

Les marées avant la gravitation

**Vincent DeParis, iFé-ENS-Lyon <vincent.deparis@neuf.fr>
Publié par Gérard Vidal**

Les marées avant la gravitation

par Vincent DeParis et Gérard Vidal
Copyright © 2014 Vincent DeParis

Résumé

Pendant plusieurs siècles, de l'Antiquité jusqu'au milieu du XVII^e siècle, l'explication du flux et du reflux de la mer est restée inaccessible au savant. Que peuvent dire les savants sur l'origine d'un phénomène lorsque le concept qui l'explique leur est encore étranger ? Petit éclairage de l'Histoire sur l'évolution des conceptions sur les marées océaniques.

Table des matières

Les marées avant la gravitation	1
Introduction :	1
Une connaissance précise, dès l'Antiquité	1
Des théories multiples et contradictoires pendant le Moyen-Age	2
Le rôle des médecins et des astrologues au XVI ^e siècle	3
L'attraction de deux corps apparentés : Kepler	3
La combinaison de la rotation et de la révolution la Terre : Galilée	4
Les tourbillons de Descartes	6
Newton et la gravitation	7
Conclusion	8

Liste des illustrations

1. Poseidonios (135-50 av. J.-C.)	2
2. Johannes Kepler (1571-1630)	3
3. Galileo Galilei (1564-1642)	4
4. L'origine des marées selon Galilée	5
5. René Descartes (1596-1650)	6
6. Le principe des marées selon Descartes	6
7. Isaac Newton (1642-1724)	7
8. La force génératrice des marées selon Newton	8

Les marées avant la gravitation

Introduction :

Avant d'exposer sa théorie des marées, Galilée prévient son lecteur : « Il est de nombreuses opinions concernant la cause du flux et du reflux ; puisque, pour un seul effet, je sais qu'il n'y a qu'une seule cause véritable et primordiale, je comprends fort bien et suis assuré que l'une de ces opinions au plus est véritable et que les autres ne sont que des fables et des faussetés ; et même peut-être la véritable cause n'est-elle pas parmi celles qu'on a avancées jusqu'à présent ; c'est même le cas, je crois : il serait étonnant que le vrai ait une clarté si faible qu'elle ne transparaisse pas dans la ténèbre des erreurs. ¹

» L'intuition du vrai est cependant bien trompeuse puisque, avant Newton, tous les savants qui se sont essayés à expliquer les marées, se sont soit fourvoyés, soit arrêtés en chemin ! En effet, avant l'avènement de la gravitation universelle au cours du XVII^e siècle, la cause des marées est hors de portée des savants. Ce qui ne les empêche pas d'avoir des idées. C'est justement parce que l'explication du flux et du reflux de la mer demeure encore inaccessible que la période, qui va de l'Antiquité jusqu'au milieu du XVII^e siècle, est si intéressante. Que peuvent dire les savants sur l'origine d'un phénomène lorsque le concept de base leur est encore étranger ? Quelles solutions proposer, lorsque toute tentative est encore vaine ? Dans l'article, nous proposons une revue des différentes conceptions sur les marées depuis l'Antiquité jusqu'à l'explication proposée par Isaac Newton en 1687 dans ses *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.²

