

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

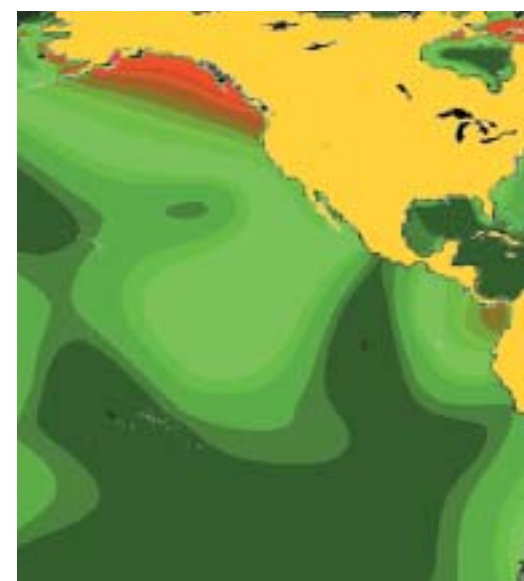
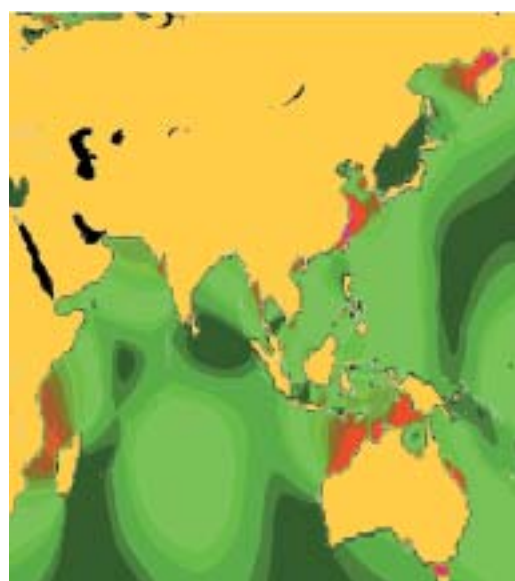
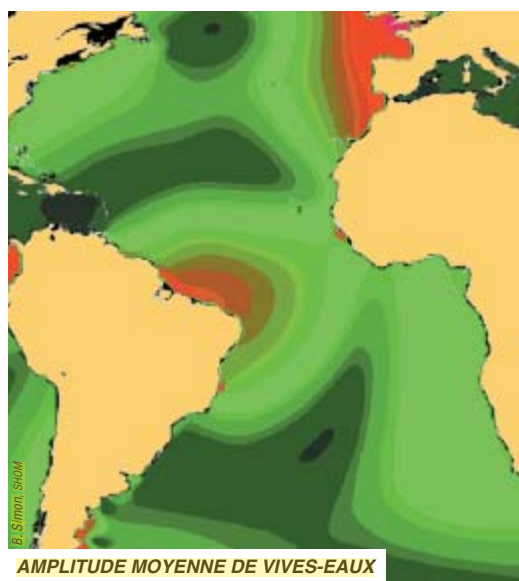
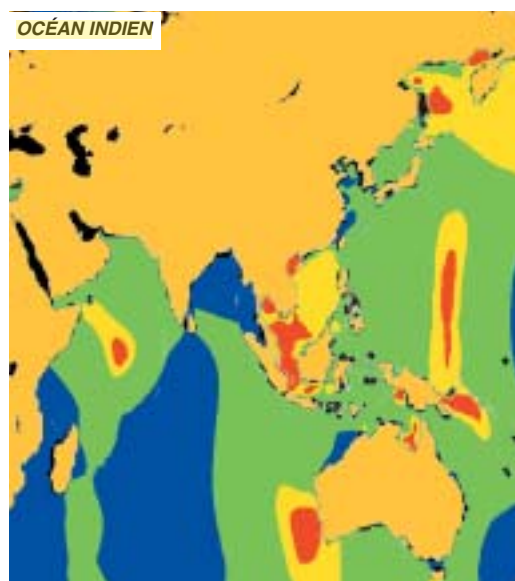
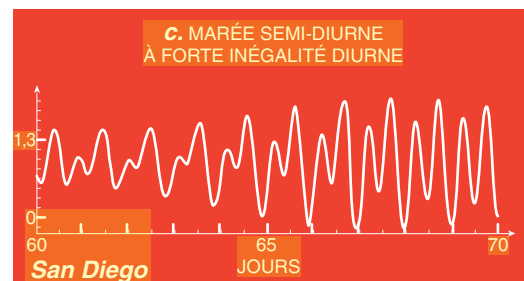
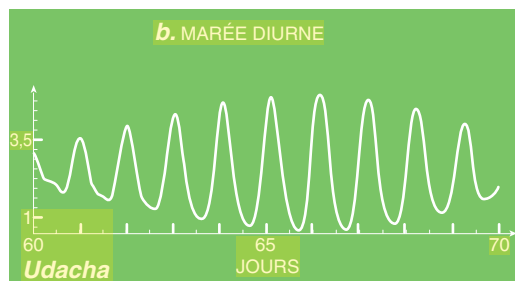
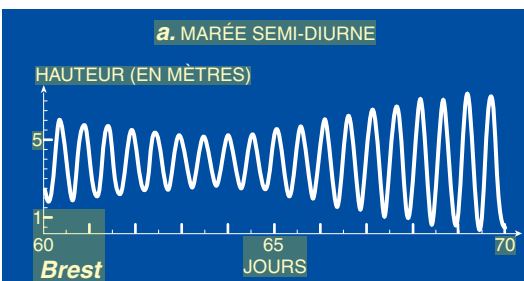
Les marées ne sont pas périodiques

