

Année universitaire 2018/2019

Mémoire de Master 2

LES MARÉES

M. Guillaume PAGES

Avant propos :

Ce mémoire a été rédigé dans le cadre de la validation du master 2 « Préparation à l'agrégation de physique ». Il a pour but d'expliquer le phénomène des marées à un public d'étudiants de niveau licence. Certains développements mathématiques sont donc volontairement passés sous silence.

Table des matières

Introduction	1
I. La force de marée	2
1.1 Description du phénomène.....	2
1.2 Force de marée.....	2
II . Types de marées	4
2.1 Le cycle semi-diurne.....	4
2.2 Le cycle de vives-eaux mortes-eaux.....	5
III . Du modèle statique au modèle dynamique	6
3.1 Le modèle statique.....	6
3.2 Mise en défaut du modèle statique.....	7
Conclusion	9
Ressources documentaires	9

Table des figures

<i>1.1</i>	<i>Système Terre-Lune et les « bourrelets » de la terre.....</i>	<i>2</i>
<i>1.2</i>	<i>Représentation géométrique du système Terre-Astre.....</i>	<i>2</i>
<i>2.1</i>	<i>Rotation de la Terre sur elle même et de la Lune autour de la Terre.....</i>	<i>4</i>
<i>2.2</i>	<i>Marée semi-diurne non symétrique.....</i>	<i>5</i>
<i>2.3</i>	<i>Vives-eaux et mortes-eaux.....</i>	<i>5</i>
<i>2.4</i>	<i>Différents types de marées dans le monde.....</i>	<i>6</i>

Introduction

C'est au cours de l'Antiquité que les premières descriptions semblent avoir été menées mais le phénomène des marées était probablement connu depuis beaucoup plus longtemps par les habitants des côtes. Ainsi, Hérodote (5^e siècle av. J.-C) aurait remarqué ce phénomène dans la mer rouge au cours de l'un de ses voyages. Les Grecs auraient également noté les courants capricieux de certains détroits méditerranéens. Au 4^e siècle av. J.-C, Pythéas a proposé un lien entre la position de la Lune et le phénomène des marées.

Les observations les plus précises sont effectuées par Posidonios au 1^{er} siècle av. J.C. à Cadix. Il évalue correctement le décalage entre le passage de la Lune et le soulèvement des eaux.

De nombreuses observations et interprétations ont ensuite suivi. Au 9^e siècle, l'astronome perse Albumasar décrit de façon détaillée les corrélations entre marée et Lune. Il faut attribuer, aux médecins et astrologues du 16^e siècle, l'idée de décomposer la marée totale en deux marées de même nature, l'une produite par la lune, l'autre par le soleil.

Au 17^e siècle, Kepler adopte le concept d'une force d'attraction de la Lune, de nature magnétique, qui engendrerait le phénomène des marées mais c'est finalement avec la théorie de la gravitation de Newton (17^e siècle) que l'on comprit que la Lune exerçait une influence gravitationnelle sur les océans.

De nos jours, le terme marée fait référence à la déformation d'un corps constitué d'un matériau déformable sous l'action des forces de marées. Sur terre, cet effet, dû à l'influence gravitationnelle de la Lune et du Soleil, se manifeste par une variation locale du niveau des océans. Il affecte aussi les parties solides de la Terre (on parle de marée terrestre).

L'exposé présentera la force de marée, moteur du phénomène des marées puis décrira les différents types de marées océaniques. En dernier lieu, le lien entre les forces de marées et les marées océaniques sera développé.

I. La force de marée

1.1 Description du phénomène

Le phénomène de marée est dû aux forces gravitationnelles exercées par la Lune et le Soleil sur l'océan. Ces forces déforment la surface des océans pour créer deux bourrelets. La figure suivante permet de comprendre l'existence non pas d'un seul mais de deux bourrelets.

