CAHIERS FRANÇOIS VIETE

Série II - N°5

2011

Histoire de la géologie

sous la direction de
Pierre Savaton

Centre François Viète
Épistémologie, histoire des sciences et des techniques
Université de Nantes

Imprimerie Centrale de l'Université de Nantes
Avril 2015

Cahiers François Viète, série II, 5, 2011, pp. 19-31

LA THEORIE DES MAREES D'ISAAC NEWTON

Vincent DEPARIS*

Résumé
Dans cet article, nous suivons le raisonnement de Newton pour établir sa théorie du flux et du reflux de la mer. Nous montrons comment il atteint le phénomène terrestre des marées en faisant le détour par les inégalités du mouvement de la Lune et comment il quantifie la force de marée grâce à un procédé géométrique astucieux. Mais si Newton comprend parfaitement le principe et l'origine de la force de marée, il ne sait pas encore en calculer précisément les effets, en raison de sa théorie statique.

En 1687, Isaac Newton (1642-1727) donne la solution à la cause du flux et du reflux de la mer dans ses fameux *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle* (que nous nommerons *Principia* dans la suite de notre texte). Il explique que les marées océaniques relèvent de la mécanique comme Galilée le voulait et qu'elles sont une conséquence 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. Quel a été le cheminement de ses idées ? Comment a-t-il découvert la cause des marées ? Dans cet article, nous suivons pas à pas le raisonnement de Newton, d'abord dans la proposition 66 du livre I des *Principia*, où il définit le concept de force de marée, puis dans les propositions 24, 25, 26, 36 et 37 du livre III, où il cherche à calculer les effets sur la mer des forces de marées. L'intérêt du raisonnement de Newton est qu'il n'a sans doute pas été direct : c'est en faisant le détour par les inégalités du mouvement de la Lune qu'il atteint le phénomène terrestre des marées. Dans son raisonnement, la Lune agit comme un révélateur. Très sensible aux forces perturbatrices provenant du

* Professeur de sciences physiques, Lycée Jean Monnet (Annemasse), chercheur associé au Centre François Viète (EA1161), Université de Nantes, vincent.deparis@neuf.fr

Soleil, elle met en évidence les forces de marée du Soleil qui agissent également sur la Terre. Nous allons donc d'abord préciser le rôle joué par la Lune dans la découverte des forces de marée. Nous insisterons ensuite sur l'ingéniosité de son raisonnement géométrique pour quantifier les forces de marée. Nous terminerons en mettant en évidence les limites de son explication, qui repose sur une conception statique des océans.

1. Les forces perturbatrices du mouvement de la Lune

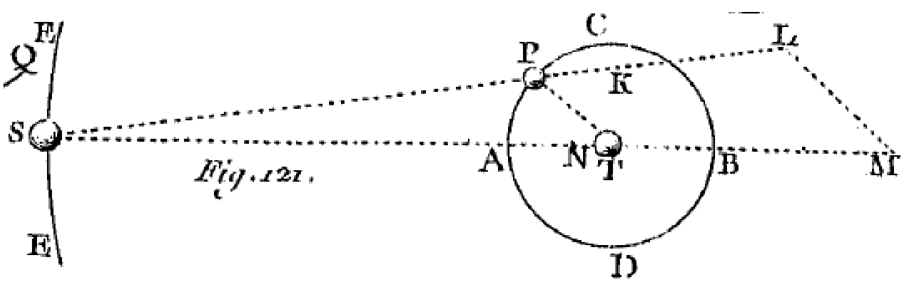

Figure 1 - Représentation géométrique des forces perturbatrices du mouvement de la Lune (figure 121 du livre I des Principia). S est le Soleil, T la Terre, P la Lune et CADB l'orbite de la Lune. L'attraction du Soleil sur la Terre est représentée par le segment NS et l'attraction du Soleil sur la Lune par le segment LS qui peut être décomposé en deux parties : LM et MS.

