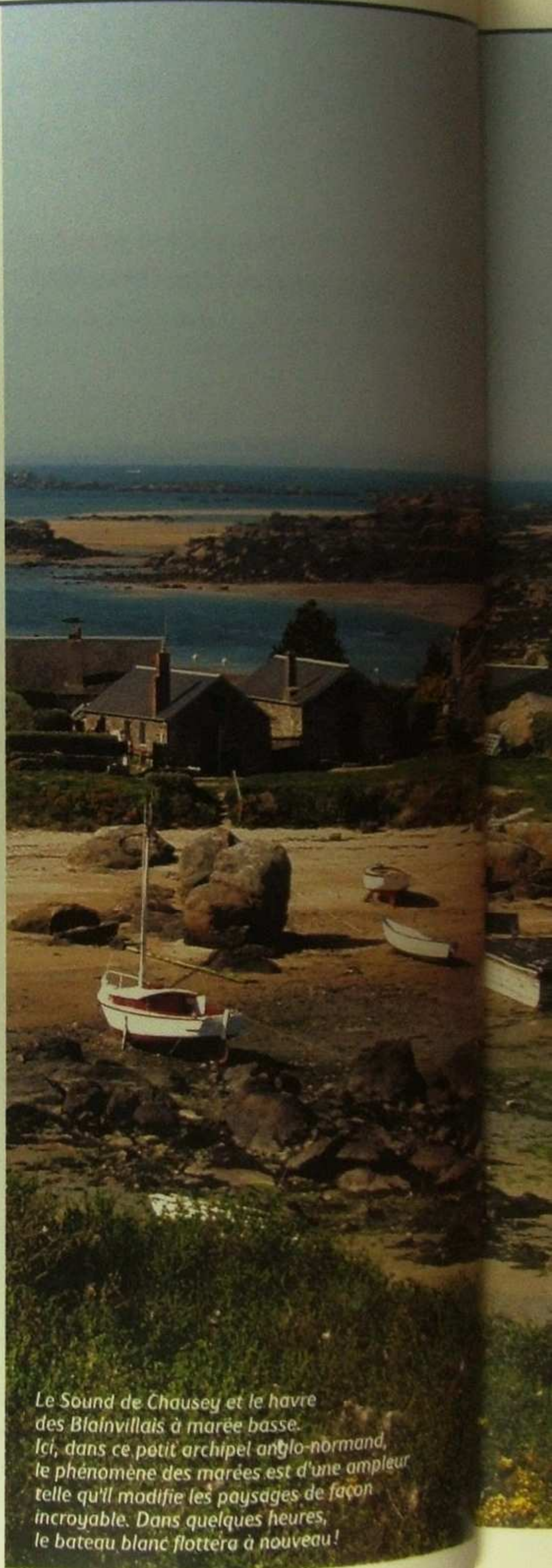
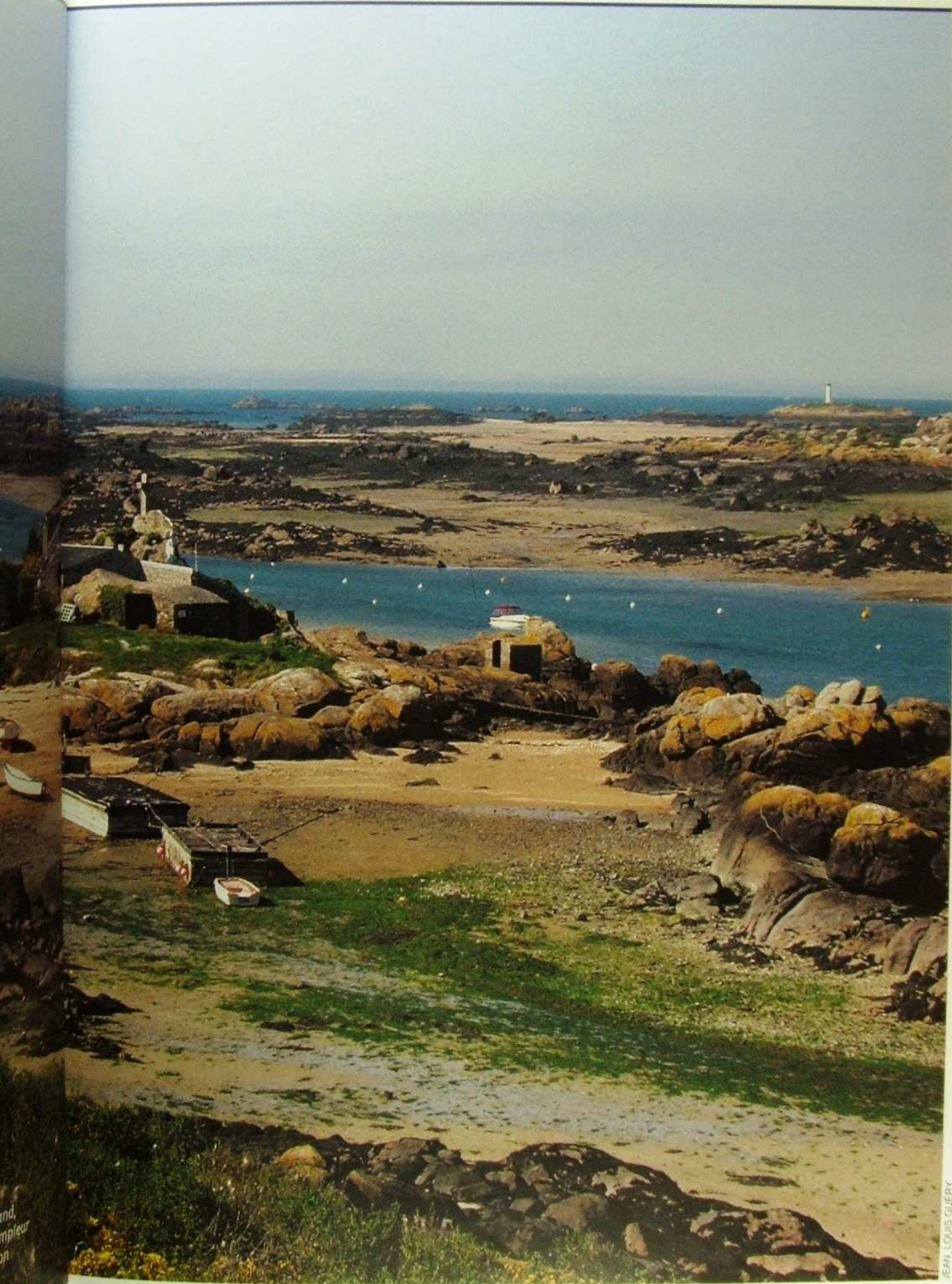


# Le phénomène des marées

**L**es mouvements de la mer que l'on constate le long de la plupart des rivages maritimes sont un phénomène bien connu des populations littorales et des navigateurs. Marée haute, marée basse... Le va-et-vient est incessant et rythme depuis toujours la vie et l'économie des ports et des villages côtiers. Si le processus est aujourd'hui bien connu, il aura fallu beaucoup de temps pour trouver une explication scientifique et comprendre que les mers subissent l'attraction des astres, Lune et Soleil principalement. Le pas essentiel dans la compréhension des marées fut sans aucun doute la mise en évidence des lois sur la gravitation universelle. Nos ingénieurs hydrographes ont aussi joué un rôle important et continuent leurs recherches afin de satisfaire les besoins de la navigation. Mais pas seulement. Dans bien d'autres domaines, le mouvement des marées est une problématique qu'il convient de cerner au mieux. Les constructions portuaires, celles des ouvrages de protection contre les inondations, la production d'énergie marémotrice, l'exploitation des champs de pétrole offshore, la géodésie, l'altimétrie spatiale et les productions ostréicoles et mytilicoles sont des domaines qui exigent une parfaite maîtrise des mouvements des marées afin de pouvoir les prédire avec précision. La tâche est d'autant plus difficile que la marée ne connaît pas de véritable périodicité. Bien sûr, on met facilement en évidence un certain nombre de rythmes (diurne, mensuel, annuel...), mais jamais les variations de hauteur de la marée ne se reproduisent vraiment à l'identique.



*Le Sound de Chausey et le havre des Blainvillais à marée basse. Ici, dans ce petit archipel anglo-normand, le phénomène des marées est d'une ampleur incroyable. Dans quelques heures, le bateau blanc flottera à nouveau!*



JEAN LOUIS QUERY

## Mise en évidence du phénomène des marées

**A**u nord du goulet de Fromentine, entre l'île de Noirmoutier et la côte, l'observateur, selon l'heure à laquelle il arrive, verra passer des bateaux... ou des voitures ! C'est qu'ici, à six heures d'intervalle, les grandes étendues de sable que traverse la fameuse route du Gois se trouvent recouvertes par la mer, ne laissant voir que le haut des balises refuges qui jalonnent le tracé de cette départementale submersible. Il s'agit là d'un des exemples les plus frappants, comme le sont aussi ceux de l'archipel de Chausey ou de la baie du Mont-Saint-Michel où le phénomène des marées est le plus spectaculaire de France. Dans ces deux sites du golfe normand-breton, la différence du niveau de l'eau entre une pleine mer et une basse mer peut atteindre quatorze mètres, soit la hauteur d'un immeuble de quatre étages ! C'est dire si les paysages maritimes peuvent être changeants. À Chausey, la surface des îles et îlots au « bas de l'eau » est de l'ordre de 4000 hectares alors qu'elle se réduit à tout juste 65 hectares au moment du plein.

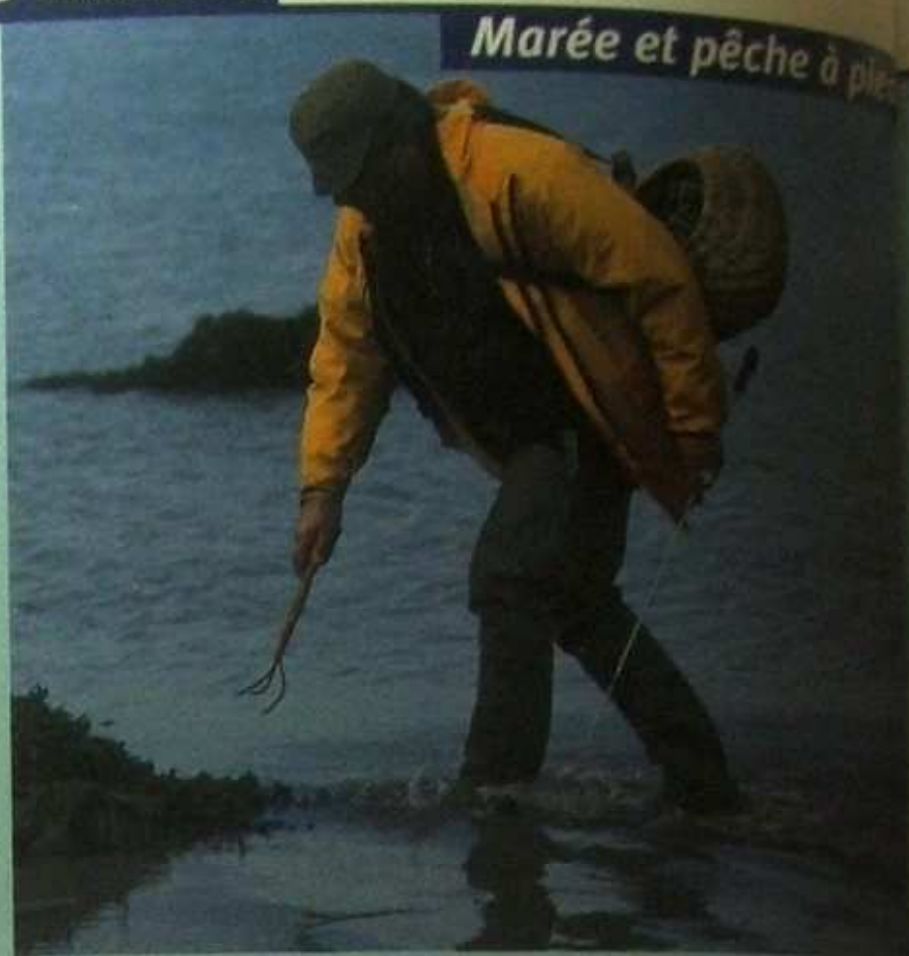
### Marée et navigation

Le navigateur, en parcourant nos côtes de Dunkerque à Biarritz, aura maintes fois l'occasion de constater que le niveau de la mer est une donnée des plus variables de sa croisière. Il constatera que la mer monte et descend deux fois par jour, que d'une journée à l'autre, d'un port à l'autre, elle n'est jamais identique. Si cela entraîne quelques contraintes et impose un peu de rigueur pour mener sa route, c'est aussi une source de plaisirs nouveaux, ceux de l'échouage dans le fond d'un havre, ceux de la navigation à rase cailloux ou des remontées champêtres au fond des rivières et rias...

### Marée et économie

On voit que si la marée est une composante essentielle de la navigation et des loisirs nautiques, elle est aussi un facteur de l'économie et de la vie des populations du littoral. En l'absence de marées, Paimpol n'aurait peut-être jamais eu de port, les rivières du Trieux ou de l'Odette n'auraient jamais vu défiler les voiliers de charge le long de leurs berges, les baies de Bourgneuf, de la Freynet ou de l'Aiguillon n'auraient jamais connu la renommée que leur ont donnée leurs huîtres ou leurs moules, le trait du Croisic et les marais de l'île de Ré n'auraient jamais eu la blancheur des mulons de sel, le barrage de la Rance aurait été bien incapable de produire le moindre kilowatt d'électricité et les pêcheurs de coques ou d'ormeaux de l'archipel de Glénan n'auraient jamais eu que des paniers vides à leur retour de pêche.

### Marée et pêche à pied



Les pêcheurs à pied savent mieux que quiconque que les grandes marées basses sont particulièrement propices à de belles pêches aux crustacés.

### Marée et ostréiculture



Les ostréiculteurs travaillent au rythme de la marée. Les tables sur lesquelles sont entreposées les huîtres ne sont accessibles qu'au bas de l'eau.

### Noirmoutier par la route submersible



Le Gois de Noirmoutier n'est praticable qu'à marée basse. Les balises refuges jalonnent son parcours pour ceux qui se feraient surprendre par le retour du flot.

### Une marée à



## LE PHÉNOMÈNE DES MARÉES

### Une marée à Port-Lay



12 h 20. Le petit port de Port-Lay sur l'île de Groix. À marée basse, la mer se retire bien au-delà des jetées de l'entrée, laissant le port complètement asséché. Nous sommes le 2 mars 2010. Ce jour-là, le coefficient de marée était de 116. À 11 h 52, heure de l'étale de basse mer, la hauteur d'eau au-dessus du zéro des cartes n'était que de 0,34 m.



14 h 57. À quelques minutes près, nous sommes à l'heure de la mi-marée. Le petit canot blanc flotte à nouveau en se balançant sur son va-et-vient. À ce stade de la marée montante, la variation du niveau d'eau est importante puisqu'aussi bien dans l'heure précédente que dans l'heure suivante, la mer monte de 1,28 m.



