

pleine mer. Les maxima (ou les minima) se succèdent toutes les 12 heures et 25 minutes en moyenne. La marée est provoquée par l'attraction gravitationnelle de la Lune, mais la pleine mer a toujours un retard sur la culmination de la Lune, c'est-à-dire sur le moment où la hauteur de la Lune au-dessus de l'horizon est maximale. Ce retard, presque constant, diffère d'un point à l'autre, mais, à un endroit donné, il s'écarte assez peu d'une valeur moyenne, que les marins nomment établissement moyen.

Au premier abord, la marée se manifeste comme une variation cyclique de la hauteur d'eau. La Lune tourne autour de la Terre dans le même sens de rotation que celle-ci, et on définit le jour lunaire comme l'intervalle entre deux passages de l'astre par le plan méridien d'un lieu (le plan méridien est le plan qui contient l'axe de rotation de la Terre et la verticale au-dessus de l'observateur). Le jour lunaire est un peu plus long que le jour solaire, de 50 minutes environ : si la Lune se situe au-dessus d'un point terrestre à midi, le lendemain, elle ne s'y trouvera qu'à midi et 50 minutes (environ). Ainsi, chaque jour, la pleine mer a lieu approximativement 50 minutes plus tard que le jour précédent (de même que la basse mer).

L'amplitude des marées subit aussi des variations cycliques entre des maxima, nommés vives-eaux, et des minima, nommés mortes-eaux, qui se succèdent tous les 14 à 15 jours, au rythme des demi-lunaisons. Les vives-eaux ont toujours lieu après une durée nommée l'âge de la marée, qui suit une pleine Lune ou une nouvelle Lune, événements astronomiques regroupés sous le nom de syzygies, lors desquels la Terre, la Lune et le Soleil sont situés dans le même plan méridien. Dans cette configuration où la Lune et le Soleil sont en conjonction ou en opposition par rapport à la Terre, les forces d'attraction de la Lune et du Soleil respectivement s'ajoutent ou se retranchent. L'âge de la marée est, comme l'établissement moyen, différent d'un point à l'autre, mais il est à peu près constant en un lieu donné.

Grâce à l'âge de la marée, on prévoit les horaires des vives-eaux et des mortes-eaux, car les jours de syzygie, les pleines mers et les basses mers ont lieu approximativement à la même heure. Ces jours-là, le Soleil et la Lune sont dans le même plan méridien. Lorsque le Soleil passe dans le plan méri-

dien de l'observateur, il est midi solaire (lorsque le Soleil est sur le plan méridien supérieur) ou minuit solaire (lorsque le Soleil est sur le plan méridien inférieur). Donc la pleine Lune ou la nouvelle Lune ont aussi lieu à midi ou à minuit, soit à zéro heure solaire. Or, la pleine mer a lieu, comme on l'a vu, avec un retard à peu près constant (égal à l'établissement moyen) sur le passage de la Lune. Ainsi, en additionnant le retard par rapport au passage de la Lune (l'établissement moyen) et celui spécifique à la pleine Lune ou à la nouvelle Lune (l'âge de la marée) à zéro heure solaire, on obtient l'heure (en temps solaire) de la pleine mer ou de la basse mer un jour de vives-eaux.

Une ou deux marées par jour?

De nombreuses caractéristiques des marées échappent à une interprétation simple. Ainsi, les observations effectuées le long des côtes qui nous sont familières ne sont pas universelles. En effet, dans le monde, les marées n'ont pas toujours la même fréquence. À Brest, la marée présente deux pleines mers et deux basses mers par jour : elle est dite semi-diurne. Ce type de marée est dominant en Atlantique, mais, dans l'océan Pacifique, il est fréquent d'observer des marées de type diurne, où une seule pleine mer et une seule basse mer ont lieu par jour, comme à Udaça en Sibérie. Il existe aussi des marées semi-diurnes dites à forte inégalité diurne, comme à San Diego, en Californie, où les pleines mers et les basses mers ont des amplitudes très différentes au cours d'une même journée et, enfin, des marées mixtes, parfois diurnes, parfois semi-diurnes.