Une connaissance précise, dès l'Antiquité

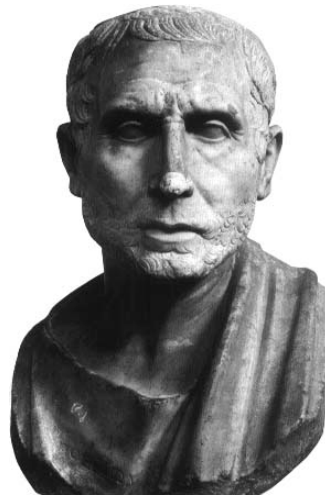
Les premières interrogations sur le flux et le reflux de la mer remontent à l'Antiquité. Mais comme les marées sont pratiquement insignifiantes sur les côtes méditerranéennes, ce n'est qu'à partir du récit des voyageurs que les savants grecs peuvent découvrir les lois du mouvement des eaux. Les expéditions d'Alexandre et surtout la navigation des bouches de l'Indus au Golfe Persique, que Néarque accomplit en 325 av. J.-C. sur l'ordre du conquérant, révèlent les marées de l'Océan Indien. Au même moment, le long périple de Pythéas de Marseille, de Gadès au sud de l'Espagne vers les îles britanniques, permet de connaître celles de l'Océan Atlantique. Durant son voyage, Pythéas fait une première découverte fondamentale : les marées sont en quelque sorte reliées à la Lune et il explique « par la Lune qui devient pleine, les marées montantes et par la disparition de la Lune, les marées descendantes. ³ » Quelques temps plus tard, Ératosthène (v. 276-194 av. J.-C.), le fameux géomètre alexandrin qui mesura le périmètre de la Terre, explique que les marées présentent deux flux et deux reflux par jour. Les flux surviennent lorsque la Lune passe dans le méridien et dans l'anti-méridien, de l'autre côté de la Terre. Les deux reflux, lorsque la Lune se lève et se couche. Poseidonios (135-50 av. J.-C.) poursuit les investigations et remarque que les deux marées quotidiennes changent d'amplitude avec les phases de la Lune : elles sont maximales au moment de la Pleine et de la Nouvelle Lune (marées de vives-eaux) et minimales aux quadratures (marées de mortes-eaux). Il note encore des variations annuelles, avec des marées plus fortes au moment des équinoxes.

¹ Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, Paris, Seuil, 1992, p. 604-605.

² L'article repose sur les travaux de Pierre Duhem : P. Duhem, *Le Système du Monde*, Paris, Hermann, 1958. Tome II, p. 267-390 ; Tome III, p. 112-125 ; Tome IX, p. 7-78 et P. Duhem, *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, Riviere et Cie, 1906. Réédition Vrin, 2007. Nous utilisons le texte mis en ligne à l'adresse suivante : http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/phil/textesph/duhem_theorie_physique.pdf

³ Germaine Aujac, *Strabon et la Science de son temps*, Paris, Les Belles Lettres, 1966., p.285, note 3.

Figure 1. Poseidonios (135-50 av. J.-C.)



Les diverses caractéristiques des marées ont donc été découvertes très tôt. Mais comment expliquer cette respiration ample et périodique des océans ? Le savant de l'Antiquité ou du Moyen-Age qui veut expliquer le mouvement de la mer fait face à de nombreux problèmes. D'abord les contraintes de l'observation que nous venons de voir : pourquoi les marées sont-elles inexistantes dans certaines mers et très fortes dans d'autres ? D'où viennent non seulement les deux flux et reflux quotidiens, mais encore les variations mensuelles et annuelles ? Une théorie qui ne pourrait expliquer qu'un seul de ces faits ou qu'une seule de ces périodes serait insatisfaisante. Ensuite, la perception même du mouvement de la mer : nécessite-t-il l'apport d'eaux nouvelles, venant d'ailleurs, puis l'enlèvement de ces eaux ou peut-il s'expliquer uniquement par le gonflement des eaux déjà présentes ? Enfin, le lien étonnant qui semble exister entre les marées et la Lune : faut-il, comme les astrologues le font volontiers, demander aux astres d'expliquer le mouvement des eaux par l'intermédiaire d'une qualité mystérieuse ou s'offusquer de telles vertus et tenter une approche plus rationnelle, en invoquant uniquement des mécanismes dont l'expérience est courante ?

Des théories multiples et contradictoires pendant le Moyen-Age

Plusieurs solutions se présentent lorsque l'action des astres est refusée. Puisque le vent a une influence évidente sur la mer, il n'y a qu'un pas à faire pour supposer qu'il est également responsable des marées. De même, les courants marins sont connus et selon Adélarde de Bath (v. 1080 – v. 1160), qui reprend une conception de Macrobie (v. 370 – après 430), ce sont leurs rencontres et leurs conflits qui provoquent le mouvement des eaux. Une autre observation est plus troublante, celle du Maelström dans la mer du Nord, dont le tourbillon change de sens lorsque la marée se renverse (les Maelströms correspondent à ce qu'on appelle aujourd'hui des points amphidromiques, lieux où la marée est nulle et autour desquels tourne la crête de la marée). S'appuyant sur ce phénomène, Paul Diacre (720-778), attribue le flux et le reflux à des gouffres chargés d'absorber puis de rejeter périodiquement les flots de la mer.