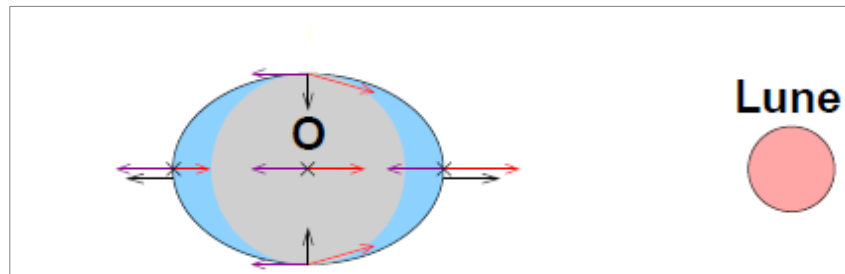


Figure 1.1- Système Terre-Lune et les « bourrelets » de la terre

La partie bleue correspond aux océans. L'interaction gravitationnelle avec la Lune est représentée par une flèche rouge, la force centrifuge associée à la rotation de la Terre autour du barycentre du système Terre-Lune par une flèche violette et la force de marée résultante par une flèche noire.

On constate d'ores et déjà que la force de marée associée à l'interaction avec la Lune dépend de la position sur le globe terrestre

1.2 Force de marée

On cherche dans un premier temps à exprimer la force de marée sur un point matériel de masse m , situé au point M à la surface de la Terre, soumis uniquement aux interactions gravitationnelles avec la Terre d'une part et avec un autre astre d'autre part, de masse M (la Lune ou le Soleil par exemple) supposé sphérique et dont le centre est situé au point A. (figure 1.2)

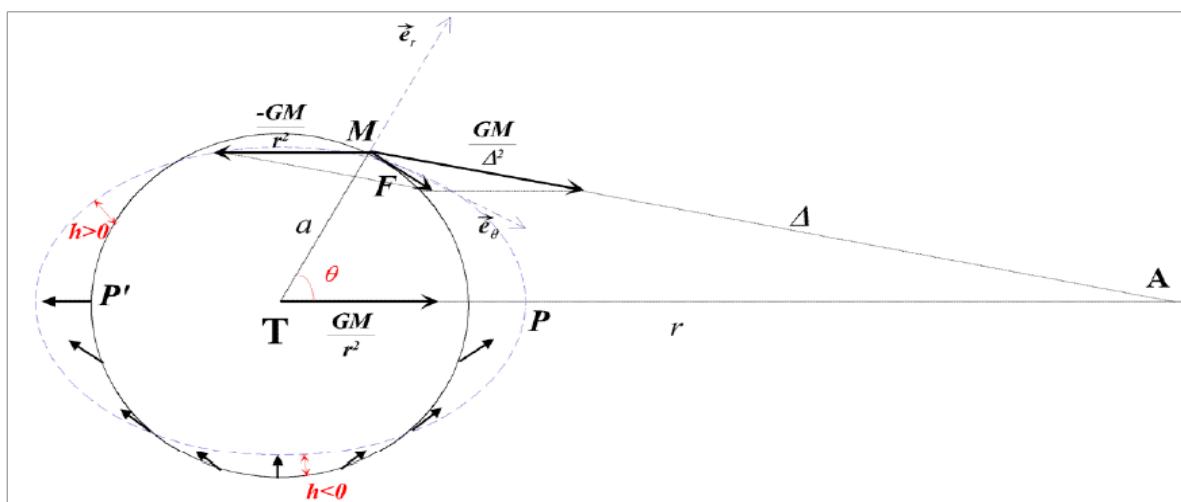


Figure 1.2- Représentation géométrique du système Terre-Astre

Pour cela, on se place dans le référentiel géocentrique non galiléen noté R mais en translation par rapport à un référentiel supposé galiléen (par exemple le référentiel de Copernic si l'astre est le soleil) et on applique la deuxième loi de Newton pour le point matériel considéré :

$$m \cdot \overrightarrow{a_{M/R}} = \overrightarrow{F_1} + \overrightarrow{F_{ie}}$$

Avec : $\overrightarrow{F_1}$ Résultante des forces « réelles » exercées par la Terre et l'astre en M