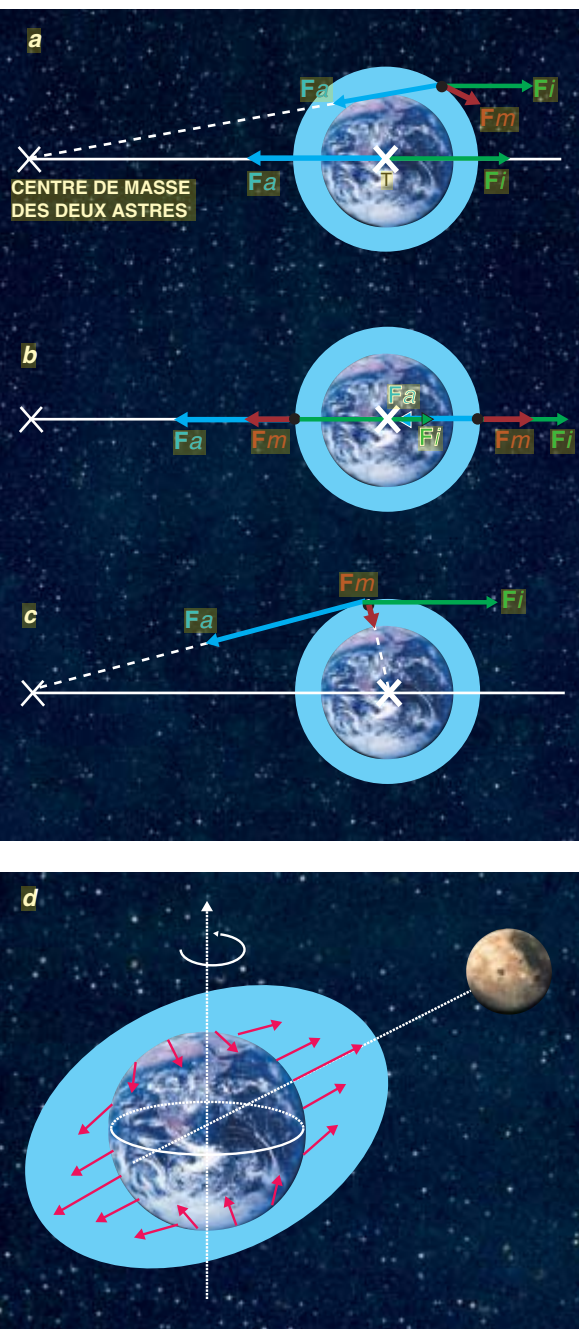
Étudions désormais les variations de la force génératrice de marée en fonction des mouvements réels des astres (la Lune et le Soleil). Les choses se compliquent ! La force génératrice présente des variations très subtiles, tant

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





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