Mais pour ceux qui veulent mettre en avant l'influence de la Lune, plusieurs possibilités peuvent également être envisagées. La lumière reçue du Soleil montre une interaction évidente entre un astre (le Soleil) et la Terre. La Lune ne pourrait-elle pas elle aussi agir par l'intermédiaire de sa lumière ? C'est le premier mode d'action de la Lune, avancé déjà par Poseidonios et constamment réévalué ensuite. En chauffant modérément les eaux, la Lune les ferait gonfler et entrer dans une sorte d'effervescence ou de bouillonnement. La variation de sa lumière au cours du mois expliquerait le changement dans l'amplitude des marées. Mais Abou Ma'shar al-Balklî (787-886), dit Albumasar, soulève plusieurs difficultés : comment, dans ce cas, expliquer la marée haute quotidienne qui survient lorsque la Lune est sous l'horizon, de l'autre côté de la Terre, ou les grandes marées de la Nouvelle Lune, lorsque c'est sa face sombre qui est tournée vers la Terre ? Robert Grossetête (1175-1253) puis Roger Bacon (1214-1294) font une tentative audacieuse pour expliquer les deux marées quotidiennes : les rayons

lumineux de la Lune agissent simultanément des deux côtés de la Terre, soit en arrivant directement, soit en arrivant par réflexion sur la sphère céleste !

Albumasar privilégie un autre mode d'action de la Lune, qui repose sur la symbiose entre les qualités semblables. Dans la croyance astrologique en effet, la Lune est l'astre humide par excellence. Elle domine les eaux et les contraint de croître et de décroître avec elle. Elle soulève donc les océans grâce à son affinité avec toutes les choses humides. Et si certaines mers réagissent moins que d'autres cela ne provient pas d'un empêchement de la Lune mais d'une disposition moins favorable de ces bassins à recevoir l'influence lunaire. Au XIII^e siècle, Guillaume d'Auvergne (1190-1249) présente un troisième type d'action astrale, qui sera fécond et largement repris par la suite : la mer s'élève vers la Lune comme le fer monte vers l'aimant.

Le rôle des médecins et des astrologues au XVI^e siècle

Au XVI^e siècle, le développement de la théorie des marées provient essentiellement des médecins et des astrologues, qui cherchent à établir le lien entre les astres et les phénomènes terrestres. Un médecin de Sienne, Lucius Bellantius, fait le tri parmi les diverses opinions : « Les rayons par lesquels la Lune agit principalement lorsqu'elle attire et gonfle les eaux de la mer ne sont pas les rayons de la lumière lunaire ; car, au moment des conjonctions, il n'y aurait pas de flux et de reflux, alors que nous les pouvons constater ; ce sont des rayons virtuels par lesquels la Lune attire la mer comme l'aimant attire le fer. A l'aide de ces rayons, on résout facilement tout ce qu'on peut objecter sur cette matière.⁴ » Un autre médecin, Frédéric Grisogone, donne une nouvelle description du phénomène des marées, mettant clairement en évidence le double rôle de la Lune et du Soleil : « Le Soleil et la Lune tirent vers eux l'enflure de la mer, de telle sorte que, perpendiculairement au dessous de chacun d'eux, se trouve l'enflure maximum ; il y a donc, pour chacun d'eux, deux maxima d'enflure, l'un au-dessous de l'astre, et l'autre en la partie opposée, qu'on nomme le nadir de cet astre.⁵ » La mer se déforme en deux ellipsoïdes de révolution, l'un dont le grand axe s'oriente vers le Soleil, l'autre dont le grand axe se dirige vers la Lune. La combinaison des deux ellipsoïdes explique les variations mensuelles : les deux déformations s'ajoutent au moment des pleines Lunes et des nouvelles Lunes pour donner les marées de vives-eaux et se retranchent dans les quadratures pour donner les marées de mortes-eaux.

