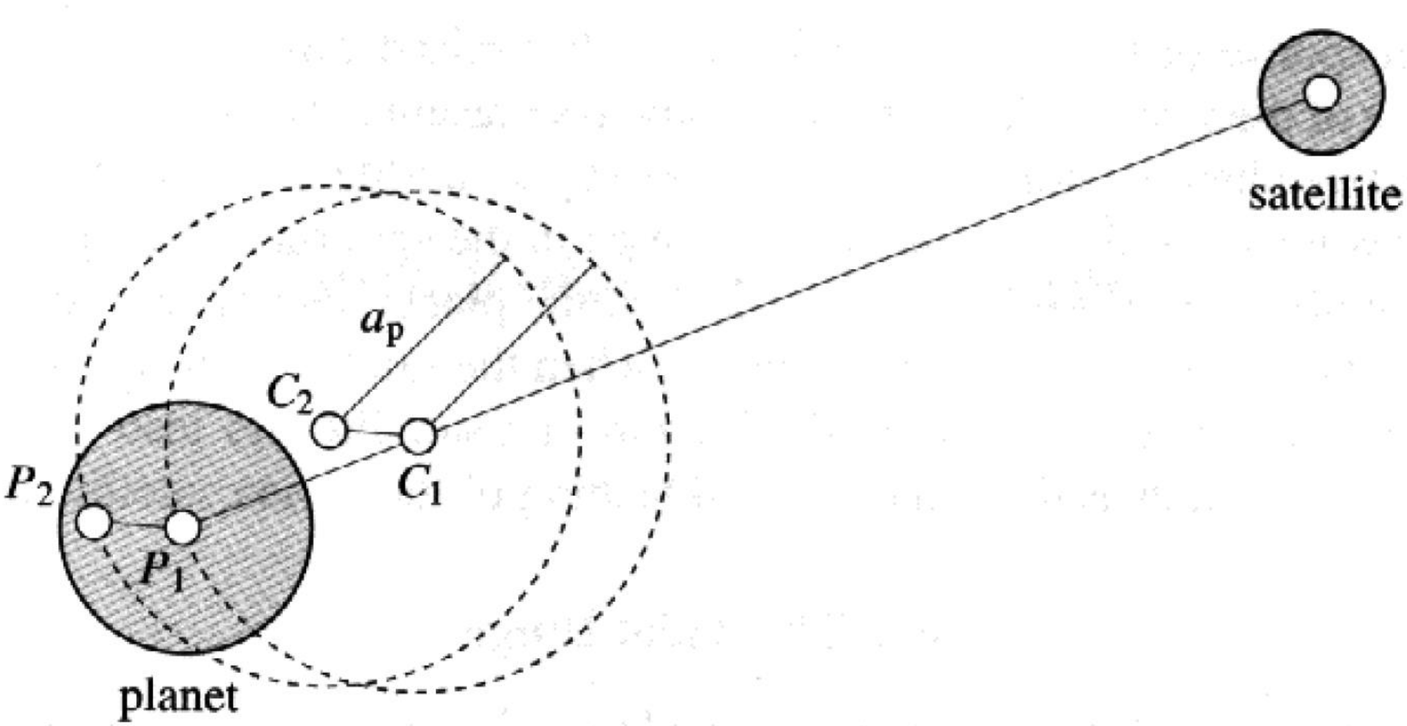
- D’après la figure, le mouvement du centre de la Terre (P_1) par rapport au centre de masse du système Terre-Lune (C_1) est donc un cercle de rayon r_P.

La force centrifuge est constante sur Terre



- En négligeant la rotation de la planète sur elle-même, le mouvement de tout autre point P_2 de la Terre est alors un cercle de même rayon mais de centre C_2 différent, déplacé par rapport à C_1 de manière identique à l'écart entre P_2 et P_1.

La force centrifuge est constante sur Terre



- Donc tous les points de la Terre sont soumis à la même force centrifuge (égale en intensité à la force de gravitation moyenne F), mais à des forces de gravitation différentes.