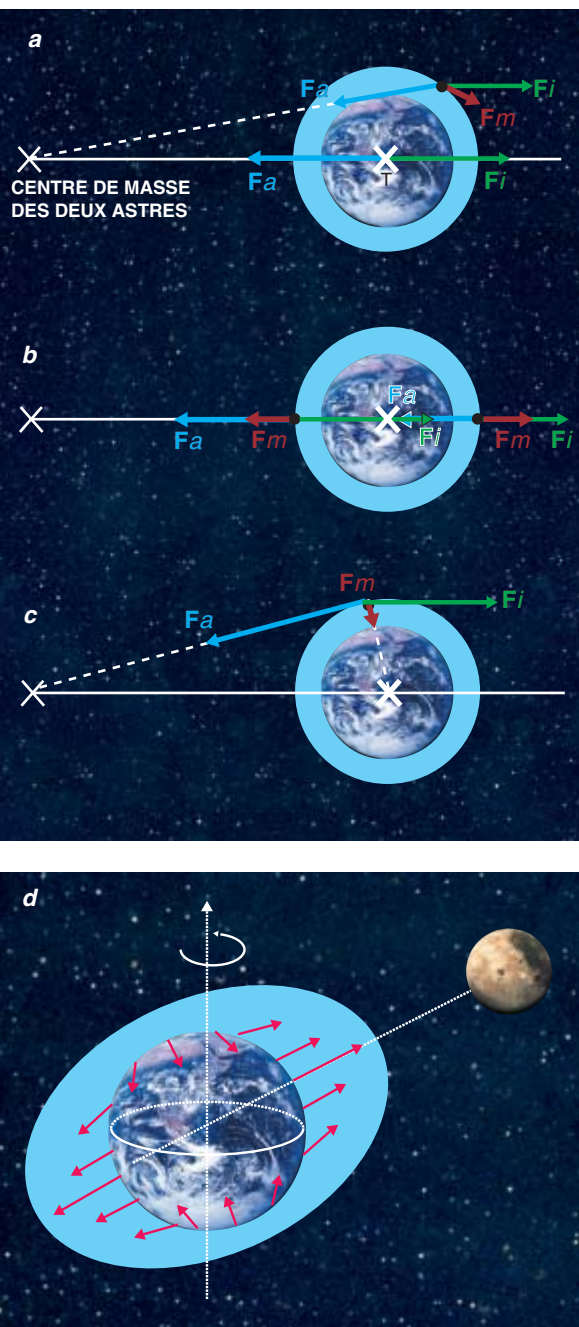




3. LA FORCE GÉNÉRATRICE DES MARÉES est la résultante de la force d'attraction F_a et de la force d'inertie F_i (a). La Terre, soumise à l'action gravitationnelle d'un astre, subit une force d'attraction F_a compensée par la force d'inertie F_i (la force centrifuge) en tout point du Globe. Au centre de la Terre, les deux forces se compensent exactement. À la surface, la force d'attraction l'emporte lorsque l'astre est au-dessus de l'horizon. En revanche, la force d'inertie, identique en tout point, est supérieure lorsque l'astre est au-dessous. La force génératrice F_m des marées est maximale lorsque l'astre se trouve au zénith et au nadir (b). Elle est minimale lorsqu'il se trouve à l'horizon (la direction de l'astre fait un angle de 90 degrés avec la verticale au point d'observation) (c). Au final, à un instant donné, la répartition de la force génératrice des marées en tout point de la Terre a une forme de bourrelets (d).

égal à 180 degrés, la situation correspond à la syzygie d'après la construction de Proctor : les forces génératrices de la marée provoquées par le Soleil et la Lune s'ajoutent et engendrent une force résultante qui est, comme nous l'avons vu, maximale.