L'attraction de deux corps apparentés : Kepler

Figure 2. Johannes Kepler (1571-1630)



⁴ Pierre Duhem, *La théorie physique, son objet, sa structure*, op. cit., p. 189.

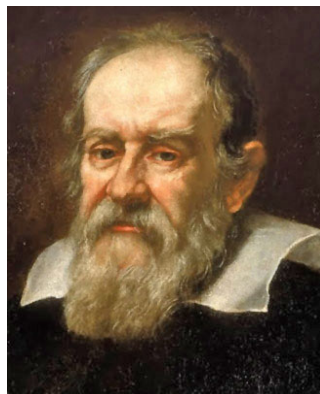
⁵ Pierre Duhem, *La théorie physique, son objet, sa structure*, op. cit., p. 195.

Les idées des médecins et astrologues se répandent et sont à l'origine d'un redoublement de faveur pour la théorie « aimantique » des marées, selon laquelle la Lune et le Soleil attirent les eaux de la mer. Kepler (1571-1630) la développe fortement, en liaison avec sa théorie de la gravité, qui résulte d'une attraction mutuelle entre deux corps apparentés. Il affirme : « Je suis le premier, que je sache, à avoir dévoilé, dans mes prolégomènes aux Commentaires sur les mouvements de Mars, le procédé par lequel la Lune cause le flux et le reflux de la mer. Il consiste en ceci : la Lune n'agit pas comme astre humide ou humectant, mais comme masse apparentée à la masse de la Terre ; elle attire les eaux de la mer par une action magnétique, non parce qu'elles sont des humeurs, mais parce qu'elles sont douées de la substance terrestre, substance à laquelle elles doivent également leur gravité.⁶ »

L'idée est visionnaire et prépare l'avènement de la gravitation universelle. Mais elle est loin d'entraîner l'unanimité des savants et, en particulier, elle provoque les moqueries de Galilée (1564-1642). En 1632, il expose : « C'est presque comme si la Lune et le Soleil jouaient un rôle actif dans la production de ces effets [les marées], mais cela répugne entièrement à mon intellect : voyant que le mouvement des mers est un mouvement local, perceptible, d'une immense masse d'eau, je ne puis croire à des lumières, des chaleurs tempérées, à des dominations de qualités occultes et autres vaines imaginations du même genre ; tout cela n'est pas et ne peut être cause du flux, au point même que c'est au contraire plutôt le flux qui en est la cause ; c'est lui qui les produit en des cerveaux plus portés à la loquacité et à l'ostentation qu'à la réflexion et à la recherche des opérations les plus secrètes de la nature.⁷ » Ou encore : « Mais de tous les grands hommes qui ont philosophé sur cet effet si étonnant de la nature [les marées], c'est Kepler qui m'étonne le plus : cet esprit libre et pénétrant avait à sa disposition les mouvements attribués à la Terre, il a pourtant prêté l'oreille et donné son assentiment à un empire de la Lune sur l'eau, des propriétés occultes et autres enfantillages du même genre.⁸ » L'intuition de Kepler, par ce qu'elle a d'incompréhensible (comment les eaux de la Terre et la Lune pourraient-elles s'attirer), échauffe les esprits.

La combinaison de la rotation et de la révolution la Terre : Galilée

Figure 3. Galileo Galilei (1564-1642)



En 1616 puis en 1632, dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Galilée avance une autre explication pour les marées, à partir de la combinaison de la rotation de la Terre sur elle-même et de sa révolution autour du Soleil. Il expose : « Il est bien vrai que le mouvement de tout le globe et de chacune de ses parties serait égal et uniforme s'il n'y avait qu'un mouvement, le mouvement annuel seul ou le simple mouvement diurne ; de même, il faut qu'en mélangeant ensemble ces deux mouvements, il en résulte pour les parties du globe des mouvements non uniformes, tantôt accélérés, tantôt retardés, selon que la rotation diurne ajoute ou retranche à la circulation annuelle. Si donc il est vrai (c'est bien vrai, et l'expérience le prouve) que l'accélération et le retardement du mouvement du vase font couler