18 h 00. Le bassin est sur le point de déborder ! Mais depuis trois minutes la marée recommence à descendre après avoir atteint une hauteur de 5,46 m. Avec ces grandes marées, les ports sont souvent plus vulnérables... Dans ces conditions et par fort nordet, il est probable que les vagues passeraient par-dessus les jetées en malmenant notre petit canot.

Les plaisanciers qui pianotent sur le clavier de leur ordinateur de bord pour connaître, en un simple clic, la hauteur d'eau dont ils disposeront dans la crique qu'ils convoitent pour passer la nuit doivent se souvenir que cette prouesse est le fruit de travaux et de recherches qui se sont succédé au cours des siècles passés, et cela depuis l'origine de notre civilisation.

## Quand les Anciens apportent du nouveau

Dès l'Antiquité, les hommes prirent conscience de l'existence des marées. Les civilisations les plus avancées, celles des Grecs et des Romains que quelques expéditions avaient poussés au-delà du détroit de Gibraltar, avaient même commencé à échafauder des théories plus ou moins pertinentes. Aristote pensait que les eaux de surface écrasaient les eaux des profondeurs, Platon que la mer entraînait et sortait d'un gouffre. Pline l'Ancien (23-79 après J.-C.), dans les trente-sept volumes de son *Histoire naturelle*, fut le premier à mettre en évidence l'action de la Lune et du Soleil sur les marées, sans pouvoir cependant l'expliquer. Il montra que la mer montait et descendait deux fois entre deux levers de Lune, que les marées ne se produisaient pas au même moment d'un jour à l'autre ; il observa surtout que les fortes et les faibles marées correspondaient aux phases de la Lune.

## Le Moyen Âge, un peu dans la Lune...

Au Moyen Âge, la connaissance scientifique des marées n'évolua pratiquement pas. Les historiens mentionnent le cas du moine anglais John of Wallingford (1195-1214), aussi connu sous le nom de John de Cella, de l'abbaye de Saint Albans, qui, dans un document intitulé *Flod at London bridge*, arrivait à prédire la hauteur de la marée au pied du célèbre pont. D'autres penseurs avancèrent des thèses plus ou moins fantaisistes, mais non dénuées de poésie. On pensait par exemple que les marées étaient dues au souffle de la Lune sur les océans ou à l'expansion de l'eau provoquée par la chaleur de la Lune et du Soleil. Pendant la Renaissance, les travaux de Nicolas Copernic et de Galilée en particulier, qui s'attachèrent à expliquer la rotation de la terre sur elle-même et autour du Soleil, ne firent pas vraiment avancer la compréhension du phénomène des marées. Ils ont néanmoins consolidé le socle de connaissances sur lequel s'appuyèrent les savants du siècle des lumières. Au premier rang desquels le physicien, mathématicien et astronome Isaac Newton qui publia à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle ses travaux sur la gravitation universelle dans son *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Ce fut la première explication réellement sensée sur l'origine des marées. Il montre que cel-

les-ci sont dues à l'attraction exercée sur les océans par la Lune de par sa proximité et par l'attraction du Soleil de par sa masse.

## Pierre Simon de Laplace et la mise en ondes

Comprendre le phénomène était une chose, être capable de le prédire en était une autre. Il faudra attendre les travaux de Pierre Simon de Laplace qui, contrairement à Newton, comprit qu'il fallait raisonner en termes de dynamique des masses d'eau. Une théorie qui lui permit d'expliquer que la force génératrice de la marée se transformait en ondes se propageant dans les océans. Il établit ainsi les calculs (la formule de Laplace) permettant de prédire les marées : un travail remarquable de précision. Que l'on songe que jusqu'en 1992 le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) se référait encore à la formule de Laplace pour établir les annuaires des marées des côtes françaises.

## Du XIX<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle : le tide predictor de lord Kelvin

L'invention du marégraphe en 1831 par Antoine-Marie-Rémy Chazallon a permis de mesurer en continue et avec une grande précision les variations des hauteurs d'eau en un point donné et a révélé l'existence d'oscillations secondaires. Ces premiers relevés effectués notamment à Brest ont fait évoluer la formule de Laplace en méthode harmonique qui marie observations et calculs. Ce travail est l'œuvre de lord Kelvin (William Thomson 1824-1907). Celui-ci montra que la force génératrice de la marée était la somme de forces périodiques (les composantes harmoniques) et inventa une machine à prédire les marées, le « tide predictor », qui permettait de s'affranchir de longs et fastidieux calculs. Cette théorie des harmoniques fut complétée par les travaux de G.H. Darwin et reste aujourd'hui encore la base de tous les calculs de prédiction des marées.

### LA LOI DE L'ATTRACTION UNIVERSELLE

La loi de Newton s'énonce ainsi : deux corps ponctuels de masse  $M$  et  $M'$  s'attirent avec une force  $F$  proportionnelle à chacune des masses, et inversement proportionnelle au carré de la distance  $d$  qui les sépare. Cette force a pour direction la droite passant par le centre de gravité de ces deux corps.

$$F = G \times \frac{M \times M'}{d^2}$$

$M$  = masse du corps  
 $d$  = distance entre les deux corps  
 $G$  = constante de gravitation égale à  $6,67 \times 10^{-11}$

C'est cette force fondamentale qui régit l'Univers et assure la pérennité de notre système solaire. Elle est aussi la force à l'origine du phénomène des marées.



Isaac New



BIBLIOTHÈQUE NATIONALE

## La marée sous la

Sur des orbites situées surface des océans, les (bre 2001) et Jason 2 (l'aujourd'hui le niveau des atteinte. Il s'agit d'un pro tement par le Centre n l'European Organisations Logical Satellites (Eume Space Administration (l Atmospheric Administra L'essentiel de la mission surface des océans avec Les objectifs sont les su - fournir des estimations ographie du relief des - assurer la synthèse du - montrer l'interdépenda gements climatiques ; - mesurer le niveau de la

## LE PHÉNOMÈNE DES MARÉES

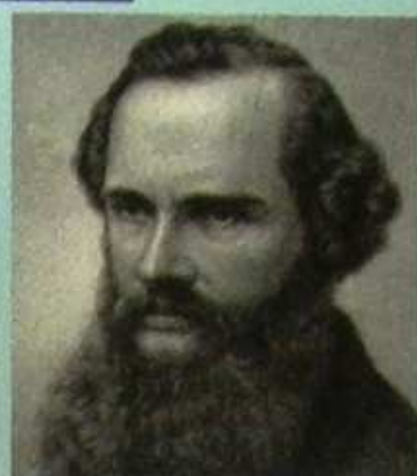
### Les hommes qui ont fait progresser les connaissances



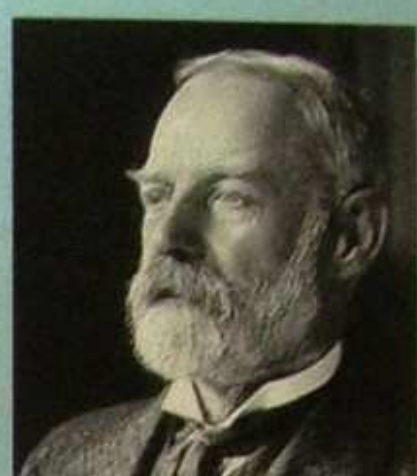
Isaac Newton.



Pierre Simon de Laplace.



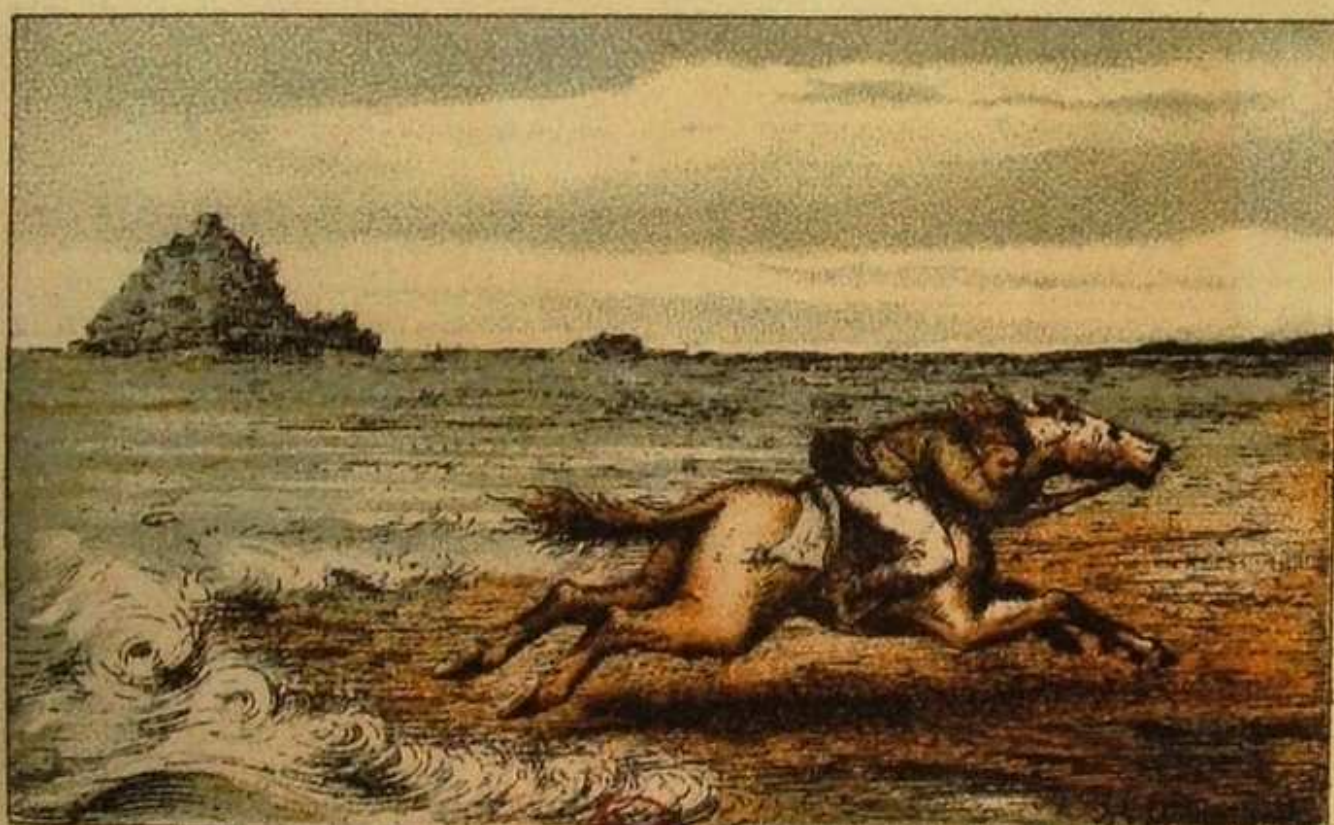
Lord Kelvin.



Georges Darwin.

### La marée et l'imaginaire populaire

#### DRAME DES GRÈVES



La marée envahit avec une telle rapidité ces grèves dangereuses, que le voyageur pressera en vain sa monture pour échapper au péril.

Cette estampe d'Henri-Joseph Dubouchet (1833-1909) illustre le voyageur à cheval pris dans la marée en baie du Mont-Saint-Michel. L'imaginaire populaire a toujours tendance à exagérer et à dramatiser les phénomènes naturels. La marée n'échappe pas à cette règle. La légende qui veut que la mer envahit la baie à la vitesse d'un cheval au galop est bien sûr excessive, même si effectivement plus d'un promeneur s'est laissé surprendre par le rapide retour de la mer sur les fonds de sable plats.

### La marée sous la surveillance des satellites

Sur des orbites situées à quelque 1 300 kilomètres de la surface des océans, les satellites Jason 1 (lancé en décembre 2001) et Jason 2 (lancé en juin 2008) surveillent aujourd'hui le niveau des océans avec une précision jamais atteinte. Il s'agit d'un programme plurinational mené conjointement par le Centre national d'études spatiales (CNES), l'European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (Eumetsat), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

L'essentiel de la mission consiste à mesurer la hauteur de la surface des océans avec une précision quasi millimétrique. Les objectifs sont les suivants :

- fournir des estimations de la hauteur des vagues et une cartographie du relief des océans ;
- assurer la synthèse du système d'altimétrie spatiale ;
- montrer l'interdépendance entre les océans et les changements climatiques ;
- mesurer le niveau de la mer et ses variations.

Ce dernier point autorise la modélisation des marées à l'échelle du globe et non plus uniquement dans l'environnement immédiat des zones côtières. Cette source de données permet de peaufiner les connaissances sur les marées du globe de façon encore plus précise et plus réaliste.



Le satellite Jason 1 en orbite autour de la Terre.

La Lune, le Soleil ainsi que l'ensemble des planètes de notre système solaire sont à l'origine de la force qui engendre la marée. Il paraît donc essentiel de rappeler quelques notions sur ce que l'on appelle la mécanique céleste.

### Le système solaire

D'une façon schématique, le système solaire est un complexe planétaire composé d'une étoile, le Soleil, de neuf planètes principales tournant autour de lui, d'un très grand nombre de comètes et d'une ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter. Certaines de ces planètes ont des satellites en orbite autour d'elles (on en compte 165 dans l'ensemble du système), le plus connu étant la Lune, en orbite autour de la Terre.

De la plus proche à la plus éloignée du Soleil, les planètes sont : Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton. Toutes ces planètes tournent en orbite dans le même sens que la rotation du Soleil, c'est-à-dire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'on les observe depuis la Terre.

Pour le sujet qui nous importe, les marées, toutes les planètes exercent une influence mais seuls la Lune et le Soleil ont une importance prépondérante de part leur masse ou leur proximité de la Terre.

### Fiches d'identité des trois astres

► **La Terre.** Elle est la troisième planète du système solaire, après Mercure et Vénus. Elle tourne autour du Soleil sur une orbite elliptique et, de ce fait, sa distance par rapport à lui varie de 147 à 152 millions de kilomètres.

*Diamètre équatorial : 12 756 kilomètres.*

*Masse :  $5,98 \times 10^{24}$  kilogrammes.*

*Densité : 5,52.*

*Révolution autour du soleil : 365 j, 6 h, 9 min, 9 s (année sidérale).*

*Vitesse de rotation : 23 h, 56 min, 4,1 s (jour sidéral).*

*Distance Terre-Soleil : de 149,5 (périhélie) à 152,1 millions de kilomètres (aphélie).*

► **Le Soleil.** Comme toutes les étoiles, il brille en raison des gaz d'hélium et d'hydrogène qui le composent et qui produisent d'énormes réactions thermonucléaires. En surface, sa température est de l'ordre de 60 000 °C. Le Soleil est au centre de notre système et l'ensemble des planètes tourne autour de lui.