$\overrightarrow{F_{ie}}$ Force centrifuge associée à la translation de la Terre autour du barycentre Terre-Astre

A partir de la seconde loi de Newton et en considérant la Terre également sphérique, on peut montrer que la force de marée subie par le point M s'exprime comme la différence d'attraction gravitationnelle entre le centre de la Terre T et le point considéré M vis à vis du point A :

$$\overrightarrow{F} = m \left(\frac{GM}{\Delta^2} \overrightarrow{u_{MA}} - \frac{GM}{r^2} \overrightarrow{u_{TA}} \right)$$

Puis en effectuant les simplifications qui s'imposent car $r \gg a$, on obtient en projetant sur les axes du point M considéré :

$$\overrightarrow{F} = mg \frac{m_a}{m_T} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \left((3 \cos^2 \theta - 1) \overrightarrow{e_r} + \frac{3}{2} \sin 2\theta \overrightarrow{e_\theta} \right) \text{ et donc } \|\overrightarrow{F}\| = mg \frac{m_a}{m_T} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}$$

Avec :

- m	Masse du volume d'eau étudié
- a	Rayon terrestre 6378 km
- r	Distance de la Terre à l'astre attracteur
- m_a	Masse de l'astre attracteur
- m_T	Masse de la Terre
- θ	Latitude du point considéré
- g	Accélération de la pesanteur

Le champ de force de marée exercé par l'astre sur la Terre tend à déformer la matière en l'étirant de part et d'autre du plan orthogonal en T à la direction TA. Quelques forces de marées sont représentées figure 1.2 en plusieurs points de la surface de la Terre.

Nous n'avons pour le moment représenté qu'un seul astre interagissant avec la Terre. Les deux astres susceptibles d'interagir avec la Terre sont, le Soleil du fait de sa masse très élevée (elle représente plus de 99 % de la masse du système solaire) et la Lune du fait de sa « faible » distance par rapport à la Terre. Évaluons l'importance relative de chacune de ces deux forces de marées.

Valeurs numériques :

	Distance moyenne (millions de km)	Masse (Terre = 1)	Rayon équatorial
Lune	0.3844	0.0123	1738 km
Soleil	149.6	332946	696000 km
Terre	-	1	6378 km

Un calcul rapide permet de constater que la force de marée provenant du Soleil représente environ 46 % de celle issue de la Lune. La masse du Soleil est largement prépondérante, mais comme cette force varie en $1/r^3$ et que la distance Terre-Soleil est largement supérieure à celle Terre-Lune, c'est la Lune qui prédomine par ses effets gravitationnels de marée.

Par ailleurs, les forces de marées provenant du Soleil et de la Lune sont de l'ordre de 10^{-6} N pour un kg de masse d'eau, à comparer aux 10 N que subit cette masse d'eau du fait de son poids : il y a un rapport d'intensité relative de l'ordre de 10^7 ! Les effets des forces de marées ne sont visibles que sur d'importantes masses.

II. Types de marées

2.1 Le cycle semi-diurne

Du fait de la rotation de la Terre sur elle-même en 24 heures, il y a théoriquement deux cycles de marée par jour soit un cycle toutes les 12 heures. En réalité, la marée se décale de jour en jour car la Lune tourne également autour de la Terre. La figure 2.1 permet de visualiser l'origine de ce décalage.

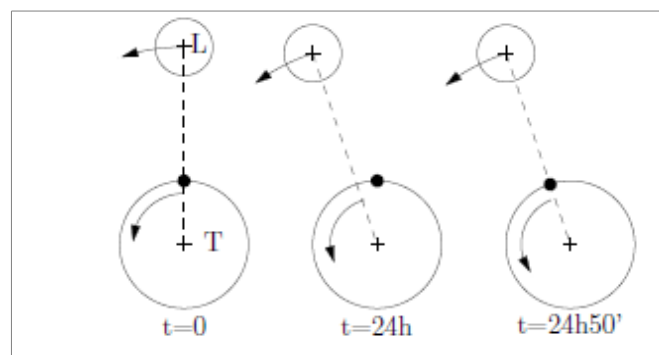


Figure 2.1 Rotation de la Terre sur elle-même et de la Lune autour de la Terre

La marée se décale tous les jours de 50 minutes. Lorsque la Terre a fait un tour sur elle-même, la Lune a un peu bougé dans le ciel (de $1/28$ tour), il faut donc $1+1/28$ jour pour boucler deux cycles soit un jour et 50 minutes environ.