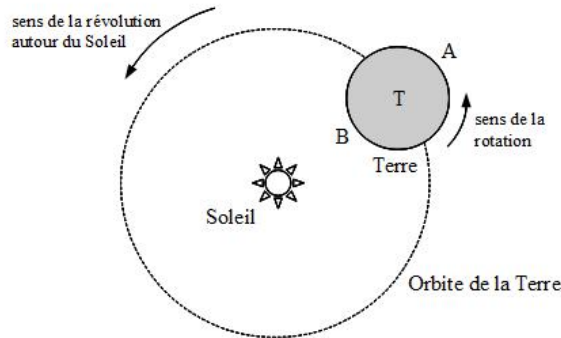
⁶Pierre Duhem, *La théorie physique, son objet, sa structure*, op. cit., p. 191.

⁷Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, op. cit., p. 633.

⁸Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, op. cit., p. 652.

l'eau qu'il contient dans un sens et dans l'autre sur toute sa longueur, et la font s'élever et s'abaisser sur ses extrémités, fera-t-on difficulté pour admettre que cet effet puisse, et même doive nécessairement, se produire avec les eaux de la mer ? Ne sont-elles pas contenues dans des vases qui sont soumis à de tels changements ?⁹ » En raison du double mouvement de la Terre (annuel et journalier), les points de la circonférence terrestre n'ont pas une vitesse uniforme, puisque les deux mouvements tantôt se conjuguent, tantôt s'opposent (figure 1). Si les eaux des océans réagissent comme des eaux contenues dans une cuvette, qui est tantôt accélérée, tantôt décélérée, alors la réaction inertielle des eaux à l'accélération de leurs bassins provoque inmanquablement un flux et un reflux.

Figure 4. L'origine des marées selon Galilée



Le schéma est réalisé dans le plan de l'écliptique, confondu avec le plan de l'équateur, vu depuis le Nord. Le mouvement de rotation et le mouvement orbital s'ajoutent en A (où la vitesse par rapport au Soleil est maximale) et se retranchent en B (où la vitesse est la plus faible).

La théorie de Galilée a un handicap majeur : elle n'explique qu'une marée par jour, et non pas deux. Mais outre cette difficulté sérieuse, où se situe la méprise dans le raisonnement du savant italien ? Dans la compréhension du mouvement orbital. Comme le montrera Newton un demi siècle plus tard, la Terre est retenue sur son orbite par la force gravitationnelle exercée par le Soleil. Or cette force gravitationnelle agit sur toute la matière terrestre, aussi bien sur les parties liquides que sur les parties solides. Les eaux comme les bassins subissent la même force et donc la même accélération, il n'y a plus lieu de les distinguer. Pour le dire autrement, les eaux et les bassins, attirés de la même manière par le Soleil, « tombent » simultanément vers lui : le mouvement relatif, tel que le suppose Galilée, n'existe pas !

Galilée ne connaît bien évidemment pas l'attraction gravitationnelle de Newton. Il ne l'aurait d'ailleurs pas beaucoup aimée. Pas plus que Kepler et que ses contemporains, il ne comprend le mouvement orbital des planètes. Pour lui, le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil est donné et naturel ; il existe sans cause, ce qui relève d'une physique imaginaire. Rien n'y personne ne peut donc l'amener à douter de l'effet de la combinaison des deux mouvements de la Terre et pendant toute sa vie, il reste persuadé du bien fondé de sa théorie. Son explication lui paraît aussi sans doute, et à juste titre, la seule qui soit digne d'intérêt. La théorie de Kepler ne fournit qu'une idée générale, sans expliquer réellement comment les marées sont générées. Sa théorie est toute autre. Il récuse toute astrologie, toute attraction de la Lune sur la Terre et traite mécaniquement du problème des marées.

⁹Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, op.cit., p. 612-613.