*Diamètre équatorial : 1 392 000 kilomètres.*

*Masse :  $1,99 \times 10^{30}$  kilogrammes.*

*Densité : 1,41.*

► **La Lune.** Notre planète possède un satellite naturel, la Lune, situé à une distance de 384 400 kilomètres. Com-

me la Terre, elle tourne sur elle-même tout en se déplaçant sur une orbite autour de la Terre. La particularité du mouvement de la Lune est que sa période de rotation autour de son axe est exactement la même que sa révolution autour de la Terre : environ 27 jours. Autrement dit, la Lune fait un tour sur elle-même lorsqu'elle fait un tour autour de la Terre. Ceci explique que l'on voit toujours la même face de la Lune et que les hommes ont longtemps échafaudé bien des théories sur la face cachée de la Lune.

*Diamètre équatorial : 3 472 kilomètres.*

*Masse :  $7,35 \times 10^{22}$  kilogrammes.*

*Densité : 3,34.*

*Révolution autour de la Terre : 27 j, 7 h, 43 min, 11 s (révolution sidérale).*

*Vitesse de rotation : 23 h, 56 min, 4,1 s (jour sidéral).*

*Distance Terre-Lune : 384 400 kilomètres en moyenne.*

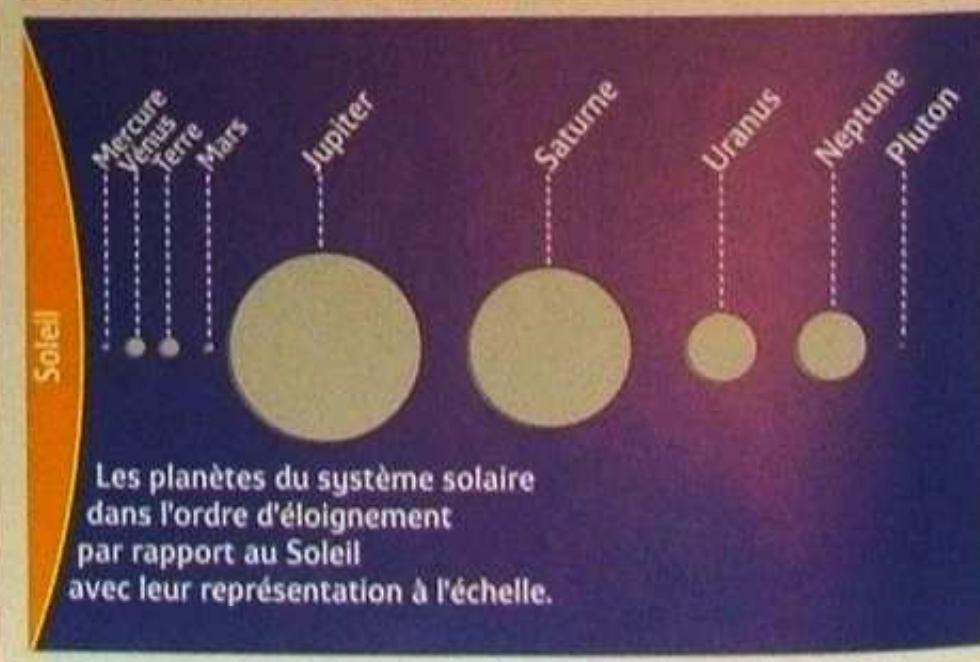
### Mouvement des astres

Les planètes tournent autour du Soleil sur des orbites elliptiques et sont en rotation sur elles-mêmes autour de l'axe de leurs pôles. La Terre accomplit une révolution complète autour du Soleil en une année et sa rotation sur elle-même en une journée. C'est ce dernier mouvement qui nous donne l'impression que le Soleil tourne autour de nous pendant la journée et que la voûte étoilée se déplace au cours de la nuit.

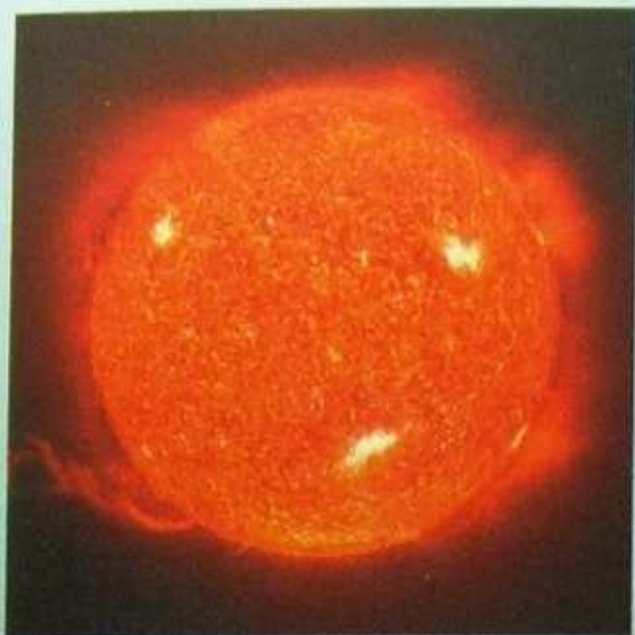
La Lune, qui, rappelons-le, est un satellite de notre planète, est également sur une orbite elliptique autour de la Terre et accomplit sa révolution dans le même temps qu'elle effectue un tour sur elle-même : 27 jours, 7 heures, 43 minutes et 11 secondes.

Nous verrons en étudiant les différents rythmes de la marée que ces données demandent à être précisées et complétées pour élucider certaines particularités.

### L'IMPORTANCE DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE



## Les trois astres les plus influents pour les marées



Le Soleil



La Terre



La Lune

GOOGLE EARTH

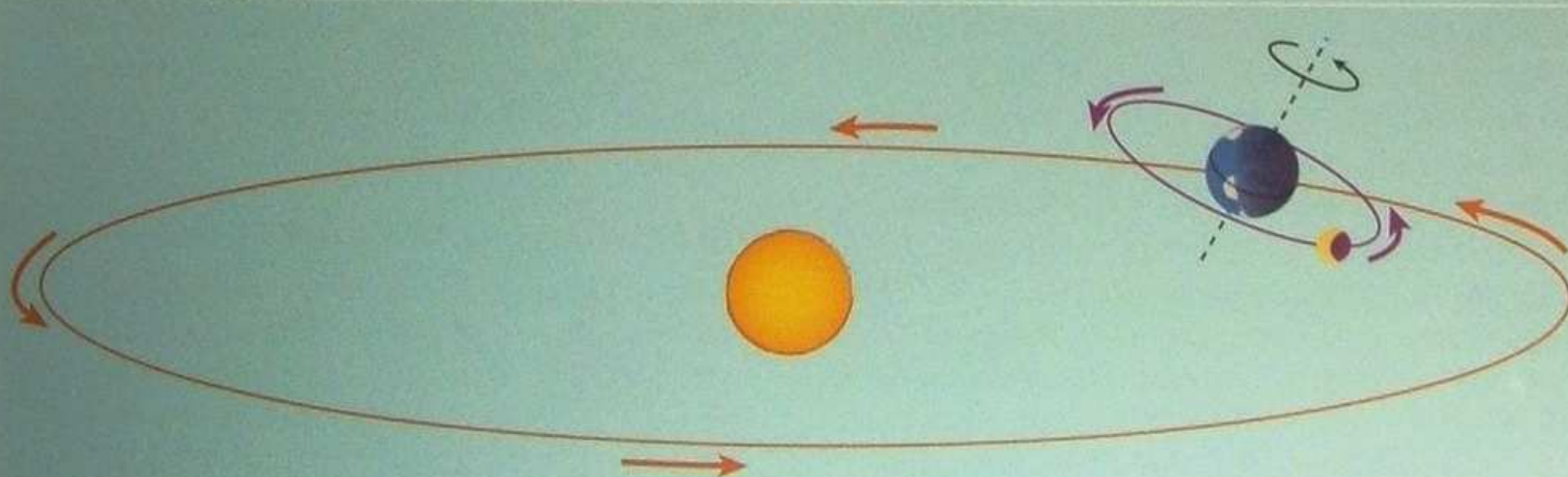
Le Soleil (à gauche) possède un diamètre 109 fois plus important que celui de la Terre (au centre). Sa masse est 330 000 fois celle de la Terre. Les caractéristiques de la Lune (à droite) montre qu'il s'agit d'un astre 4 fois plus petit que la Terre. C'est sa faible distance de la Terre qui lui donne un rôle essentiel dans le phénomène des marées.

## Le système solaire



De gauche à droite : Pluton, Neptune, Uranus, Saturne et ses anneaux, Jupiter, la ceinture d'astéroïdes, le Soleil, Mercure, Vénus, la Terre et sa Lune, et Mars. On distingue également une comète sur la gauche de l'illustration. Cette représentation du système solaire, ne respecte pas les échelles de distance et de taille.

## Mouvement des astres



La Terre tourne autour du Soleil en décrivant une orbite elliptique (orange) en 365 jours, 6 heures et 9 minutes. Elle tourne sur elle-même (en noir) en 23 heures et 56 minutes sur un axe (pôle Nord-pôle Sud) incliné de  $23^\circ$  et  $26'$  par rapport au plan de son orbite autour du Soleil (plan écliptique). La Lune tourne autour de la Terre (en violet) sur une orbite elliptique en 27 jours, 7 heures et 43 minutes.

Pour expliquer la force qui s'exerce sur les océans et qui est à l'origine des marées, il faut prendre en compte deux autres forces auxquelles est soumise notre planète : la force d'attraction universelle et la force centrifuge.

### La force d'attraction universelle

Rappelons (voir page 12) que la loi de l'attraction universelle mise en évidence par Newton peut s'énoncer ainsi : deux astres exercent l'un sur l'autre une force d'attraction proportionnelle à leurs masses respectives et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

$$F = G \times \frac{M \times M'}{D^2}$$

*F est la force d'attraction, M et M' les masses des deux planètes, G la constante de gravitation universelle (= 6,67 x 10<sup>-11</sup>)*

La Terre est essentiellement soumise aux forces d'attraction du Soleil et de la Lune. Les autres planètes étant très éloignées de la Terre, leurs forces d'attraction sont négligeables. Si l'on calcule la force exercée par le Soleil sur la Terre, on s'aperçoit qu'elle est environ 200 fois plus importante que celle exercée par la Lune. Et pourtant, c'est bien celle-ci qui est prépondérante dans les mouvements des marées.

En effet, la distance qui sépare la Terre du Soleil fait que sa force d'attraction est quasiment identique quel que soit l'endroit où l'on se trouve sur la surface du globe. Dans le cas de couple Terre-Lune, le diamètre de la Terre (12756 km) est une donnée non négligeable par rapport à la distance Terre-Lune (384400 km), de sorte que la force d'attraction n'est pas identique en tout point du globe. Ce point est capital pour la force génératrice de la marée.

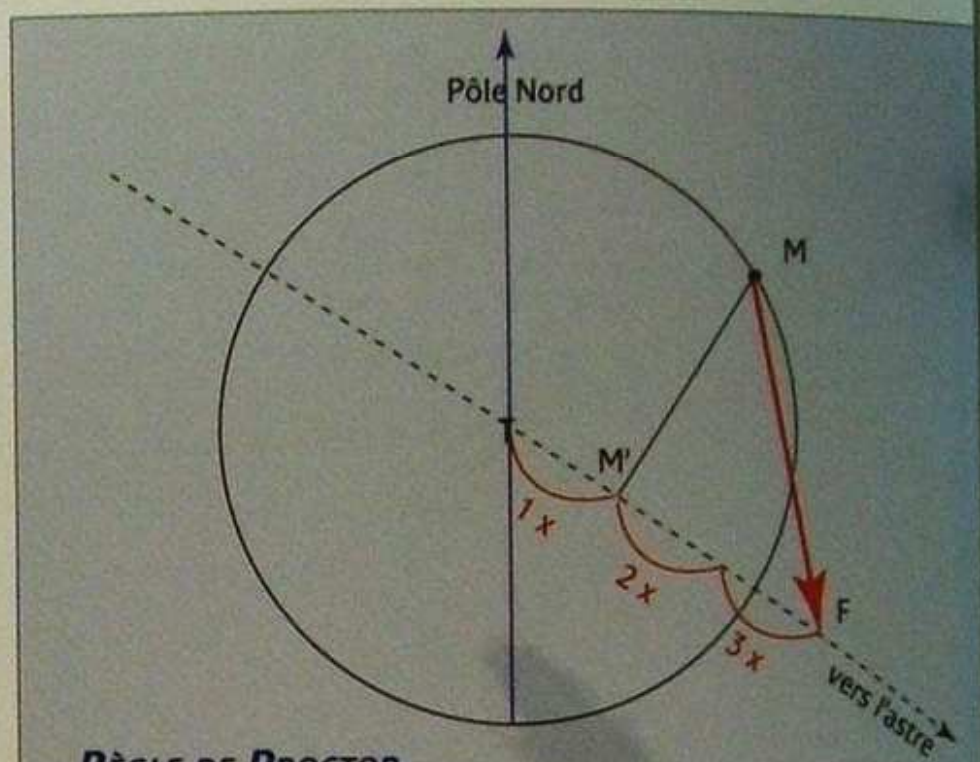
### La force centrifuge

Même si cette notion est aujourd'hui très controversée, on admettra que la force centrifuge (ou force d'inertie) est due au mouvement de rotation de l'ensemble Terre-Lune autour de son centre de gravité. En effet, lorsqu'on dit que la Lune tourne autour de la Terre (en 27 jours et 7 heures environ), il faudrait préciser que l'axe de rotation ne passe pas par le centre de la Terre mais par le centre de gravité Terre-Lune. Ce centre de gravité est situé à 4650 kilomètres du centre de la Terre. En plus de sa rotation autour de l'axe des pôles (en 24 heures) et de sa rotation autour du Soleil (en 1 an), la Terre décrit avec la Lune une rotation autour de leur centre de gravité commun sur un rayon de 4650 kilomètres. C'est ce mouvement qui est à l'origine de la force centrifuge. Force qui est comparable au phénomène que subit un enfant sur un manège lorsqu'il est attiré vers l'extérieur. Sur la Terre, cette force centrifuge est identique en tout point du globe. Si, au centre de

la Terre, elle est exactement opposée à la force d'attraction, ce n'est pas le cas à la surface du globe.

### La force génératrice de la marée

C'est ce déséquilibre entre force d'attraction et force centrifuge qui est à l'origine de la force génératrice de la marée. Celle-ci est égale à la somme vectorielle des deux forces précédentes. La règle de Proctor est une construction géométrique permettant de déterminer la direction et l'intensité de la force génératrice de la marée pour un astre donné (la Lune ou le Soleil).



#### RÈGLE DE PROCTOR

À partir du point M situé à la surface du globe, on abaisse une perpendiculaire sur la droite joignant le centre de la Terre au centre de l'astre considéré ; on obtient le point M'. Sur cette même droite, on reporte 3 fois le segment TM' à partir de T en direction de l'astre. On obtient le point F. Le vecteur MF représente la force génératrice de la marée au point M.

