

tous les points des océans et qui, chacune sur leur trajet, ont rencontré des conditions de propagation différentes.

Quand on représente les points de l'océan où la pleine mer est atteinte à la même heure, des lignes apparaissent, nommées lignes cotidales (voir la figure 5). Elles se coupent en des «points amphidromiques». Les ondes de marées tournent autour de ces «nœuds», qui correspondent à une amplitude quasi nulle des marées. Dans l'océan, il existe des points où la marée est presque nulle, bien que la Lune y exerce une force d'attraction comme en tout point de la Terre. Cette description est très éloignée du schéma simpliste, qui décrit les marées comme des bourrelets liquides en direction de la Lune.

L'hypothèse de linéarité proposée par Laplace s'applique très bien aux marées observées par grande profondeur, lorsque la hauteur d'eau est très

supérieure à la dénivellation due aux marées. En revanche, près des côtes, la proximité du fond a deux effets notables : d'une part, l'écoulement turbulent près du fond provoque une dissipation d'énergie assimilable à un frottement ; d'autre part, la vitesse de l'onde de marée augmentant avec la profondeur, l'onde de marée se déplace plus vite lors des pleines mers que lors des basses mers. Ces phénomènes hydrauliques complexes déforment la courbe de marée près des côtes, et la réponse de la mer à la force génératrice n'est plus linéaire. La bathymétrie prend alors beaucoup d'importance, et des combinaisons de fréquences fondamentales apparaissent au cours de la propagation dans les zones de faible profondeur. Les prévisions précises de la marée se sont longtemps heurtées à cette difficulté. La méthode dite harmonique la résout : elle consiste à développer la force géné-

ratrice en composantes harmoniques élémentaires. Elle a été mise au point grâce aux travaux de l'école britannique initiée par lord Kelvin, puis développée jusqu'à fournir une méthode universelle de prévision des marées. Elle s'appuie sur une formulation théorique dont certains paramètres restent à déterminer expérimentalement, par l'analyse, dite harmonique, des observations issues des marégraphes. Les paramètres locaux sont suffisamment précis pour les prévisions usuelles, à condition que les mesures soient enregistrées sur de longues durées, pendant une année au moins pour des marées dont l'amplitude est comparable à celles des côtes françaises de la Manche ou de l'Atlantique. Cette méthode présente l'inconvénient de ne permettre des prévisions que où existent des observatoires de marées (le long des côtes ou en mer, lors de campagnes de mesures).

LA CONSTRUCTION DE PROCTOR

La force génératrice des marées est représentée en tout point grâce à la règle dite de Proctor. Elle donne la direction et le module relatif de la force génératrice en tout point M de la Terre. Les différents types de marées (diurne, semi-diurne, semi-diurne à forte inégalité diurne) trouvent leur origine dans les variations de la force génératrice, en fonction de la latitude φ de l'observateur M et la déclinaison δ de l'astre (l'angle entre sa direction et l'équateur) quand la Terre tourne sur elle-même. La construction est simple. Le point P est la projection de M sur la direction de l'astre qui passe par le centre de la Terre T . D'après des considérations géométriques et en supposant que la distance de l'astre (la Lune ou le Soleil) est suffisamment grande pour que sa direction soit considérée comme fixe vue de tout point de la Terre, le point F se positionne sur cette même droite de telle sorte que $TF = 3 \times TP$. Le vecteur MF représente la force génératrice F_m de la marée au point M . Lorsque la Terre tourne sur elle-même, le point M passe par les points M_1, M_2, M_3 à différents moments d'une journée (M_1 et M_3 sont par exemple décalés de 12 heures).

a) Marée semi-diurne à inégalité diurne

La force génératrice F_m est maximale quand M se situe en M_1 . Quand la Terre tourne sur elle-même, F_m diminue. Elle est minimale en