Le cycle de marée semi-diurne n'est pas nécessairement symétrique ce qui explique que les hauteurs d'eau déplacées au cours d'une marée sont différentes le matin et l'après midi. L'origine de cette différence vient du fait que la Lune n'est pas dans le plan équatorial et par conséquent le bourrelet n'est pas perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre, comme illustré sur la figure 2.2 (PM : pleine mer).

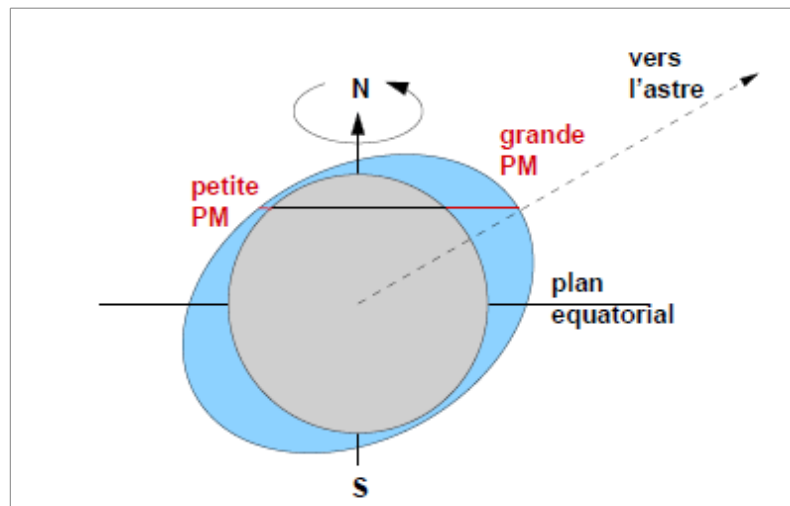


Figure 2.2 Marée semi-diurne non symétrique

2.2 Le cycle de vives-eaux et mortes-eaux

Un des phénomènes associé à la marée est le cycle de vives-eaux et mortes-eaux. Il est dû à la conjonction des effets de la Lune et du Soleil. Ainsi, lorsque les deux astres sont alignés, les effets se renforcent, on a alors des grandes marées. En revanche, lorsque les astres sont en quadrature, les effets se compensent et les marées sont de faible amplitude comme l'illustre la figure 2.3

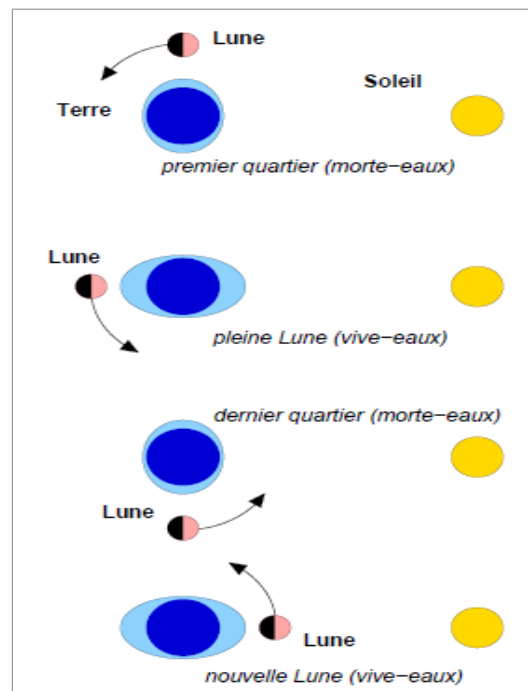


Figure 2.3 Vives-eaux et mortes-eaux

Le raisonnement précédent explique le côté essentiellement semi-diurne de la marée, familier le long de nos côtes. Les choses sont en réalité plus compliquées car dans de nombreux endroits du globe on trouve des marées diurnes et en d'autres des marées mixtes comme le montre la figure 2.4.