On constate que la force d'attraction de l'astre considéré est supérieure à la force centrifuge lorsque l'astre est au-dessus de l'horizon et légèrement inférieure lorsque l'astre est en dessous de l'horizon. Par rapport au plan perpendiculaire à la direction de l'astre et passant par le centre de la Terre, il en résulte une quasi-symétrie dans la répartition de la force de marée.

### Force et mise en ondes

La force génératrice de la marée est donc due à l'attraction de la Lune et du Soleil. Mais cette force est finalement très faible. Si on la compare à celle de la pesanteur elle est un dix millionième fois plus petite. Au point qu'il faut envisager d'autres raisons pour expliquer l'importance de certaines marées. Ce sont les ondes mises en évidence par la théorie dynamique de Laplace. Les mers et les océans sont mis en mouvements par l'action répétée de la force génératrice de la marée, engendrant des systèmes d'ondes qui interagissent entre eux.



Dans le cas d'une Terre... sur la force exposée à l'as... de gravité engendre une...

#### Force génératrice



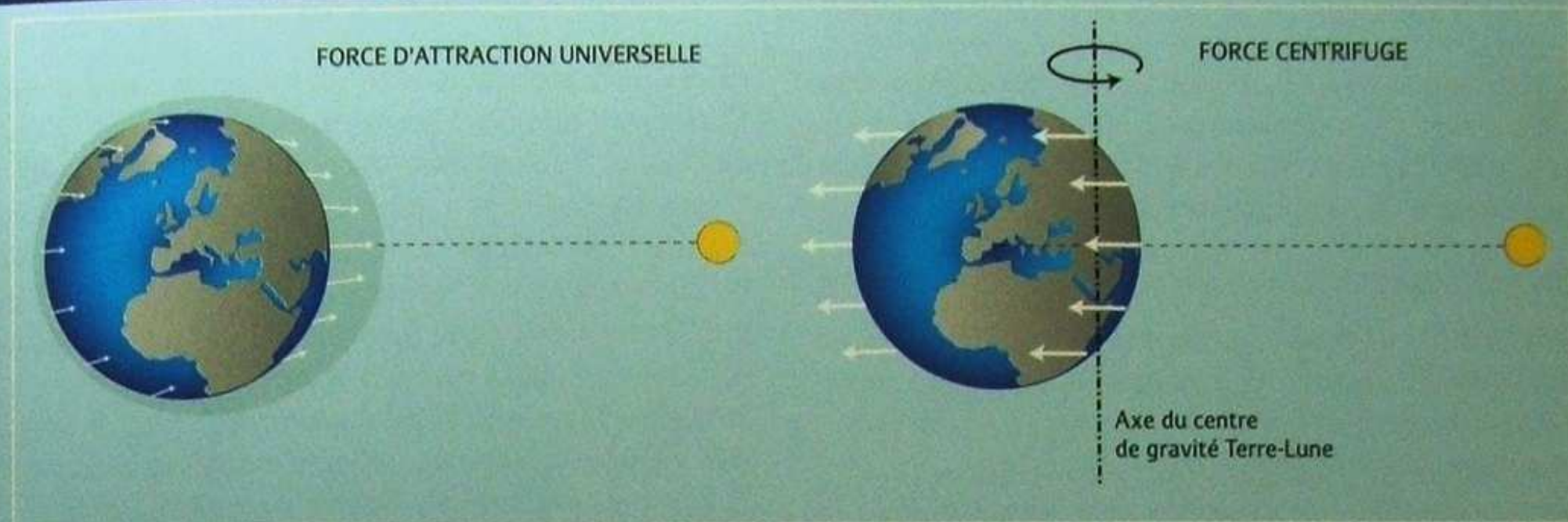
Contrairement au point... s'annulent, en un point... Et reste constante alors

#### Répartition de la

Vers le nord... du point M

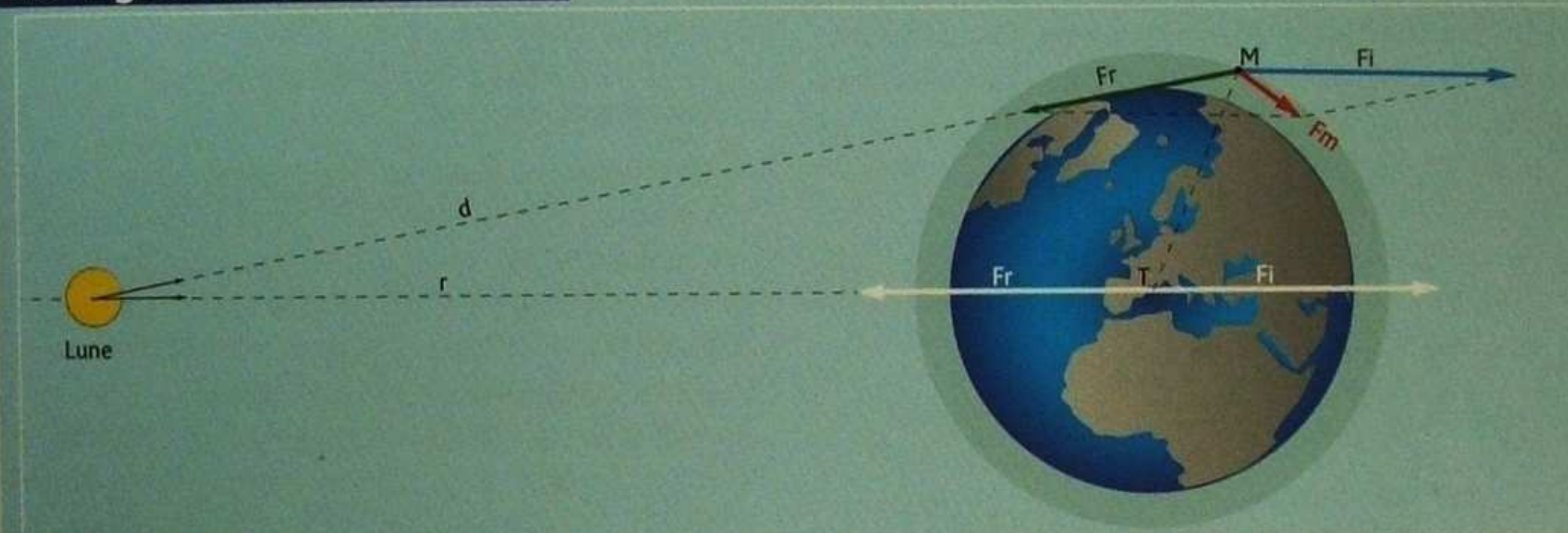
# LE PHÉNOMÈNE DES MARÉES

## Force d'attraction universelle et force centrifuge



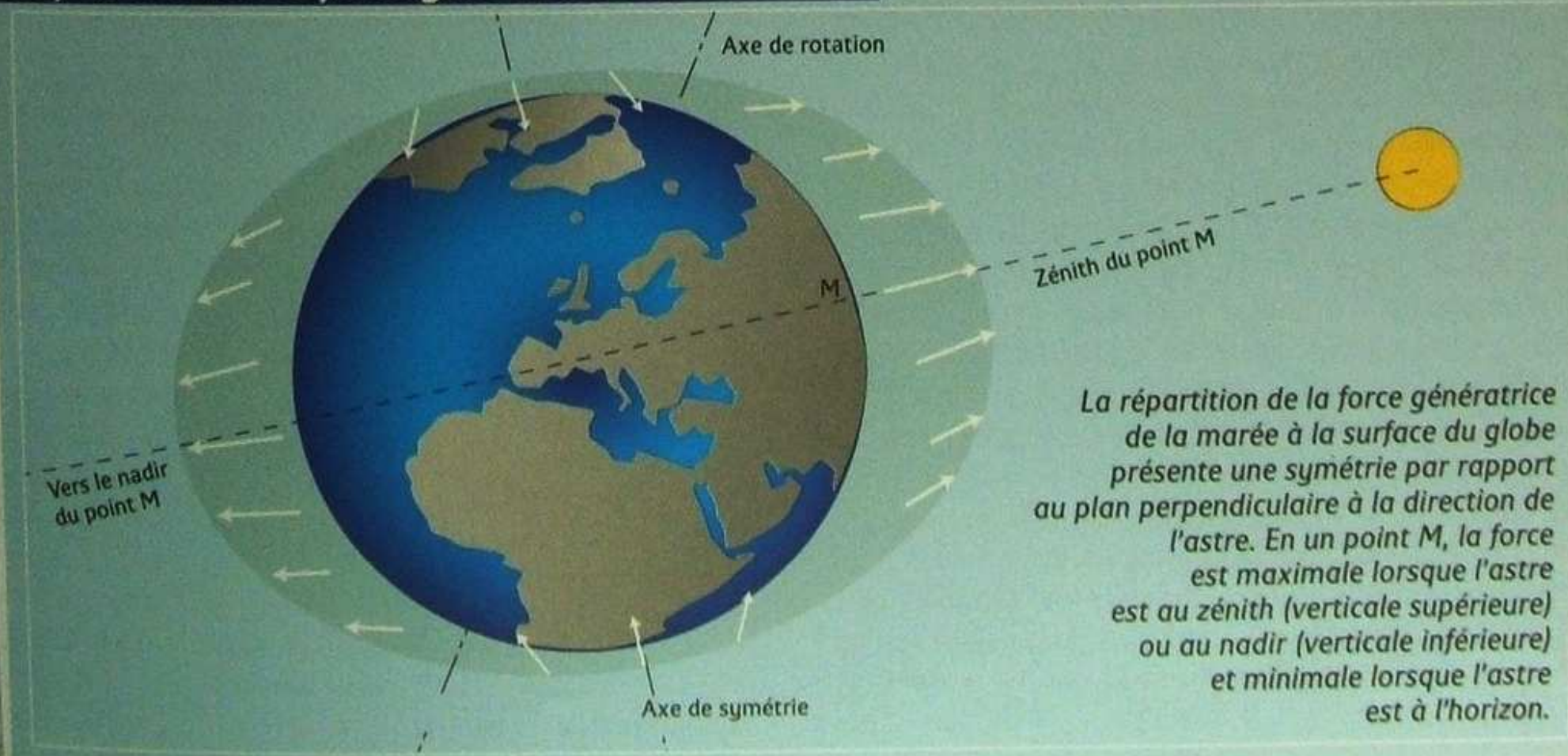
Dans le cas d'une Terre immobile, la force d'attraction universelle serait dirigée vers l'astre avec une intensité maximale sur la face exposée à l'astre et minimale aux antipodes. Mais la rotation de l'ensemble Terre-Lune autour de son centre de gravité engendre une force centrifuge en tout point identique en force et en direction.

## Force génératrice de la marée



Contrairement au point T situé au centre de la Terre où force d'attraction ( $F_r$ ) de la Lune et force centrifuge ( $F_i$ ) s'annulent, en un point M quelconque à la surface du globe, ces deux forces se combinent en force de marée ( $F_m$ ).  $F_r$  reste constante alors que  $F_i$  varie selon que l'astre est au-dessus ou en dessous de l'horizon.

## Répartition de la force génératrice de la marée



La répartition de la force génératrice de la marée à la surface du globe présente une symétrie par rapport au plan perpendiculaire à la direction de l'astre. En un point M, la force est maximale lorsque l'astre est au zénith (verticale supérieure) ou au nadir (verticale inférieure) et minimale lorsque l'astre est à l'horizon.

Nous allons nous intéresser aux marées de nos côtes qui sont dites semi-diurnes, c'est-à-dire avec deux pleines mers et deux basses mers par jour en raison de la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles.

## Caractéristiques des marées semi-diurnes

Le long de nos côtes, on observe au cours d'une même journée que le niveau de la mer atteint deux maximums et deux minimums.

► **Le mouvement vertical : flot, jusant, étale.** On s'aperçoit également que l'eau ne monte pas ou ne descend pas de façon régulière. Lorsqu'on retranscrit ce mouvement sur un graphique, on n'obtient pas une droite mais une courbe de forme sinusoïdale, caractéristique des mouvements ondulatoires. On parle de flot lorsque la mer monte et de jusant lorsqu'elle descend. Lorsque la mer arrive à son maximum ou à son minimum, ce sont les étales (étale de pleine mer ou de basse mer). Entre ces deux extrêmes, la mer monte ou descend en à peu près 6 heures, d'abord doucement, puis le mouvement s'accélère avant de ralentir à nouveau à l'approche de l'autre extrême. On pourrait calculer la hauteur d'eau à n'importe quel moment de la marée en utilisant la formule suivante :

$$H = M \sin^2 \times \frac{90 t}{d}$$

*H étant la hauteur d'eau, M le marnage, t le temps entre l'heure de la PM ou la BM et l'instant donné, d la durée totale de la marée.*

La formule étant un peu compliquée à utiliser en bateau, d'autant que les marins ne sont pas forcément des as de la table trigonométrique, nous verrons que l'on a recours à une méthode simplifiée qu'on appelle la règle des douzièmes (voir page 30).

► **Le marnage.** Le marnage est la dénivellation, ou la différence de hauteur, entre une basse mer et une pleine mer consécutives. Le 10 janvier par exemple, à Dieppe, la hauteur de la pleine mer de l'après-midi était de 9,15 m et celle de la basse mer du soir de 0,90 m. Le marnage pour cette marée était donc de 8,25 m (9,15 - 0,90). Ce marnage varie d'un lieu à un autre et d'une marée à l'autre. En France, c'est en baie du Mont-Saint-Michel que l'on enregistre les plus forts marnages de marée. Ils sont en moyenne de 9 m, mais ils peuvent atteindre 14,5 m en grande vive-eau, c'est-à-dire la hauteur d'un immeuble de 4 étages ! Ces phénomènes extrêmes s'expliquent d'une part par la bathymétrie particulière de la Manche où les fonds sont de faible importance et d'autre part par la présence de la presqu'île du Cotentin forme un goulot d'étranglement au milieu de la Manche. Deux raisons qui freinent la progression de l'onde de marée et qui augmentent les marnages. Le record mondial se trouve dans la baie de Fundy, en Nouvelle-Écosse (Canada), où les marnages peuvent atteindre 18,5 m !

► **Les coefficients de marée.** La notion de coefficient de marée a été introduite par les hydrographes au XIX<sup>e</sup> siècle. Ces coefficients permettent de connaître facilement et rapidement l'importance d'une marée à un jour donné. Il s'agit d'un nombre théorique, sans unité, qui varie entre 20 et 120 et ne s'applique qu'aux marées semi-diurnes. Il est calculé pour Brest en divisant le marnage par 6,10, nombre choisi pour que le coefficient soit égal à 100 lorsque la Lune et le Soleil passent par le plan de l'équateur. Les coefficients ainsi calculés s'échelonnent entre 20 et 120. Les coefficients de référence sont les suivants :

*120 : pour les plus grandes marées connues (vive-eau maximale) ;*

*95 : pour une marée de vive-eau moyenne ;*

*70 : pour une marée moyenne (limite entre vive-eau et morte-eau) ;*

*45 : pour une marée de morte-eau moyenne ;*

*20 : pour les plus petites marées connues (morte-eau maximale).*

Nous verrons que le coefficient de la marée est une donnée importante pour établir un calcul de marée pour un port donné car l'annuaire des marées y fait référence. Il en est de même pour les courants dont les données font généralement référence à ces deux périodes de marée.