L'amplitude de la force varie au rythme des lunaisons, mais d'autres périodes jouent également un rôle. La composante semi-diurne est maximale lorsque l'astre passe dans le plan de l'équateur : s'il s'agit du Soleil, la situation correspond à l'équinoxe de printemps ou d'automne. Quand la Lune se trouve également au voisinage de l'équateur lors des équinoxes, le maximum de la force génératrice est encore plus élevé. Ce sont les grandes marées d'équinoxe. Deux configurations peuvent contribuer à augmenter encore ce maximum : quand le périgée lunaire et quand le nœud ascendant approchent le plan de l'équateur (les périgées sont, sur les orbites, les points orbitaux les plus proches de la Terre et les nœuds sont les intersections de l'orbite de la Lune et de l'écliptique. Le nœud ascendant est l'intersection dans le sens Sud-Nord et le nœud descendant dans l'autre sens).

Parmi les cinq paramètres utilisés pour décrire les mouvements de la Lune et du Soleil, la période de révolution du périgée lunaire est voisine de la moitié de celle du nœud ascendant. Cette propriété est probablement à l'origine de l'opinion très répandue, mais fautive, que la période des nœuds lunaires constitue une période de la marée. Certes, une configuration des positions relatives du périgée et du nœud lunaire se retrouve environ tous les 18,61 ans, simplement décalée de 37 degrés. Toutefois, ce décalage augmente à chaque révolution du nœud lunaire, et il faut attendre près de 180 années pour retrouver une configuration voisine. En fait, aucun des cinq paramètres qui décrivent les mouvements des astres n'a de période commune. Les périodes des événements astronomiques en jeu dans les marées sont incommensurables deux à deux. Par conséquent, et contrairement à une idée reçue, la force génératrice de marée n'est pas périodique, et la marée elle-même n'est donc pas un phénomène strictement périodique ! Les marées ne reviennent pas avec la régularité d'un métronome, mais de cinq à la fois qui, chacun battant à un rythme différent, se superposeraient de façon complexe.

Grâce à la description des mouvements des astres, on explique certaines

caractéristiques des marées, telle l'apparition des maxima, mais d'autres, telles les variations de l'amplitude d'un point à l'autre dans l'océan, échappent encore à cette explication. Elles semblent indépendantes de la répartition géographique de la force génératrice à la surface du Globe. En effet, la force génératrice ne représente pas le déplacement réel des masses d'eau océaniques. La surface océanique a, comme nous allons le voir, un comportement très différent.

Des ondes sur la mer

En 1775, soit près d'un siècle après les travaux de Newton, Laplace (1749-1827) introduisit le potentiel générateur de la marée dans une théorie présentée à l'Académie Royale des sciences. Il développa ensuite cette idée et l'exposa en 1799 dans son *Traité de mécanique céleste*. Il fut le premier à traiter la marée comme un problème de mouvement de masses d'eau, et non plus comme un problème statique. Les équations hydrodynamiques formulées par Laplace restent à l'origine de tous les développements ultérieurs et elles permirent d'établir une formule dite de Laplace, applicable aux prévisions. Cette formule s'appuie sur deux principes : les masses d'eau soumises à une force périodique oscillent avec une période identique à celle de la force qui engendre les oscillations (principe des oscillations forcées) ; le mouvement global d'un système soumis à de petites forces est égal à la somme des mouvements élémentaires (principe de la superposition des petits mouvements). En bref, ces principes posent l'hypothèse de la linéarité de la réponse des océans à la force génératrice de marée. Laplace admet que, puisque la force génératrice de marée peut être décomposée en forces périodiques élémentaires, la marée elle-même peut être décomposée en oscillations de mêmes périodes.

Selon le point de vue de Laplace, toujours valide aujourd'hui, sous l'action de la force génératrice de marée, des ondes sont engendrées et diffusées à travers les océans. Ces ondes se propagent à des vitesses qui dépendent de la profondeur. Comme toutes les ondes, elles sont réfléchies, réfractées ou dissipées en fonction des conditions de propagation du milieu. Elles peuvent interférer entre elles, renforcer ou, au contraire, atténuer certaines fréquences. La marée observée en un point est le résultat de la superposition de toutes ces ondes élémentaires, qui arrivent de

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.