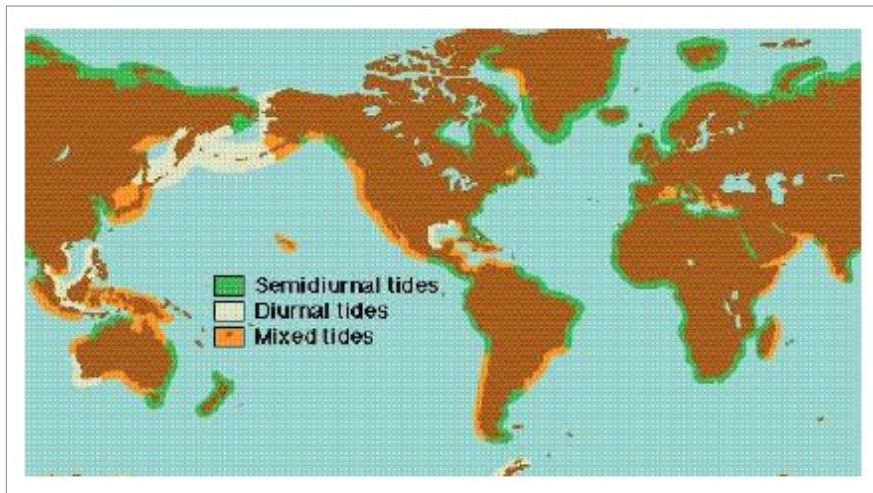


Figure 2.4-Différents types de marées dans le monde

Pour prendre en compte davantage de types de marées, il est nécessaire d'introduire un modèle prenant en compte le fait que les océans se comportent comme des fluides.

III . De la théorie statique au modèle dynamique

3.1 La théorie statique

Considérons un modèle quasi-statique simple : la Terre à symétrie matérielle sphérique entièrement couverte d'eau supposée incompressible (masse volumique μ constante) en équilibre hydrostatique dans le référentiel terrestre noté R_T

Par rapport au référentiel géocentrique R , R_T est en mouvement de rotation uniforme autour de l'axe des pôles à la vitesse angulaire :

$$\vec{\Omega}_T = \Omega_T \vec{z}$$

Supposons que dans la région de l'espace considérée, les seuls astres contribuant au champ gravitationnel sont la Terre, la Lune et le Soleil.

On peut montrer que les forces de marée dérivent d'un potentiel et que l'écriture de l'équation fondamentale locale de l'hydrostatique traduisant l'équilibre de l'eau dans R_T en un point M de latitude λ à la distance r de T est :

$$\overrightarrow{\text{grad}}_M \left(\frac{P}{\mu} + V \right) = \vec{0}$$

où $V = V_T + V_L + V_S + V_I$ est une énergie potentielle massique ; dans cette expression :

- V_T est la contribution à V des effets gravitationnels créés par la Terre.
- V_L et V_S sont les contributions à V des potentiels de marée créés par la Lune et le Soleil
- V_I est la contribution à V des effets d'inertie de la rotation propre de la Terre.

A partir de cette équation, on peut montrer que l'énergie potentielle massique est constante sur une surface libre de l'océan et s'exprime comme :

$$\frac{Gm_T}{r} + \frac{3Gm_S r^2}{2d_S^3} (\cos^2 \theta_S - \frac{1}{3}) + \frac{3Gm_L r^2}{2d_L^3} (\cos^2 \theta_L - \frac{1}{3}) + \frac{\Omega_T^2 r^2 \cos^2 \lambda}{2}$$

En développant davantage l'expression de cette énergie, on peut faire émerger une hauteur h représentant la variation du niveau de la mer provoquée par les seuls effets de marée statique. L'expression de h comporte des composantes de différentes périodes en un lieu donné (λ donnée) associées aux variations dans le temps des positions du Soleil et de la Lune par rapport à la Terre. Il apparaît alors des composantes semi-diurnes lunaires, solaires, des composantes diurnes lunaires, solaires, des composantes à périodes longues....