Le coefficient de la marée n'est qu'une approximation et sa corrélation avec les hauteurs d'eau de la marée n'est pas systématique. On peut s'étonner, par exemple, que pour un même coefficient, les hauteurs d'eau à pleine mer pour un port donné ne soient pas tout à fait les mêmes. Ceci s'explique par le fait que le calcul du coefficient ne prend en compte que des ondes semi-diurnes (celles de la Lune et du Soleil) alors que le calcul des hauteurs d'eau que l'on trouve dans l'annuaire des marées prend en compte, en plus, d'autres ondes de type diurne dont les effets sur la marée sont mineurs mais qui aboutissent cependant à ces petites différences.

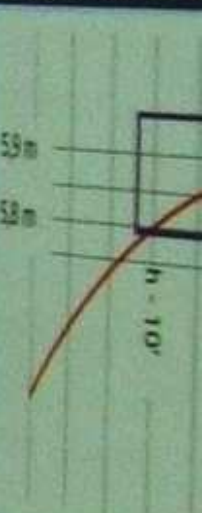
## Horaires : le décalage quotidien

D'un jour à l'autre on constate que les pleines mers ou les basses mers n'ont pas lieu au même moment : elles se décalent de 50 minutes environ. Ceci s'explique par le fait que le gonflement de l'onde de marée est maximum lorsqu'il est situé sur l'axe Terre-Lune. Or, pendant que la Terre tourne sur elle-même en environ 24 heures, la Lune s'est légèrement déplacée puisqu'elle tourne autour de la Terre en un peu plus de 27 jours. Ce décalage de la Lune est en moyenne de 13° 10'. Pour le combler la Terre doit encore tourner pendant 50 minutes. C'est ce que les astronomes appellent le jour lunaire. Mais ces 50 minutes ne sont qu'une moyenne. Le décalage peut être tantôt plus tantôt moins, car l'orbite de la Lune étant une ellipse, la vitesse de l'astre varie. La Lune va plus vite lorsqu'elle est à son périhélie que lorsqu'elle est à son apogée.



Courbe des marées semi-diurnes

### Le moment de l'étalement



L'étalement est le moment où la hauteur de la mer est à 15 à 20 minutes avec le maximum.

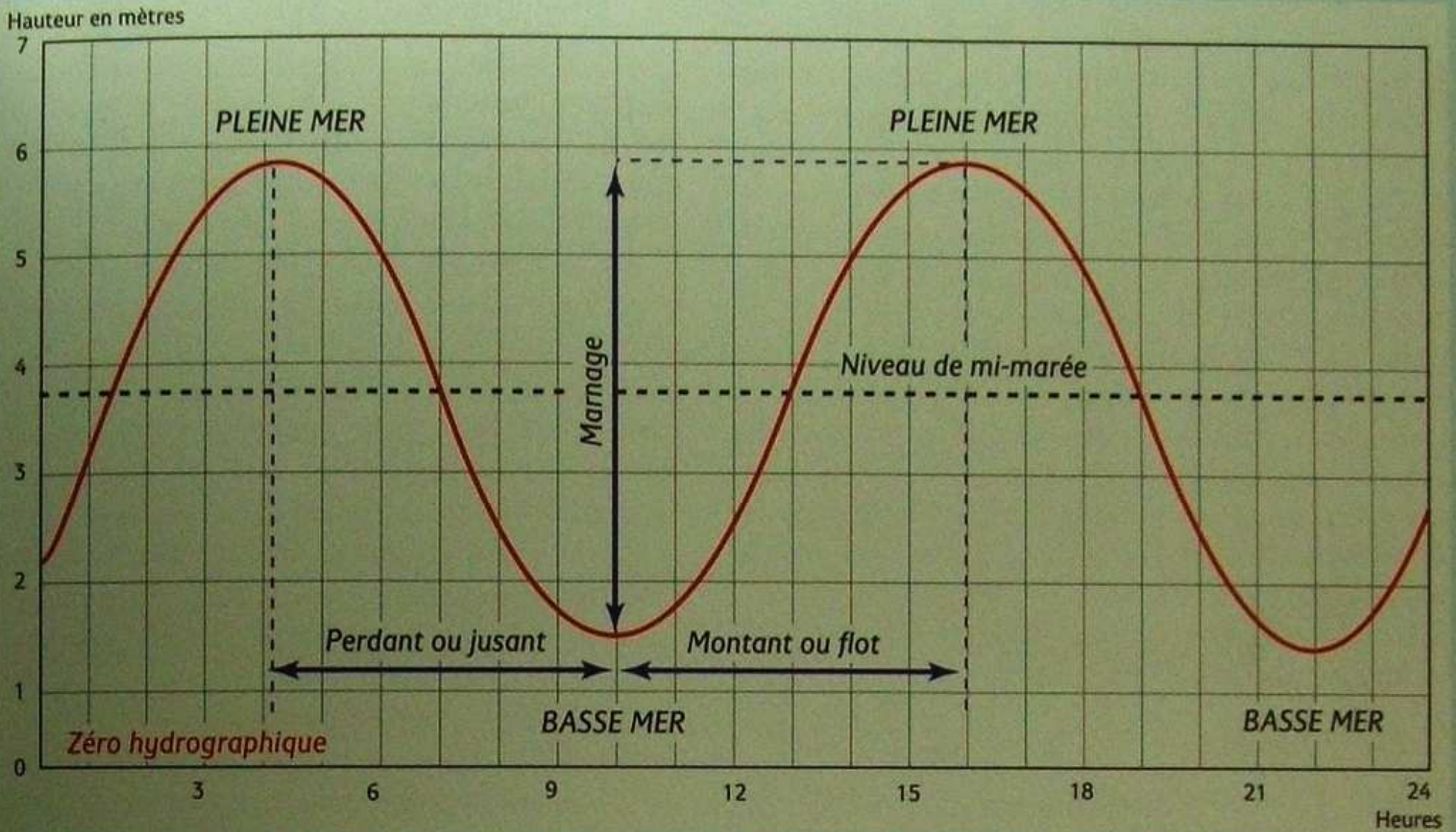
### Le jour lunaire



Pendant que la Terre tourne sur elle-même, la Lune se déplace. Pour que la Lune se retrouve à son positionnement initial, la Terre doit tourner un peu plus.

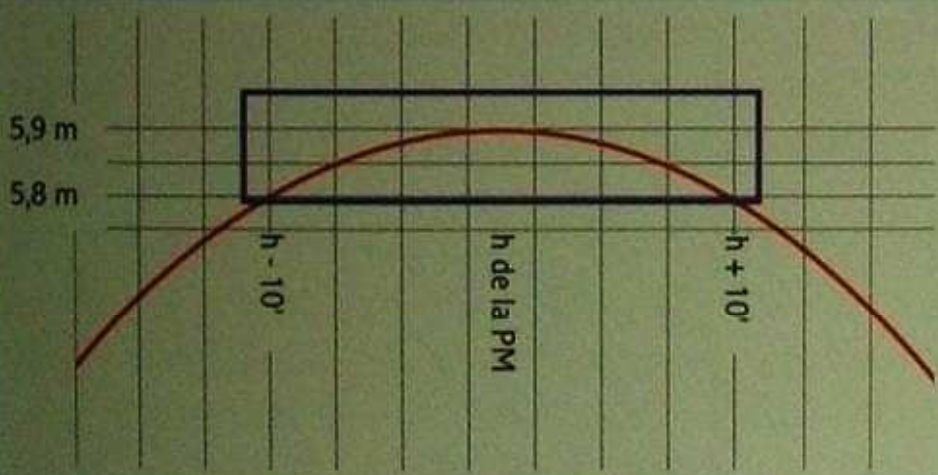
# LE PHÉNOMÈNE DES MARÉES

## Courbe journalière d'une marée semi-diurne



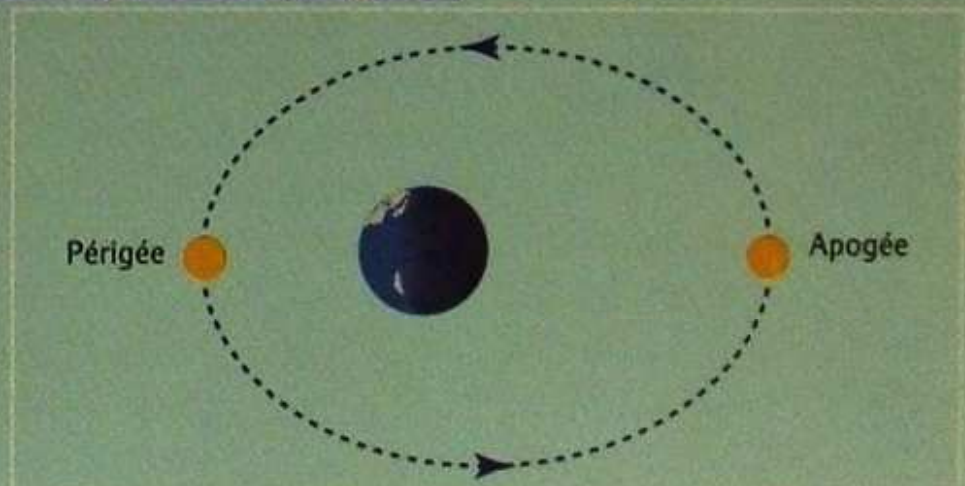
Courbe des marées semi-diurnes telles qu'on en connaît le long des côtes de France au cours d'une journée entière.

### Le moment de l'étale



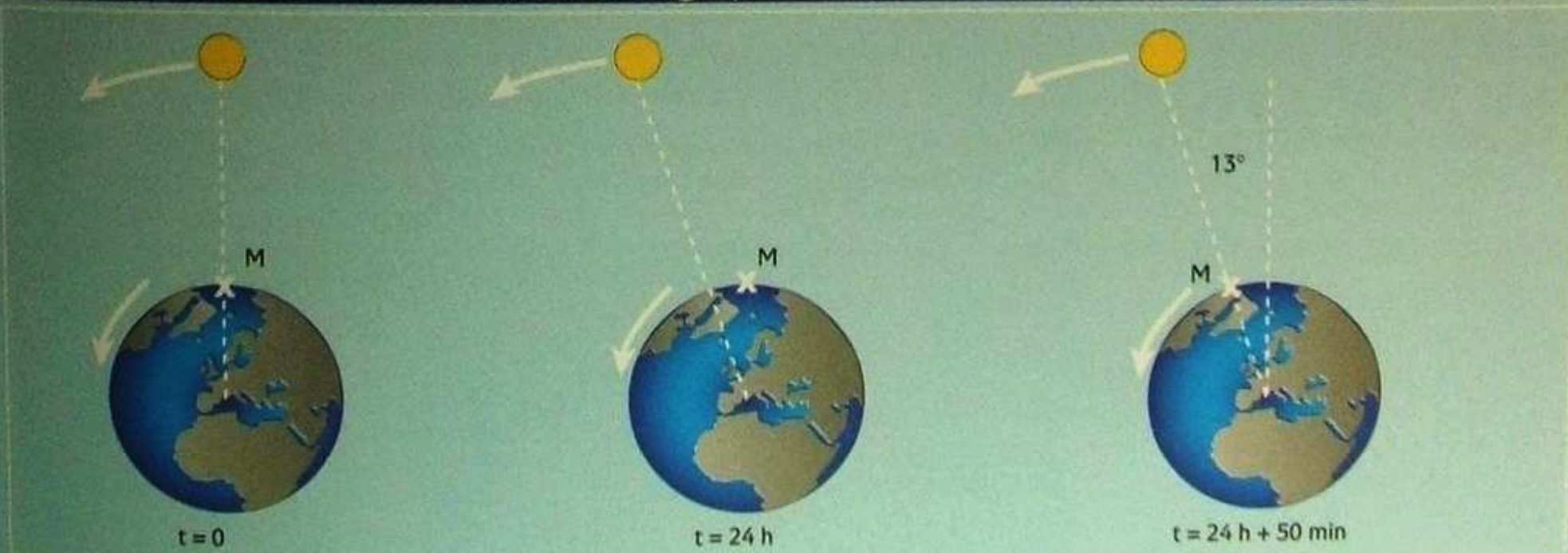
L'étale est le moment où la marée s'inverse. Elle dure de 15 à 20 minutes avec des différences de niveau très faibles.

### Périgée et apogée



À cause de son orbite elliptique, la Lune tourne plus vite lorsqu'elle est en périgée qu'en apogée.

### Le jour lunaire : les raisons du décalage journalier des heures des marées



Pendant que la Terre tourne sur elle-même en un jour, la Lune se déplace sur son orbite autour de la Terre de  $1/28^{\circ}$  de tour. Pour que la Lune se retrouve à la verticale du point M, la Terre doit encore tourner de  $13^{\circ}$ , soit en moyenne pendant 50 min.

## Rythme mensuel

**A**u cours d'un mois, en un même lieu, on constate que les marnages varient sensiblement. De jour en jour, il y a des moments où la mer monte plus haut et descend plus bas et d'autres périodes où elle monte de moins en moins haut et descend de moins en moins bas. Ainsi l'importance des marnages d'une marée à l'autre évolue dans un sens ou dans un autre. Avec des mots plus savants, on dit que le revif est la période pendant laquelle les marnages sont en augmentation. On passe d'une période de mortes-eaux à une période de vives-eaux : les coefficients de la marée augmentent de jour en jour. A contrario, lorsque les marnages des marées sont en diminution, on parle de période de déchet. De marées de vives-eaux, on passe à des marées de mortes-eaux ; les coefficients sont en baisse. L'explication est encore une fois dans le mouvement des trois astres, Terre, Lune et Soleil.

### Le mois lunaire

En observant plus attentivement, on relève que le temps qui sépare une période de vives-eaux d'une période de mortes-eaux est sensiblement de 7 jours, de sorte qu'il y a deux périodes de vives-eaux et deux périodes de mortes-eaux par mois. Ceci s'explique par le mouvement de la Lune autour de la Terre. On sait que pour accomplir cette révolution il lui faut 27 jours 7 heures et 43 minutes. Mais pendant ce temps, la Terre s'est déplacée sur son orbite autour du Soleil (d'environ  $27^\circ$ ). Pour rattraper ce retard et se retrouver dans la même configuration qu'au départ par rapport au Soleil et à la Terre, la Lune doit tourner encore de  $29^\circ$  ( $27^\circ + 2^\circ$  correspondant au nouveau déplacement de la Terre pendant les  $27^\circ$ ). Au total elle mettra 29 jours 12 heures, 44 minutes et 2 secondes pour retrouver sa position initiale. C'est ce que les astronomes appellent la révolution synodique ou mois lunaire. C'est ce temps qui doit être pris en compte pour le rythme mensuel des marées.