Reprenons le déroulement du raisonnement de Newton. Dans la proposition 66 du livre des *Principia*[1], Newton regarde les perturbations gravitationnelles que subit la Lune *P* en orbite autour de la Terre *T* sous l'action du Soleil *S*. Son but est de quantifier l'ampleur des perturbations solaires, et pour ce faire il emploie un procédé géométrique d'une grande élégance et d'une grande simplicité. Son astuce est de représenter les attractions gravitationnelles par des segments de longueurs judicieusement choisies et de les décomposer en plusieurs forces, faisant ainsi pratiquement appel à la notion de vecteur (il utilise en fait les notions de

[1] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduction de la marquise du Châtelet, 1756, réédition Sceaux : Jacques Gabay, 1990, tome I, livre I, proposition 66, p. 179.

longueur, de direction mais non de sens, même si celle-ci est implicite dans son raisonnement). La loi de la combinaison des « forces » (ce que nous appelons aujourd'hui la méthode du parallélogramme des forces) est connue depuis Simon Stévin (1548-1620). Elle sera énoncée explicitement par Pierre Varignon (1654-1722) dans son traité *La nouvelle mécanique* de 1725, mais on voit qu'elle était implicitement utilisée avant. Newton appuie son raisonnement sur la figure 121 des *Principia* (figure 1). Cette figure peut faire l'objet d'une double lecture :

- une lecture physique : les corps *S* (Soleil), *P* (Lune), *T* (Terre) et les distances entre ces corps *SP, ST, PT* ;
- une lecture mécanique : l'attraction du Soleil sur la Terre est représentée par le segment *SN*, l'attraction du Soleil sur la Lune par le segment *SL*. Cette attraction *SL* est décomposée en deux parties : l'une dans la direction Soleil-Terre, c'est la partie *SM*, l'autre suivant une direction parallèle à la droite Terre-Lune, c'est la partie *LM*, qui agit sur la Lune comme une force centrale. Le point *K* est pris sur la droite *SP* de telle sorte que *SK* = *SN*. L'astuce est de choisir la longueur du segment *SN* représentant la force égale à la distance physique *ST* : les points *N* et *T* sont donc confondus, mais n'ont pas la même signification. On pourrait dire que Newton choisit de représenter les longueurs des segments représentant les forces avec une échelle particulière, pour faire coller la figure mécanique avec la figure physique. Il s'agit d'un point crucial de sa méthode, qui lui facilitera les calculs par la suite. La longueur de *SL* est déterminée si on connaît les longueurs *SP, ST* et *SN*. En effet, avec nos notations (*G* est la constante de la gravitation, M_S la masse du Soleil, F_{SP} la force exercée par le Soleil sur la Lune et F_{ST} la force exercée par le Soleil sur la Terre) :

$$SL = F_{SP} = \frac{GM_S}{SP^2} \quad \text{et} \quad SN = F_{ST} = \frac{GM_S}{ST^2}$$

$$\text{donc} \ \frac{SL}{SN} = \frac{ST^2}{SP^2}$$

$$\text{Puisque } SN = ST : \ SL = \frac{ST^3}{SP^2}$$

Le Soleil agit donc sur la Terre, par l'intermédiaire de la force F_{ST} représentée sur le schéma de Newton par *SN*, et sur la Lune, par l'intermédiaire de la force F_{SP} représentée par *SL*. La Terre et la Lune, n'étant pas à la même distance du Soleil, ne subissent pas la même attraction, bien qu'elles tournent ensemble autour de lui. Pour déterminer comment le Soleil perturbe le mouvement de la Lune autour de la Terre, Newton cherche quelle est la part de la force *SL* qui a un effet. Il considère la composante *SM* et il remarque : « Si [l'attraction accélératrice du corps *T* vers *S* la force F_{ST} d'attraction du Soleil sur la Terre] est représentée par la ligne *SN* ; et que les attractions accélératrices *SN*, *SM* soient égales, elles ne changeront rien à la position des corps *P* et *T* entre eux, parce qu'elles les tireront également, et selon des lignes parallèles ; ainsi les mouvements de ces corps seront les mêmes qu'ils seraient sans ces attractions. […] Par l'attraction *SN*, la troisième force *SM* est donc toujours réduite à l'attraction *MN*. »[2]