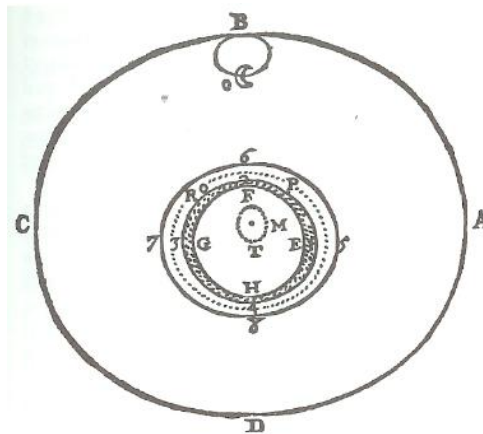
Les tourbillons de Descartes

Figure 5. René Descartes (1596-1650)



Dans ses *Principes de la Philosophie*, publiés en 1644, Descartes (1596-1650) présente une nouvelle théorie des marées, relativement indépendante par rapport aux théories précédentes. Descartes pense que tout est régi par les seules lois du mouvement, il a une vision mécaniste de l'univers. Pour lui, le vide n'existe pas : dès qu'il y a une étendue, il y a nécessairement une substance qui la comble. Ainsi l'espace entre le Soleil et les planètes est entièrement rempli d'une matière subtile, organisée en d'énormes tourbillons. Le Soleil occupe le centre du tourbillon principal, qui emporte les différentes planètes sur leurs orbites. Les planètes génèrent des tourbillons secondaires, qui entraînent les satellites.

Figure 6. Le principe des marées selon Descartes

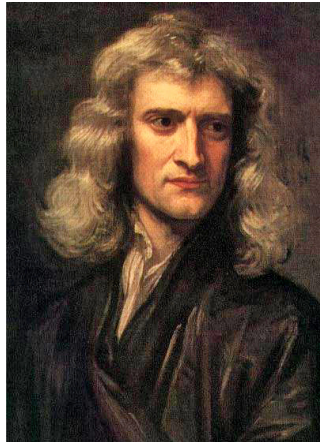


Selon Descartes, les marées résultent d'une pression différentielle exercée par la matière du tourbillon sur les mers (la figure est tirée du traité *Le Monde ou Traité de la lumière*, éd. Adam et Tannery, Paris, 1974.). ABCD est le tourbillon de matière subtile généré par la rotation propre de la Terre EFGH, de centre T. 1234 représente les mers et 5678 l'atmosphère. En raison de la présence de la Lune en B, le centre M du tourbillon ne coïncide pas avec le centre T de la Terre.

Bien qu'emportée par le tourbillon engendré par la Terre, la Lune ne se déplace pas aussi vite que lui (Descartes n'en donne pas la raison). La matière subtile, gênée par la présence de la Lune, ne peut s'écouler librement et exerce une pression différentielle à la surface des mers, d'où résultent les marées. Si on accepte l'idée de départ des tourbillons, la théorie de Descartes peut paraître cohérente. Mais rien n'est expliqué. C'est, selon les partisans de Newton, une magnifique vue de l'esprit ! A son époque, elle a cependant une grande popularité, surtout parmi ses disciples en France et est souvent adoptée comme la moins mauvaise des théories des marées.

Newton et la gravitation

Figure 7. Isaac Newton (1642-1724)



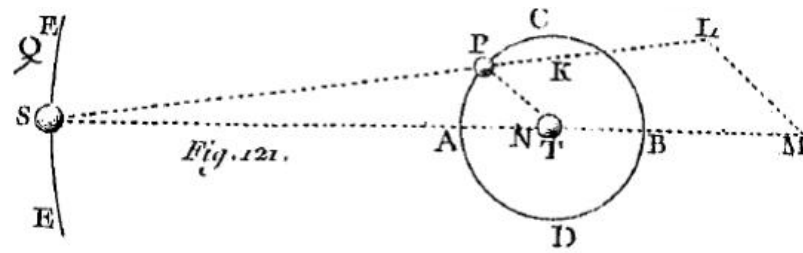
En 1687, Isaac Newton (1642-1727) donne la solution à la cause du flux et du reflux de la mer dans ses fameux *Principia*. Il explique que les marées océaniques relèvent de la mécanique (comme Galilée le voulait) et qu'elles sont une conséquence inévitable de la théorie de la gravitation universelle (comme Kepler en avait l'intuition) : elles proviennent des inégalités de l'attraction de la Lune et du Soleil sur les différentes parties du globe. Elles constituent ainsi une confirmation supplémentaire et intéressante de son système de l'attraction universelle de la matière.