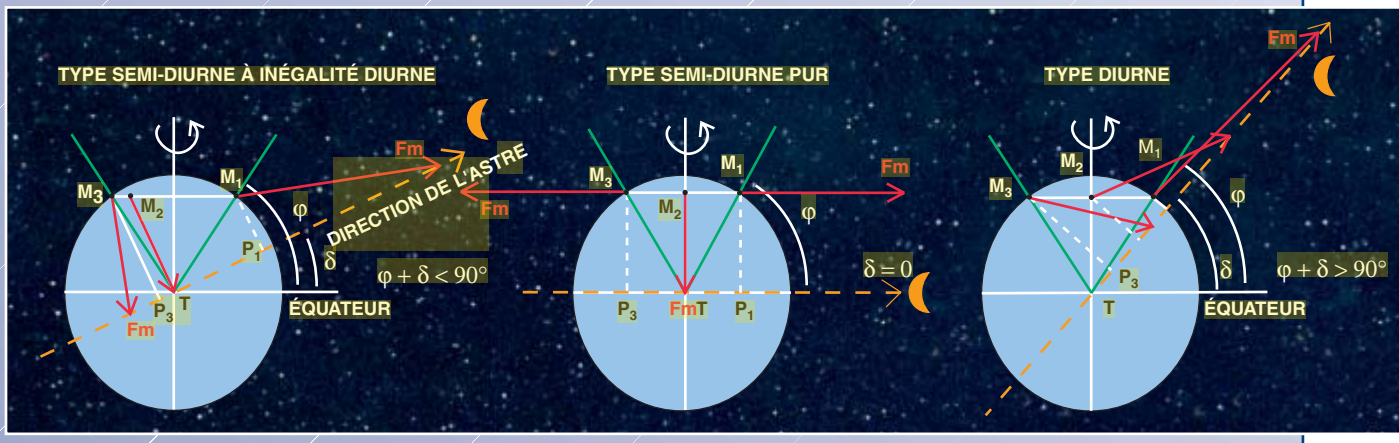
$M = M_2$ (F_m est dirigée vers T), puis augmente à nouveau pour atteindre un deuxième maximum, dit maximum secondaire (en M_3). Elle décroît ensuite jusqu'au minimum M_2 , et augmente jusqu'à la position M_1 initiale. Au final, en 24 heures, F_m présente deux maxima de module différent : la marée est de type semi-diurne à inégalité diurne. C'est le cas dans les zones géographiques situées hors de l'équateur, à une latitude telle que la somme de la latitude et de la déclinaison soient inférieures à 90 degrés.

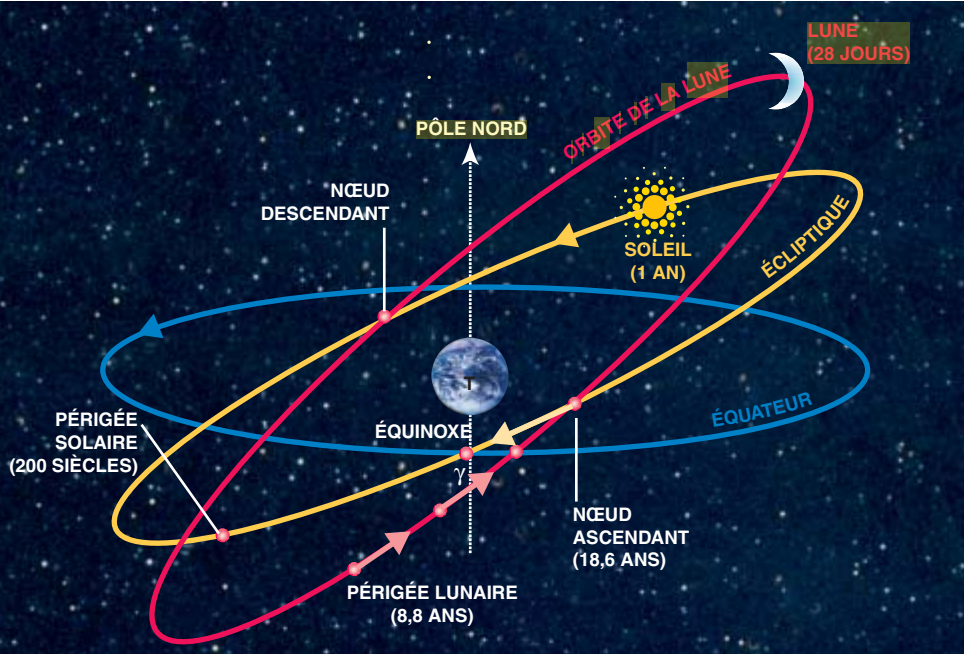
b) Marée semi-diurne pure

La force génératrice F_m présente aussi deux maxima par jour, mais le maximum secondaire en M_3 est de même valeur qu'en M_1 . Le même jour, les marées ont la même amplitude : elles sont de type semi-diurne «pur», ce qui se produit quand l'astre est situé dans le plan de l'équateur ($\delta = 0$).

c) Marée diurne

La force génératrice F_m est maximale en M_1 . Elle diminue de façon continue jusqu'à M_3 , puis elle augmente à nouveau. En 24 heures, F_m n'est passée que par un seul maximum : il y a une seule marée par jour. Ce cas concerne les régions telles que la somme de la latitude et de la déclinaison soient supérieures à 90 degrés.





4. LA LUNE ET LE SOLEIL SONT RESPONSABLES DES MARÉES (la part du Soleil étant inférieure à la moitié de la force engendrée par la Lune). Les mouvements apparents sont représentés par rapport à un observateur terrestre fixe central. L'orbite de la Lune, celle du Soleil (nommée écliptique) et le plan de l'équateur sont représentés par des ellipses. L'intersection de l'écliptique et de l'équateur, nommée le point vernal, correspond au passage du Soleil de l'hémisphère Sud à l'hémisphère Nord au moment de l'équinoxe de printemps. Les nœuds, ascendant dans le sens Sud-Nord et descendant sinon, sont situés aux intersections de l'orbite de la Lune et de l'écliptique. Les périgées sont, sur les orbites, les points les plus proches de la Terre. Leurs mouvements apparents provoquent des marées plus ou moins importantes, dont les amplitudes fluctuent avec des périodes complexes, combinaisons de cinq périodes de révolution différentes (celles de la Lune, du Soleil, du périgée lunaire, solaire et des nœuds de la Lune). Par exemple, les marées ont des amplitudes maximales aux nouvelles Lunes et aux pleines Lunes, aux équinoxes, et quand le périgée lunaire et le nœud ascendant approchent le plan de l'équateur. Comme les périodes sont incommensurables deux à deux, les marées ne sont pas des phénomènes périodiques.