### Les phases de la Lune

Au cours de cette révolution synodique, les positions respectives du Soleil, de la Terre et de la Lune varient de jour en jour. Ceci explique d'une part les changements apparents de la Lune (toute ronde, en croissant...) et d'autre part les

modifications de l'importance des marées puisque les forces d'attraction de la Lune et du Soleil sur les masses d'eau de la Terre varient elles aussi en fonction de la position des astres. Dans cette révolution de la Lune autour de la Terre, on distingue quatre phases remarquables.

► **La nouvelle Lune** : Soleil, Lune et Terre sont alignés. C'est la phase où la Lune est toute noire et pratiquement invisible de la Terre.

► **Le premier quartier** : Soleil, Lune et Terre forment un angle droit. C'est la phase où nous ne voyons que le croissant droit de la Lune.

► **La pleine Lune** : Soleil, Terre et Lune sont alignés. C'est la phase où nous voyons la Lune parfaitement éclairée.

► **Le dernier quartier** : Soleil, Lune et Terre forment un angle droit. C'est la phase où nous ne voyons que le croissant gauche de la Lune.

Lorsque les trois astres sont alignés (nouvelle Lune et pleine Lune), on parle de syzygie. Les forces d'attraction de la Lune et du Soleil s'ajoutent : pour les marées, ce sont des périodes de vives-eaux.

Lorsque les trois astres forment un angle droit (premier et dernier quartier), on parle de quadrature (quadrature Est pour le premier quartier et quadrature Ouest pour le dernier quartier). Les forces d'attraction de la Lune et du Soleil se contrarient : pour les marées, ce sont des périodes de mortes-eaux.

### L'âge de la marée

En théorie, en phase de vives-eaux, la plus grande marée observée devrait correspondre au moment exact de la syzygie. De même, en période de mortes-eaux, la plus petite marée devrait correspondre au moment de la quadrature. Dans les faits, on remarque qu'il y a toujours un léger décalage. Par exemple, au début de l'année 2010, la pleine lune (alignement Soleil, Terre, Lune) avait lieu le 30 janvier à 6 h 18. Or on a constaté que le coefficient de marée le plus élevé (112) a eu lieu le 1<sup>er</sup> février, soit deux jours plus tard. Ce décalage, appelé « âge de la marée », est en moyenne de 36 heures sur les côtes françaises. Il est essentiellement dû aux obstacles (continents, îles...) que rencontre l'onde marée dans sa progression.

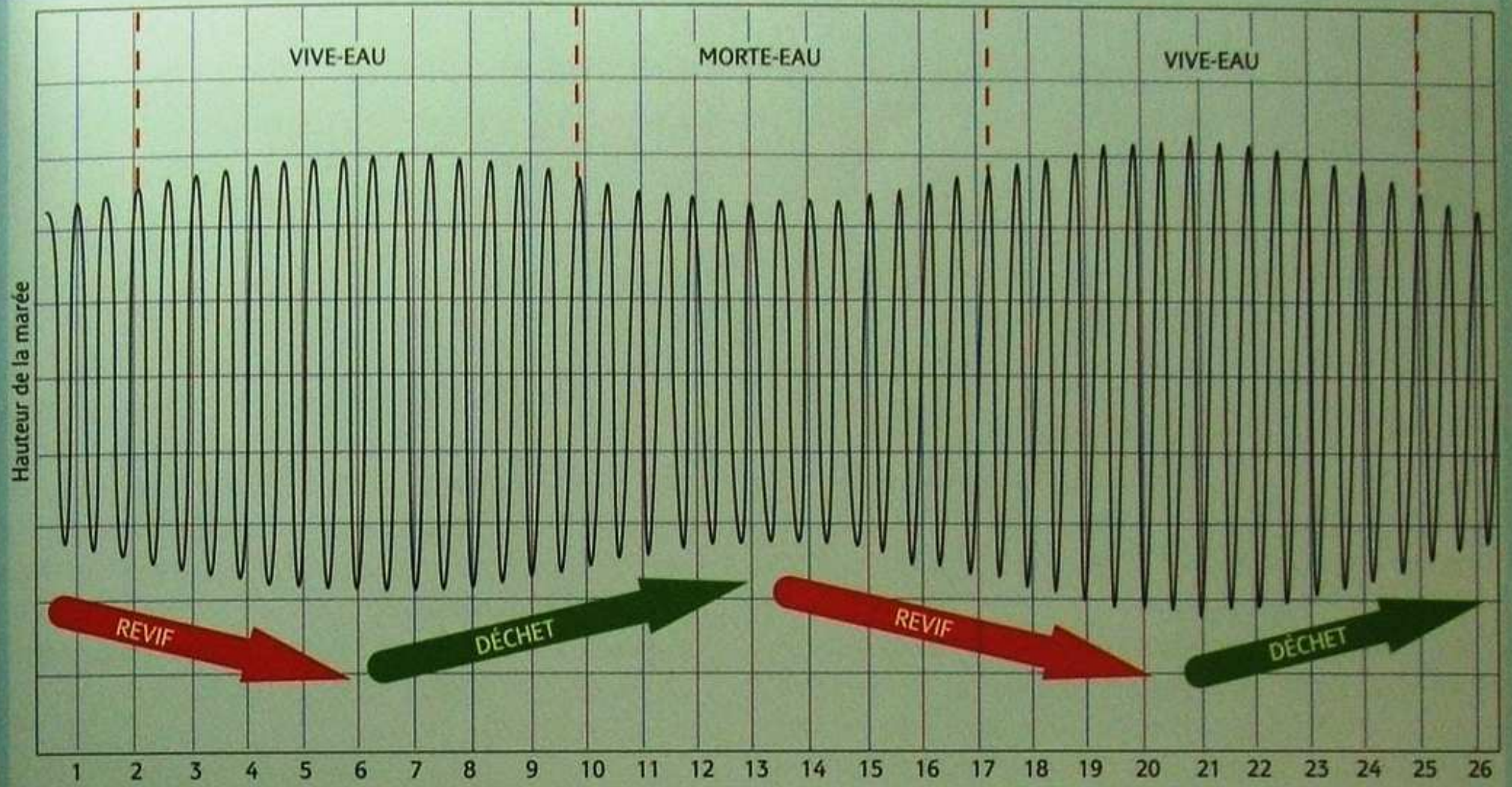
#### La révolution synodique de la Lune

Pour compenser le déplacement de la Terre sur son orbite autour du Soleil, la Lune doit accomplir un tour complet autour de la Terre ( $360^\circ$ ) et  $29^\circ$  de plus. Elle se retrouve alors dans la même configuration qu'au départ par rapport à la Terre et au Soleil. C'est ce que l'on appelle le mois synodique. Il est égal à 29 jours, 12 heures et 44 minutes. Les  $29^\circ$  correspondent au déplacement de la Terre sur son orbite pendant ce même laps de temps. C'est sur ce mois synodique que se rythme l'alternance, en rapport avec les phases de la Lune, des périodes de vives-eaux et de mortes-eaux.



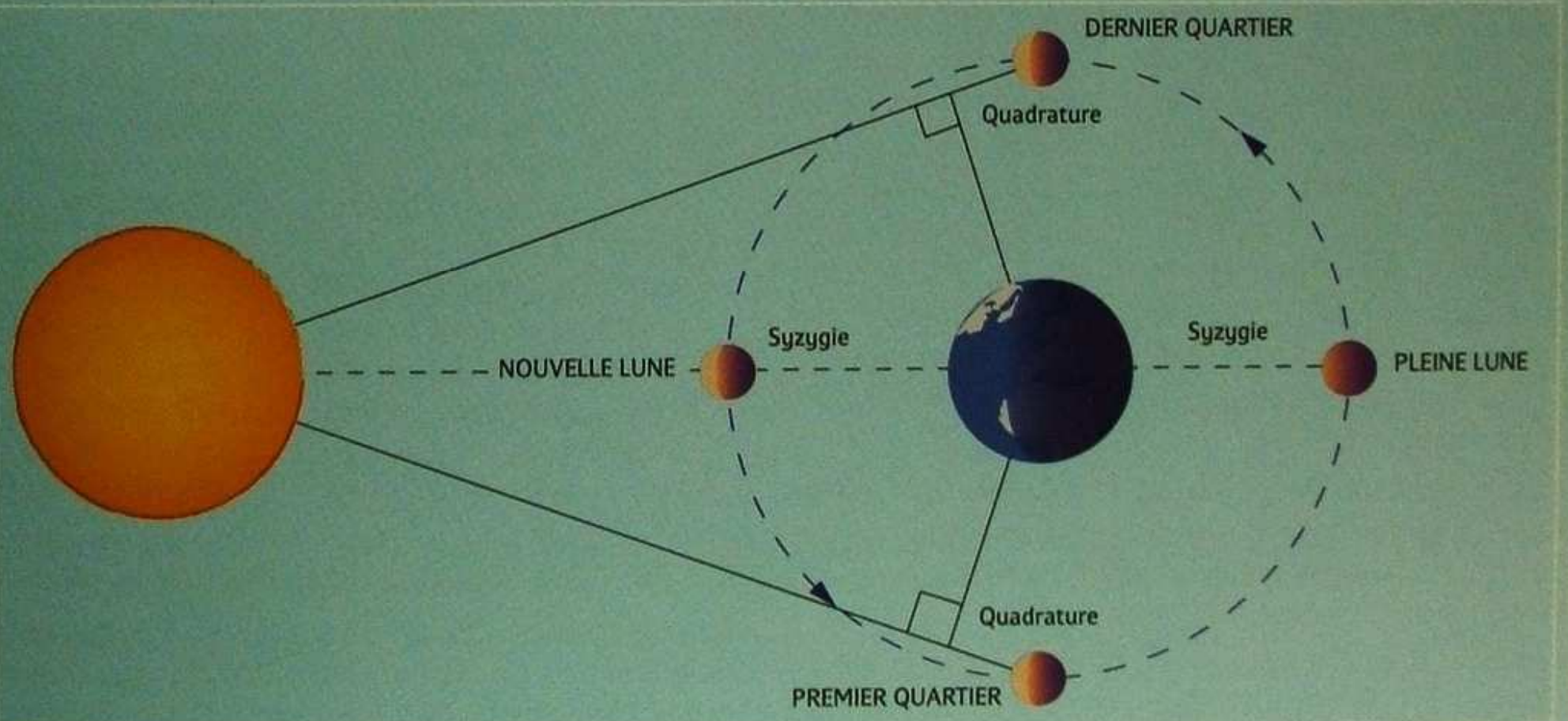
# LE PHÉNOMÈNE DES MARÉES

## La courbe mensuelle des marées



Courbe de la marée sur un mois avec les successions des périodes de vives-eaux et de mortes-eaux.

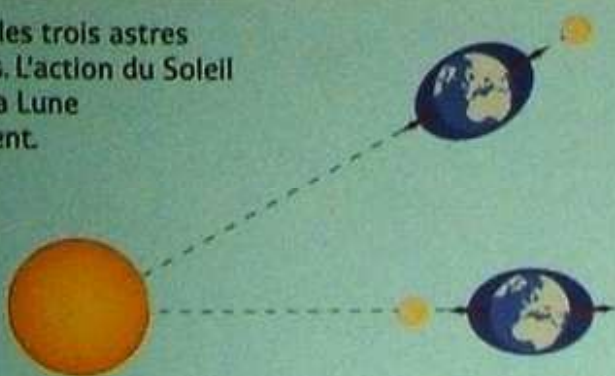
## Les phases de la Lune



Les phases de la Lune au cours de sa révolution autour de la Terre. Elles se succèdent à environ une semaine d'intervalle.

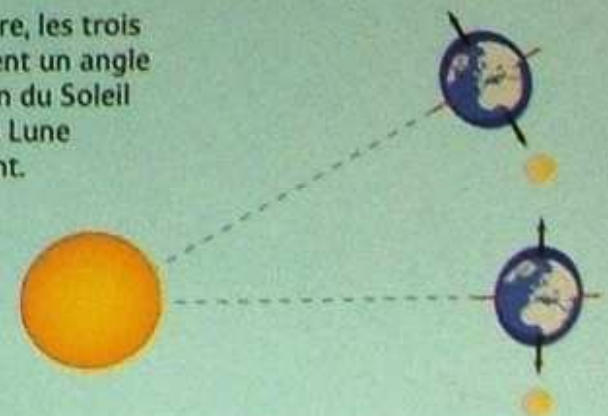
### La force d'attraction en syzygie

En syzygie, les trois astres sont alignés. L'action du Soleil et celle de la Lune s'additionnent.



### La force d'attraction en quadrature

En quadrature, les trois astres forment un angle droit. L'action du Soleil et celle de la Lune se contrarient.



Nous avons déjà vu que les vives-eaux correspondent au moment où les astres sont en syzygie et les mortes-eaux à celui où ils sont en quadrature. Mais l'on constate aussi que sur une année entière il y a deux périodes de très grandes vives-eaux et deux périodes de très grandes mortes-eaux qui correspondent respectivement aux équinoxes de mars et de septembre et aux solstices de juin et de décembre.

### Équinoxes et solstices

Ceci s'explique par le fait que l'attraction du Soleil est maximale lorsqu'il se trouve dans le plan de l'équateur (les équinoxes) et minimale lorsqu'il est le plus éloigné de ce plan (les solstices).

► **Petit rappel d'astronomie.** En tournant autour du Soleil, la Terre décrit une orbite elliptique qui forme ainsi un plan (plan de l'écliptique). La Terre étant inclinée sur son axe de rotation (celui des pôles), le plan de l'équateur n'est pas parallèle au plan de l'écliptique. Ces deux plans se coupent selon une droite dite « ligne des équinoxes ». Lorsque la position de la Terre sur son orbite est telle que le Soleil passe à la fois par le plan de l'écliptique et par le plan de l'équateur, ce sont les équinoxes. Ceux-ci se produisent le 20 ou le 21 mars et le 22 ou le 23 septembre de chaque année (les durées du jour et de la nuit sont alors quasiment identiques quel que soit l'endroit où on se trouve à la surface du globe). Lorsque la position du Soleil est la plus éloignée du plan de l'équateur, ce sont les solstices. Ils ont lieu le 22 ou 23 décembre et 22 ou 23 juin. La déclinaison, c'est-à-dire l'angle formé par la droite joignant le centre de la Terre au centre de l'astre (ici le Soleil) et le plan de l'équateur, varie de plus à moins  $23^{\circ} 27'$ .

► **Marées de solstices :** lorsque l'angle est à ces maximums, c'est-à-dire aux solstices, la force d'attraction du Soleil est minimale. Les marées de vives-eaux sont faibles et celles de mortes-eaux sont fortes.

► **Marées d'équinoxe :** lorsque la déclinaison du Soleil est égale à  $0^{\circ}$ , ce qui arrive deux fois dans l'année au moment des équinoxes, la force d'attraction du Soleil est maximale.

Ceci explique le renforcement des marées de vives-eaux et l'affaiblissement des marées de mortes-eaux à ces périodes de l'année.