Quel a été le cheminement des idées de Newton ? Comment a-t-il découvert la cause des marées ? Si nous nous en tenons à la présentation de sa théorie dans les *Principia*, son questionnement n'a pas été direct. C'est en faisant le détour par la Lune qu'il atteint la Terre, c'est en passant par l'étude des inégalités du mouvement de la Lune qu'il comprend le phénomène terrestre des marées. Newton a montré que, sous l'influence gravitationnelle de la Terre, la Lune décrit une ellipse dont notre planète occupe l'un des foyers. L'orbite lunaire n'est cependant pas stable mais subit des perturbations (en particulier, les nœuds de son orbite rétrogradent en 18,6 ans environ), qu'il veut expliquer. Il comprend que si l'attraction est universelle, alors la Lune subit également l'influence gravitationnelle du Soleil, ce qui modifie sa trajectoire autour de la Terre.

Newton montre que les forces perturbatrices du Soleil sur la Lune ne proviennent pas de l'attraction totale du Soleil sur la Lune mais de la différence entre l'attraction du Soleil sur la Lune et l'attraction du Soleil sur la Terre. C'est l'étape fondamentale de sa découverte, où il définit le concept de force de marée. Il peut ensuite passer de la Lune à la Terre : le Soleil met l'eau des océans en mouvement de la même manière qu'il perturbe le mouvement de la Lune autour de la Terre. Il reconnaît finalement que la Lune est un autre corps céleste qui, comme le Soleil, est responsable pour une part (et même pour la part principale) des marées.

Dans le raisonnement de Newton, la Lune agit donc d'abord comme un révélateur. Très sensible aux forces perturbatrices provenant du Soleil, elle met en évidence les forces de marées du Soleil qui agissent également sur la Terre. Sa théorie des marées apparaît donc comme un corollaire de sa théorie lunaire. Elle en est en quelque sorte une application supplémentaire et peut-être inattendue. Les ténèbres, dont parlait Galilée, sont-elles pour autant dissipées ? Pas vraiment. On le sait, il faudra un demi-siècle pour que la théorie de la gravitation de Newton soit acceptée et que son aspect déconcertant (comment deux masses peuvent-elles s'attirer à distance) s'efface devant son pouvoir calculatoire.

Figure 8. La force génératrice des marées selon Newton



Représentation géométrique des forces perturbatrices du mouvement de la Lune (figure 121 du livre I des Principia). S est le Soleil, T la Terre, P la Lune et CADB l'orbite de la Lune. L'attraction du Soleil sur la Terre est représentée par le segment NS et l'attraction du Soleil sur la Lune par le segment LS qui peut être décomposé en deux parties : LM et MS. Les forces de marées solaires sont représentées par les segments LM et MT.

Conclusion

Que nous apprend cette histoire ? Que peuvent dire les savants lorsque le concept de base pour appréhender un phénomène n'a pas encore été découvert ? Beaucoup de choses ! Kepler reste sur le seuil en croyant avoir fait tout le chemin, Galilée se méprend et est persuadé du bien fondé de sa théorie, Descartes invente une « pure fiction ». Qu'il est facile de se laisser abuser ! Mais si ces premières tentatives d'explication sont vaines, la question des marées n'en a pas moins été déterminante. En suggérant un lien possible entre le mouvement des eaux, la Lune et, dans une moindre mesure, le Soleil, les marées ont éclairé sous une lumière légèrement différente le problème de l'attraction mutuelle des astres et préparé la gravitation universelle. En résistant à l'interprétation des savants, elles ont représenté un formidable défi et une puissante source d'interrogations et de recherches. Elles ont également permis de soulever des divergences de points de vue sur l'action à distance d'un astre qui, avec Newton, éclateront au grand jour. Mais pour qu'une solution soit trouvée, il aura fallu une invention déroutante et inattendue : l'attraction universelle de la matière. Est-ce une surprise de ce type qui nous attend avec la résolution des énigmes de l'astronomie actuelle ? L'histoire le dira...