Dans l'Atlantique, lorsque des types de marées différents du semi-diurne dominant apparaissent, par exemple à l'Est de Terre-Neuve ou au voisinage des Antilles, la partie semi-diurne disparaît presque et laisse apparaître la composante diurne, pourtant très faible. Les deux composantes diurnes et semi-diurnes (nous reviendrons sur leur origine) coexistent plus ou moins dans toutes les marées. Une marée qualifiée de semi-diurne, comme celle de Brest, présente, en réalité, des inégalités diurnes.

Pourquoi une marée par jour à Udaça et deux à Brest? Un peu de théorie s'impose. La Terre, soumise à l'action gravitationnelle exercée par un

astre, subit une accélération dirigée vers l'astre, telle que, selon le principe d'équivalence, la force d'attraction est équilibrée par la force d'inertie. Cette force inertielle est la force centrifuge, appliquée en tout point de la Terre au cours de son mouvement autour du centre de masse du système composé par la Terre et par l'astre. Au centre de la Terre, cet équilibre est parfait : un observateur y serait soumis à une force nulle. Alors que la force d'inertie reste identique pour tout point de la Terre, la force d'attraction, fonction de la distance à l'astre, est variable : plus le point terrestre est proche de l'astre, plus la force est importante. La différence entre ces deux forces constitue la force génératrice de la marée (voir la figure 3).

La force génératrice atteint sa valeur maximale lorsque l'astre est au zénith (la verticale supérieure) et au nadir (la verticale inférieure). En revanche, lorsque l'astre se trouve à l'horizon, la force est minimale. La Lune est le moteur principal de la force génératrice de marée, la part du Soleil est légèrement inférieure à la moitié de celle de la Lune, et celle des planètes est négligeable. En calculant la force génératrice grâce à la construction dite de Proctor et en étudiant ses variations au cours de la rotation de la Terre autour de son axe polaire, on met en évidence les différents types de marées (voir l'encadré de la page 29), en fonction de la latitude de l'observateur et de la déclinaison de l'astre (l'angle entre la direction de l'astre et le plan de l'équateur). Cette construction géométrique fait apparaître les deux périodes fondamentales effective-

2. TOUTES LES MARÉES DU MONDE N'ONT PAS LA MÊME PÉRIODE. Quatre types majeurs de marées existent dans le monde : le type «semi-diurne», comme à Brest, présente deux pleines mers et deux basses mers par jour ; le type «diurne», par exemple à Udaça en Sibérie, n'a qu'une pleine mer et qu'une basse mer par jour ; et le type «semi-diurne à forte inégalité diurne», comme à San Diego, en Californie, avec des pleines mers ou des basses mers de hauteurs très différentes au cours d'une même journée. D'autres marées sont mixtes (semi-diurnes et diurnes, en alternance). Le type semi-diurne (*en bleu*) domine dans l'Atlantique et le type semi-diurne à inégalité diurne, dans le Pacifique (*en vert*). Les marées sont variées dans l'océan Indien. Partout, on trouve des marées diurnes (*en rouge*) et des marées mixtes (*en jaune*). Les amplitudes des marées dans l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien varient sans lien avec le type de marée des plus faibles (*en vert foncé*) aux plus fortes (*en rouge*).

vement observées, diurne et semi-diurne, qui, en se superposant, sont à l'origine de tous les types de marées.

Les marées ne sont pas périodiques

Étudions désormais les variations de la force génératrice de marée en fonction des mouvements réels des astres (la Lune et le Soleil). Les choses se compliquent ! La force génératrice présente des variations très subtiles, tant

les mouvements relatifs de la Terre, de la Lune et du Soleil sont complexes (voir la figure 4). Ces mouvements n'ont pas de solution analytique, mais peuvent toutefois être décrits à l'aide de cinq paramètres indépendants : la période de révolution de la Lune (27,32158 jours) ; la période de révolution du Soleil (365,24219 jours) ; la période de révolution du périhélie lunaire (8,84753 ans) ; la période de révolution des nœuds de la Lune (18,61336 ans) ; et la période de révolution du périhélie

solaire (209,36 siècles). À ces périodes, on ajoute la période de rotation de la Terre, de 24 heures (en moyenne).

Considérons un observateur terrestre qui suit les mouvements apparents de la Lune et du Soleil, supposés situés sur une sphère éloignée, telle que leur direction est considérée comme constante d'un point à l'autre de la Terre. Les périodes de la Lune et du Soleil n'étant pas égales, l'angle entre leurs plans méridiens varie de façon continue. Lorsqu'il est nul ou