3.2 Mise en défaut du modèle statique

En réalité, on observe une très grande diversité des aspects des marées parfois très éloignées des prévisions du modèle statique. Ainsi, par exemple à certains endroits la marée est accrochée sur une période particulière et ceci indépendamment de la latitude (cf. figure 2.4).

Un certain retard entre l'action astrale et la réponse des océans est également constaté. On remarque par ailleurs des écarts très importants entre les amplitudes de marée prévues par le modèle statique et celles effectivement relevées.

Le cadre précédent n'est pas capable de décrire la réalité observée. La principale raison est que le potentiel de marée décrit l'action des forces de marée sur le système, pas la réponse de ce système à ce champ de forces.

Le concept de marée d'équilibre est néanmoins utile : il est question de savoir quelle forme prendraient les océans s'ils étaient capables de s'ajuster instantanément. Il s'agit cependant

d'une idéalisation impossible en réalité pour deux raisons : les continents obligent le fluide à les contourner et les océans ont une inertie, ils ne peuvent pas répondre instantanément.

La marée est une déformation de la surface des océans. Elle prend naissance dans les grands bassins océaniques (Atlantique, Pacifique..) en réponse à l'attraction des astres en mouvement. Cette déformation se comporte comme une onde de gravité. Le phénomène est donc dynamique.

L'amélioration du modèle passe en conséquence par la prise en compte de différents facteurs dynamiques (fluide soumis à l'action périodique des astres, à l'action du globe terrestre, aux contraintes visqueuses et aux conditions aux limites de parois solides complexes...)

Finalement, en considérant la linéarité du système, chaque terme de l'énergie potentielle massique en un lieu donné peut être considéré indépendamment des autres, engendrant sa marée propre, la marée totale étant la somme de ces composantes élémentaires. En raison des conditions aux limites très complexes se crée un système compliqué d'ondes en partie progressives et en partie stationnaires. De ce point de vue, le système Terre peut être vu comme un oscillateur mécanique présentant un certain nombre de fréquences propres, a priori différentes, des fréquences propres d'excitation associées aux forces de marée. En général, la réponse est en retard sur l'excitation, d'où les retards expérimentaux observés.

Par ailleurs, certains bassins (Manche, baie de Fundy...) suffisamment ouverts sur un océan pour subir l'influence de l'onde de marée se comportent comme des oscillateurs quasi-indépendants dont une fréquence propre est proche de la demi-journée. La marée semi-diurne fait alors entrer ces bassins en résonance ce qui explique les hauteurs d'eau importantes qu'on y observe.

Conclusion

Le phénomène des marées est extraordinairement complexe à interpréter bien que la cause initiale, l'interaction gravitationnelle avec la Lune et le Soleil est relativement simple à comprendre en première approximation. Ce dernier entraîne des conséquences inattendues notamment au niveau du système Terre-Lune :

- La rotation de la Terre sur elle-même est ralentie par les effets de marée. Il y a 380 millions d'années, la durée d'un jour n'était que de 22h.
- La Lune, ralentie elle aussi, présente de nos jours toujours la même face par rapport à la Terre.
- Un éloignement progressif de la Lune par rapport à la Terre, de l'ordre de 3 cm par an.

Enfin, il existe dans l'espace des lieux où les forces de marées peuvent être très importantes : Certaines théories invoquent par exemple les forces de marées pour expliquer la formation des anneaux planétaires.

Ressources documentaires

- Wikipédia : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mar%C3%A9e>
- Gilles Roulet, « La Marée », cours Ifremer (France) de master 2011-2012
- Composition de physique de l'agrégation externe année 1999
- Dictionnaire de physique de Richard Taillet
- TIPE sur la marée d'Antoine THIBault