### Périhélie et aphélie

Rappelons que la force d'attraction universelle dépend de la masse de l'astre et de sa distance à la Terre. On sait que dans sa rotation autour du Soleil, la Terre décrit une ellipse dont l'un des foyers est le centre du Soleil. Dès lors, la distance de la Terre au Soleil varie au cours de cette révolution. Elle est minimale aux alentours du 3 janvier et atteint 147 094 000 kilomètres. La Terre est alors en périhélie. Elle est maximale aux alentours du 3 juillet et atteint 152 095 000 kilomètres. La Terre est alors en aphélie. La variation de la force d'attraction universelle entre ces deux extrêmes est de l'ordre de 10 %. Les marées de vives-eaux du début janvier se trouvent donc renforcées. Aux équinoxes de mars et de septembre, la distance de la Terre au Soleil renforce encore les marées de vives-eaux alors qu'aux solstices de juin et de décembre elle les minimise.

Le passage de la Terre au périhélie et à l'aphélie varie très légèrement d'une année sur l'autre en raison de la variation d'orientation de l'axe de la Terre (précession des équinoxes). Voici les dates et heures de passage de la Terre à l'aphélie et au périhélie pour les 10 prochaines années :

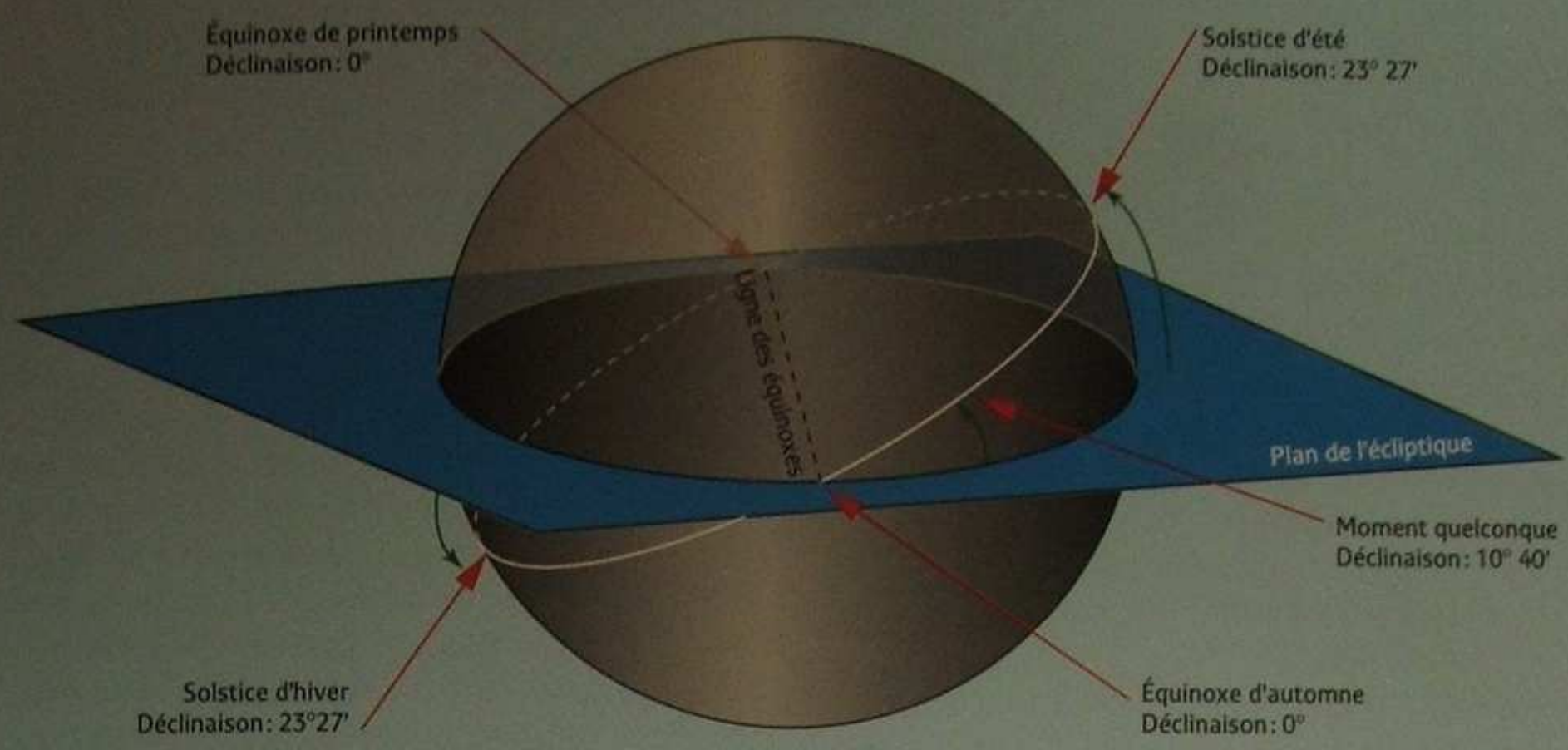
ANNÉE	PÉRIHÉLIE	APHÉLIE
2010	3 janvier à 00 h 00	6 juillet à 11 h 00
2011	3 janvier à 19 h 00	4 juillet à 15 h 00
2012	5 janvier à 00 h 00	5 juillet à 03 h 00
2013	2 janvier à 05 h 00	5 juillet à 15 h 00
2014	4 janvier à 12 h 00	4 juillet à 00 h 00
2015	4 janvier à 07 h 00	6 juillet à 19 h 00
2016	2 janvier à 23 h 00	4 juillet à 16 h 00
2017	4 janvier à 14 h 00	3 juillet à 20 h 00
2018	3 janvier à 06 h 00	6 juillet à 17 h 00
2019	3 janvier à 05 h 00	4 juillet à 22 h 00
2020	5 janvier à 08 h 00	4 juillet à 12 h 00

### La précession des équinoxes

La précession des équinoxes est le lent changement de direction de l'axe de rotation de la Terre qui décrit un cône en tournant comme une toupie dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en un peu moins de 26 000 ans. Il s'agit d'un véritable effet boomerang, puisque le phénomène est dû aux marées elles-mêmes. Le renflement des masses d'eau situées à l'équateur crée un déséquilibre qui tend à déplacer l'axe des pôles.

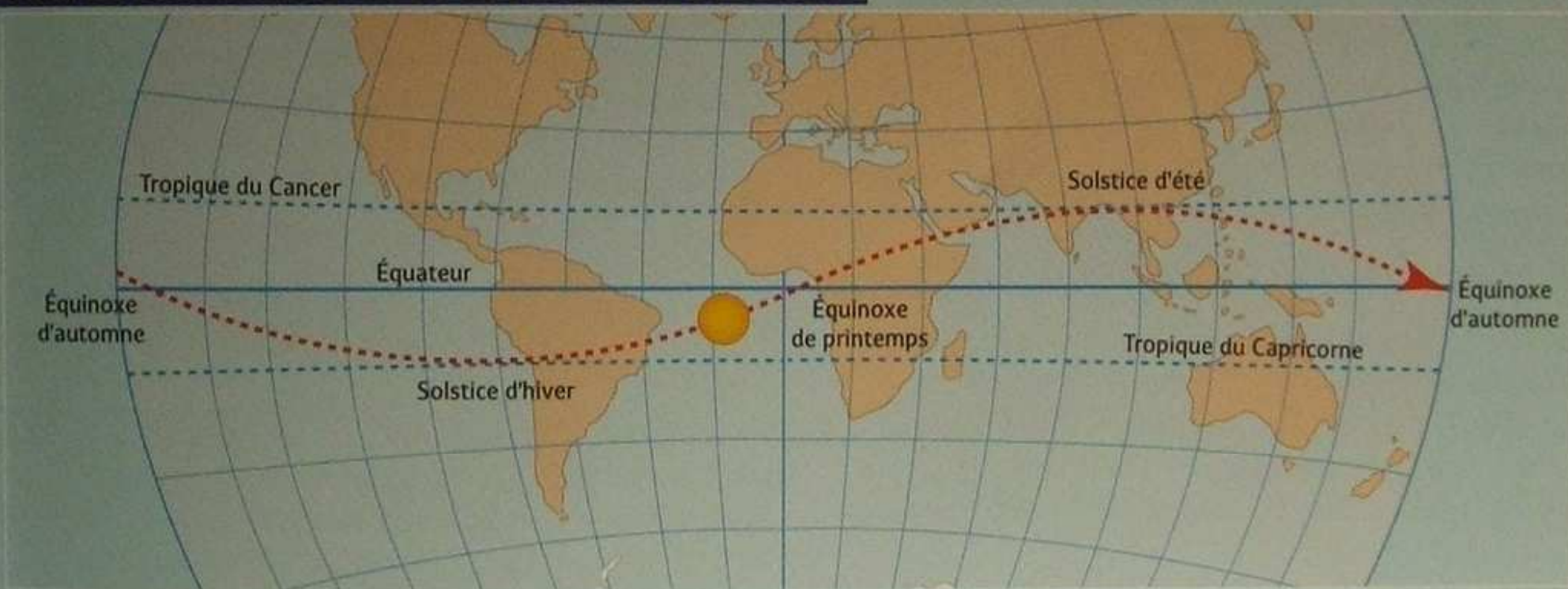
# LE PHÉNOMÈNE DES MARÉES

## Équinoxes, solstices et variations de la déclinaison du Soleil



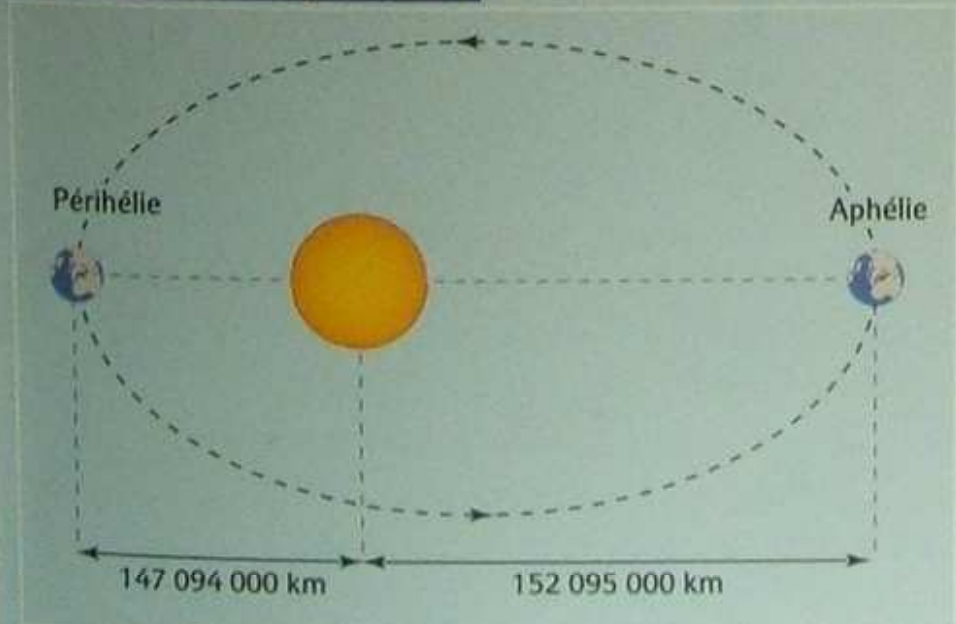
Le plan de l'équateur terrestre n'est pas parallèle au plan de l'écliptique en raison de l'obliquité de l'axe des pôles. Au cours de la révolution de la Terre autour du Soleil, ce dernier passe deux fois par la ligne des équinoxes.

## Courbe sinusoïdale de la déclinaison du soleil



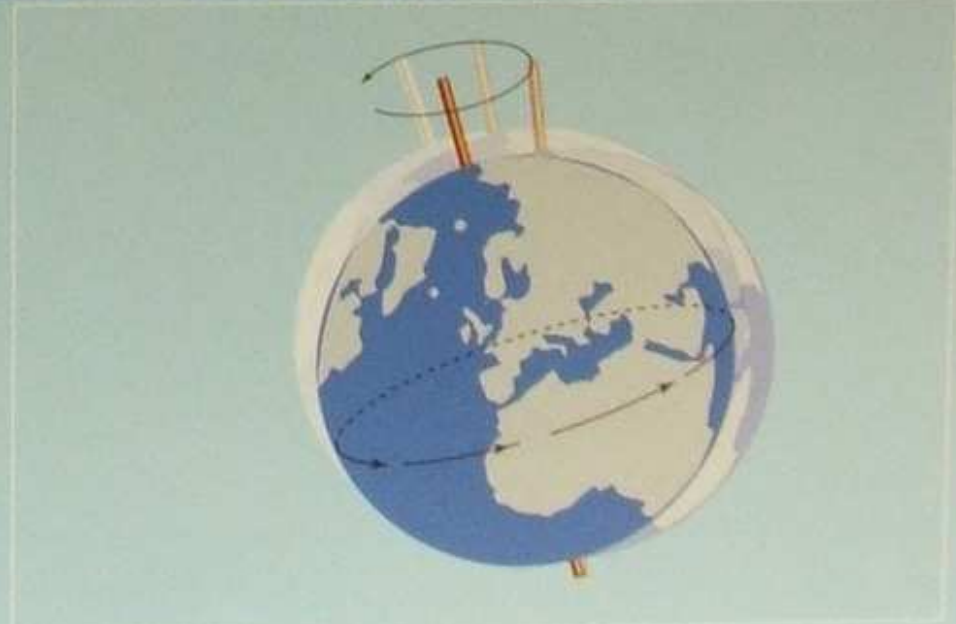
Ce planisphère montre le « trajet » sinusoïdal de la déclinaison du Soleil de part et d'autre de l'équateur, entre le tropique du Cancer au Nord et le tropique du Capricorne au Sud. Environ trois mois s'écoulent entre équinoxe et solstice.

## Périhélie et aphélie



Sur son orbite autour du Soleil, la Terre n'est pas toujours à la même distance de celui-ci.

## Précession des équinoxes



L'axe des pôles décrit un cône dont le sommet est le pôle Sud. Il tourne sur une période de 26 000 ans environ.

Les marées que nous connaissons sur les côtes de France ne sont pas celles que l'on rencontre en d'autres points du globe. L'évolution des hauteurs d'eau peut avoir des caractéristiques différentes.

### D'autres rythmes

On distingue ainsi quatre types de marées.

- **Marées semi-diurnes.** C'est de loin le cas le plus fréquent. Chaque jour, on observe deux pleines mers et deux basses mers qui ont sensiblement la même amplitude. Ce sont celles des côtes de France, auxquelles on attribue un coefficient (de 20 à 120) qui permet d'apprécier rapidement l'importance de chaque marée. Cette notion de coefficient est propre à la France.
- **Marées à inégalité diurnes.** Elles ressemblent aux marées semi-diurnes, mais le rythme semi-diurne est associé à un rythme diurne. Les pleines mers et les basses mers consécutives ont des hauteurs très différentes.
- **Marées mixtes.** Ce type de marée se caractérise par une transition progressive (au cours d'une lunaison) entre le type diurne et le type à inégalité diurne.
- **Marées diurnes.** Elles se distinguent par une seule pleine mer et une seule basse mer par jour. On les observe essentiellement dans le Pacifique, sur les côtes asiatiques ainsi que dans le golfe du Mexique et à Copenhague.