Une approche globale des marées

Une approche plus ambitieuse que la méthode harmonique consiste à résoudre directement le problème physique de la formation et de la propagation des ondes de marée dans leur milieu. Les pionniers de cette méthode sont D. Bernoulli, W. Whewell, H. Poincaré et J. Harris. Compte tenu de la complexité de la bathymétrie et du profil de côtes, il n'était pas envisageable d'obtenir des solutions exactes sans de puissants moyens de calcul. Des solutions analytiques ont néanmoins été trouvées qui expliquent à grands traits la propagation de la marée dans des bassins océaniques et qui rendent compte de l'existence de points amphidromiques.

La résolution pratique des équations de l'hydrodynamique pour les ondes de marée n'a été possible qu'à partir des années 1970. La méthode consiste à découper le domaine étudié (une partie de l'océan) en éléments à géométrie simple, nommés mailles, et à leur appliquer deux principes fondamentaux : le principe de conservation et le principe fondamental de la dynamique. D'après le principe de conservation, la varia-

tion de la hauteur d'eau dans une maille résulte de la différence entre la quantité d'eau qui y entre et celle qui en sort. Cette différence dépend des courants qui traversent les bords des mailles. Le principe fondamental de la dynamique indique que les variations de vitesse des courants dans une maille dépendent des forces extérieures qui s'exercent sur la colonne d'eau contenue dans la maille. Ces forces sont de trois types : les forces de pression dues aux différences de hauteurs d'eau entre les mailles voisines, la force de Coriolis due à la rotation de la Terre qui tend, dans l'hémisphère Nord, à infléchir la direction du courant vers la droite, et les forces de freinage, assimilables à des frottements au voisinage du fond et des parois des mailles.

Toutes les mailles sont interdépendantes, et le problème est résolu de façon globale. Les mouvements n'existent qu'à condition d'être induits par un «moteur», constitué ici par la force génératrice et la marée aux bords du domaine étudié. En pratique, le choix de la dimension des mailles est fondamental : plus elle est petite, plus la résolution est élevée. En contrepartie, plus les mailles sont petites, plus les calculs sont longs.

Aujourd'hui, un des défis majeurs consiste à améliorer la connaissance des profondeurs. Il serait illusoire d'améliorer la résolution d'un modèle si la description du milieu n'était pas réalisée à une échelle équivalente. De ce point de vue, les cartes marines sont peu aptes à fournir une bathymétrie adaptée à la modélisation. Elles font ressortir les éléments qui intéressent la sécurité de la navigation, les reliefs susceptibles de présenter un danger sont accentués, ce qui peut fausser la représentation des fonds. D'autre part, de nombreuses régions du Globe ne sont pas encore hydrographiées. En 1995, nous avons entrepris de constituer une base de données bathymétriques sous forme numérique, qui améliore la modélisation numérique de la marée.

D'importants progrès ont aussi été réalisés grâce aux mesures par satellites. Les techniques spatiales ont suscité un regain d'intérêt pour la modélisation des marées dans les océans. L'altimétrie satellitaire est fondée sur le principe du radar. La technique consiste à mesurer le temps de parcours aller et retour d'impulsions électromagnétiques qui se réfléchissent à la surface de la mer. On en déduit la distance parcourue par les impulsions, et donc la hauteur du satellite au-dessus de la surface, avec une précision de quelques centimètres. Cette technique comporte un certain nombre de difficultés. D'abord, il faut connaître avec précision l'altitude du satellite à partir de stations situées sous sa trace. Trois techniques sont utilisées pour positionner le satellite : GPS (*Global Positioning System*, «système de positionnement global»), le système français de géodésie spatiale DORIS (*Doppler orbitography and radiolocation integrated by satellite*) ou la télémétrie laser. Ensuite, l'altimètre à bord doit être calibré en comparant le résultat de la mesure par satellite à une mesure directe par un marégraphe.

L'altimétrie satellitaire nécessite de disposer de stations marégraphiques de référence. Par ailleurs, elle ne fournit pas de données exploitables hors des traces des satellites, ni près des côtes (la trace du faisceau radar de l'altimètre sur la mer a un rayon d'une dizaine de kilomètres ; dès que le faisceau vise en partie une bande côtière, les mesures sont perturbées). Enfin, quelques jours séparent le survol d'un même point, ce qui pose des problèmes pour analyser des signaux de périodes plus courtes, tels ceux de la marée.