### Le saros ou la périodicité des marées

Le saros, également appelé période chaldéenne, est la durée de 223 lunaisons (un peu plus de 18 années) au bout de laquelle la position des astres est quasi identique. Il en résulte que les marées se renouvellent dans des conditions à peu près similaires, ce qui n'est jamais le cas en dehors de cette périodicité.

### Quelques autres particularités

Voici quelques explications sur certaines particularités de la marée ou sur certaines notions qui posent souvent question.

► **Les points amphidromiques :** l'onde marée qui se propage dans les différents océans prend des caractéristiques différentes suivant la configuration géographique comme le dessin des côtes ou les profondeurs des mers. Le cas extrême est celui de la Méditerranée où l'onde marée est quasi inexistante. Par contre, dans chaque mer ou océan, il a été mis en évidence dès le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle la présence de lieux où le marnage est nul (le niveau ne change pas au cours de la marée). On les nomme points amphidromiques, en comparaison aux amphidromes, petits escargots vivant en Asie du Sud-Est dont la coquille ressemble au dessin de l'onde marée tournant autour de ce point mort. En effet, l'onde marée se propage autour d'un point amphidromique en étant déviée par la force de

Coriolis : dans l'hémisphère Nord, l'onde tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, alors qu'elle tourne le sens des aiguilles dans l'hémisphère Sud. De par le monde, on a recensé 16 points amphidromiques : la mer du Nord en possède trois à elle toute seule et l'océan Atlantique a son point amphidromique quelque part à l'Est des Açores.

► **La tenue du plein.** Dans certains endroits, la marée présente des anomalies comme dans la région du Havre et de Ouistreham où l'on constate que la durée de l'étale de pleine mer est anormalement longue (2 heures environ). L'explication donnée à ce phénomène est l'apparition d'ondes différentes de l'onde principale qui provoquent une inégalité dans les durées pendant laquelle la mer monte et celle où elle descend. Le moment de la basse mer reste précis alors que celui de la pleine mer est plus diffus. L'annuaire des marées rend compte de ce phénomène.

*Par exemple, le 17 mai 2010, l'annuaire donne pour Le Havre une première basse mer à 8 h 33 (1,30 m), puis une pleine mer à 14 h 18 (7,54 m), et une basse mer à 20 h 50 (1,64 m). On voit bien la dissymétrie entre le montant (durée 7 h 45) et le perdant (durée 6 h 32). Le calcul des hauteurs d'eau aux alentours de la pleine mer montre bien le phénomène de tenue du plein :*

*13 h : 7,37 m ; 14 h : 7,53 m ; 15 h : 7,43 m*

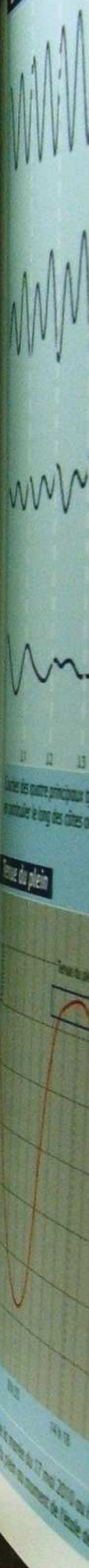
En fait, la montée de l'eau ralentit considérablement à l'approche de la pleine mer comme le montre la courbe de cette marée (ci-contre).

► **Marée méditerranéenne.** La question rituelle est la pourquoi de l'absence de marées en Méditerranée. D'abord, disons que cette mer n'échappe pas au phénomène des marées. Même si la variation de l'eau est faible puisque les marnages sont en moyenne de 40 centimètres, les marées sont bien présentes. Toulon est d'ailleurs un port de référence de l'annuaire des marées.

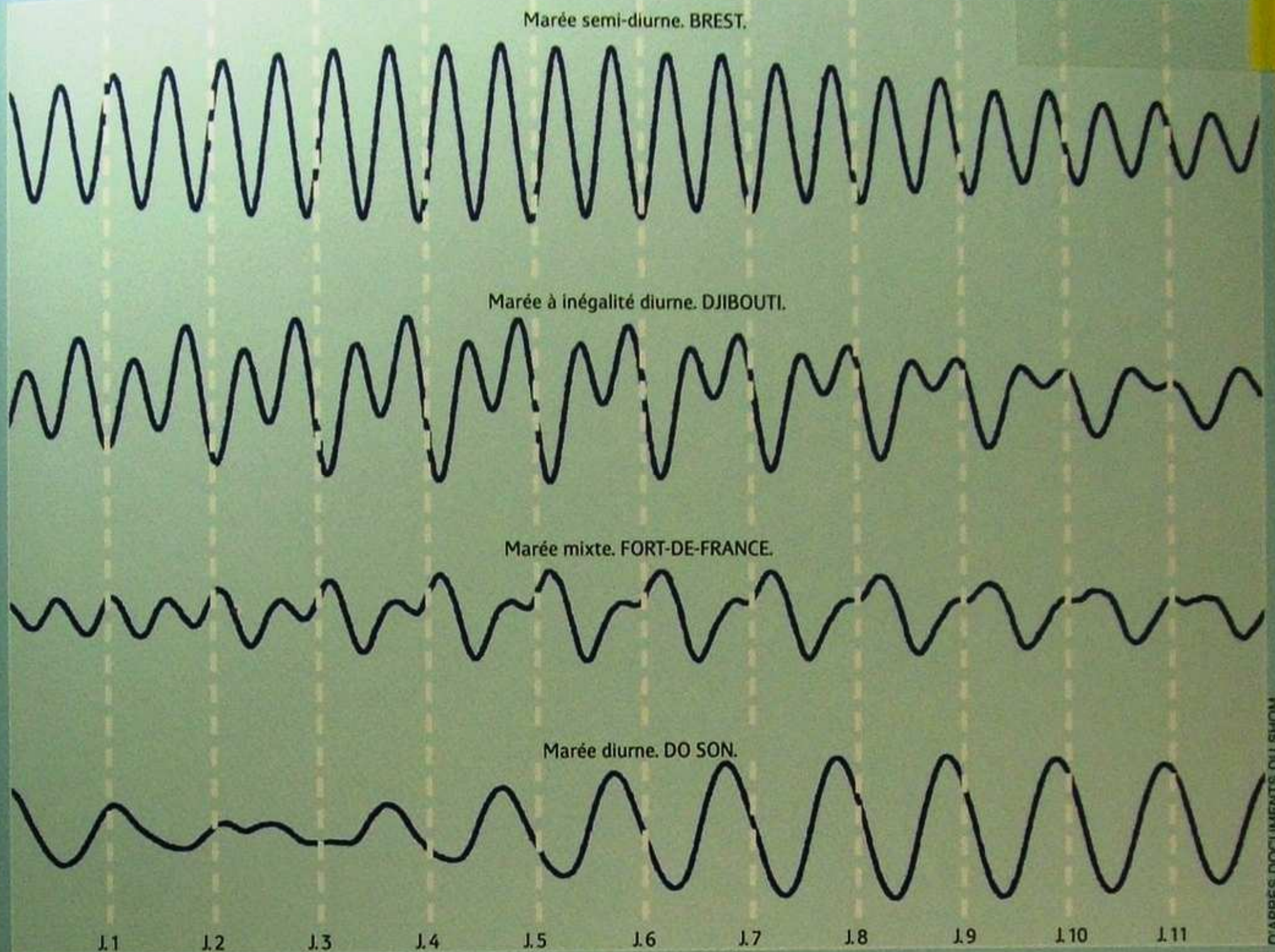
Deux raisons expliquent le faible marnage des marées méditerranéennes :

- c'est une mer fermée dans laquelle les ondes ont du mal à se développer (la longueur de l'onde marée est quasiment égale à la largeur du bassin méditerranéen).
- la Méditerranée n'a pratiquement pas de plateau continental, de sorte que l'amplitude de l'onde n'est pas accentuée par la remontée des fonds comme le long des côtes de l'Atlantique et de la Manche.

Enfin, il faut signaler que les effets météorologiques propres à la Méditerranée perturbent souvent la marée. Un coup de tramontane ou de mistral, suffit pour atténuer les marnages.

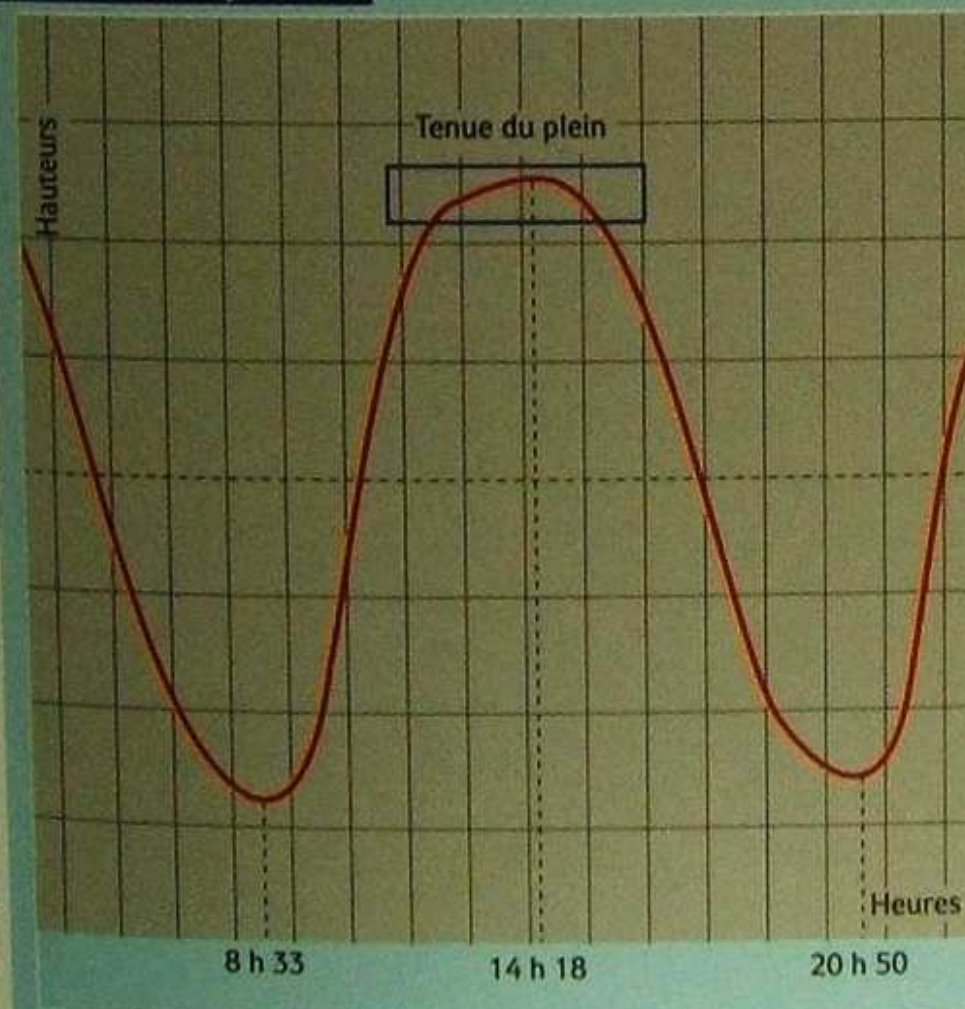


## D'autres marées sur des rythmes différents



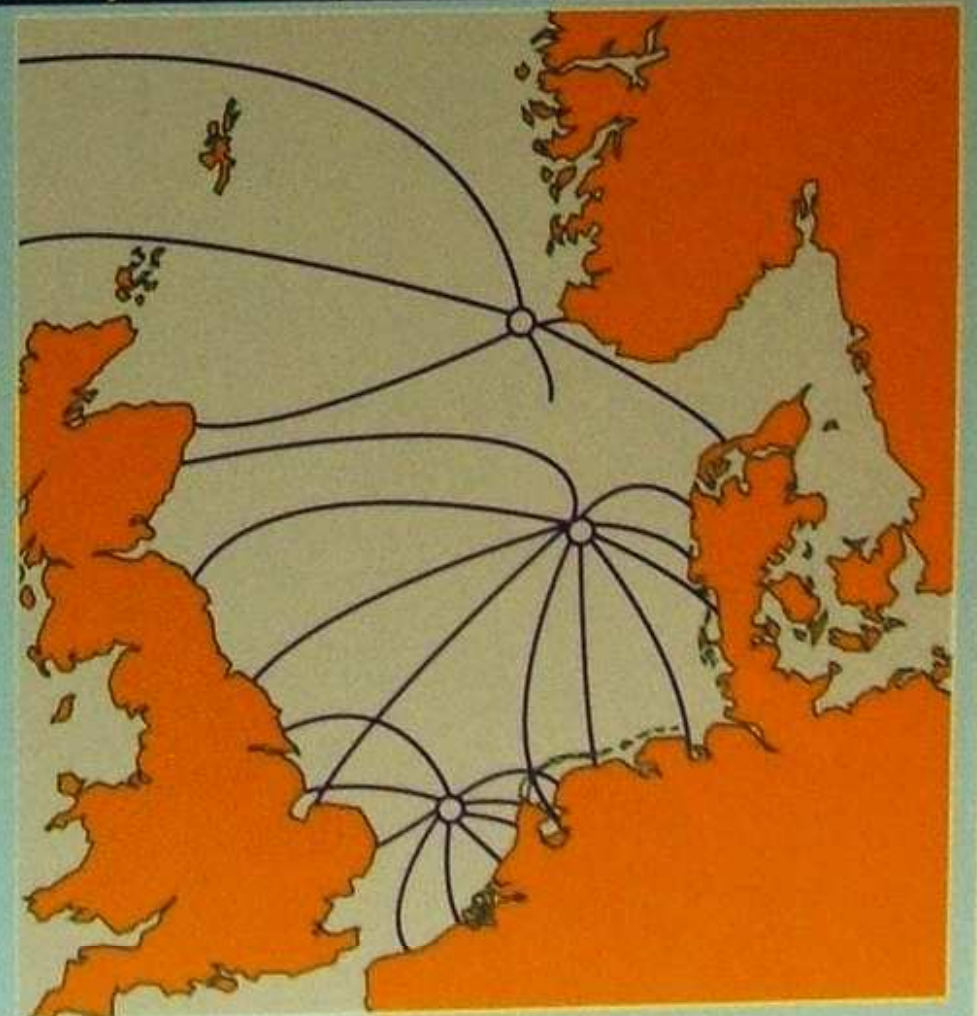
Courbes des quatre principaux types de marées de par le monde. Le type semi-diurne est celui le plus répandu, en particulier le long des côtes occidentales de l'Europe.

### Tenue du plein



Courbe de la marée du 17 mai 2010 au Havre. On voit la tenue du plein au moment de l'étale de pleine mer.

### Les points amphidromiques



La mer du Nord compte trois points amphidromiques où le marnage est nul.