Dans la composante *SM*, seule la partie *NM* est efficace pour troubler le mouvement de la Lune autour de la Terre. En effet, la partie *SN* agit de la même manière sur la Terre et la Lune, elle ne peut donc pas perturber le mouvement relatif de ces deux corps. Les forces perturbatrices du Soleil sont donc représentées par les parties *NM* et *LM*. Le procédé employé par Newton revient, avec nos notations, à effectuer la différence entre les vecteurs $\overrightarrow{LS}$ et $\overrightarrow{NS}$. Il met ainsi clairement en évidence que les forces perturbatrices du Soleil sur la Lune (que l'on nomme actuellement forces de marées solaires) 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 la découverte de Newton, où il définit le concept.

Dans les quadratures (figure 2), le schéma de Newton se simplifie et cela lui permet de déterminer l'ampleur des forces de marée dans ce cas particulier. Du fait du très grand éloignement du Soleil, les longueurs *ST* et *SP* sont pratiquement égales. Les points *K* et *L* sont donc pratiquement confondus avec le point *P*. Des forces qui troublent le mouvement de la Lune, la partie *NM* s'annule et la partie *LM* est égale à *PT* et est dirigée vers la Terre. La force de marée dans les quadratures s'ajoute à l'attraction exercée par la Terre. En suivant son raisonnement, mais en utilisant nos notations, nous pouvons écrire (F_m est la force de marée du Soleil sur la Lune et F_{ST} la force d'attraction du Soleil sur la Terre) :

---

[2] Isaac Newton, *op. cit.*, livre I, proposition 66, p. 181.

$$\frac{F_m}{F_{ST}} = \frac{PT}{ST} \text{, soit : } F_m = \frac{GM_S}{ST^3} PT$$

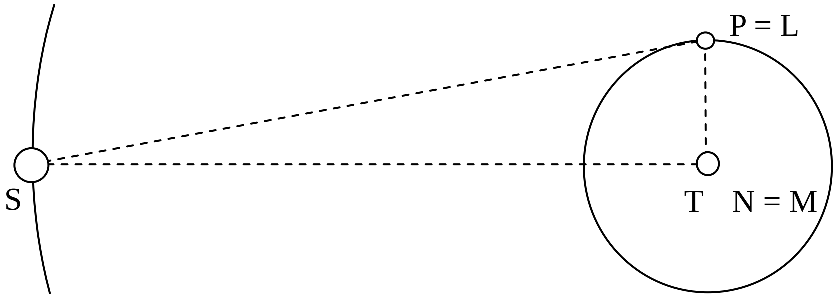

Figure 2 - Forces de marée dans les quadratures
Du fait du très grand éloignement, le point L est pratiquement confondu avec le point P et l'attraction LS du Soleil sur la Lune est pratiquement égale en intensité à l'attraction NS du Soleil sur la Terre. La force de marée est représentée par le segment LN, égal à PT. Elle s'ajoute à l'attraction de la Lune par la Terre.

C'est son procédé géométrique de l'équivalence entre les longueurs des segments représentant les forces et les distances physiques qui lui permet de trouver ce rapport dans le cas particulier des quadratures. Comme à son époque, la distance Terre-Soleil n'est pas connue précisément, Newton transforme l'expression précédente. La troisième loi de Kepler appliquée au mouvement de la Terre autour du Soleil est :

$\omega_T^2 ST^3 = GM_S$ (avec ω_T la vitesse angulaire de révolution de la Terre autour du Soleil). La force de marée devient donc : $F_m = \omega_T^2 PT$.

Ceci est la deuxième étape de la découverte de Newton, où il quantifie la force de marée au niveau de la Lune.

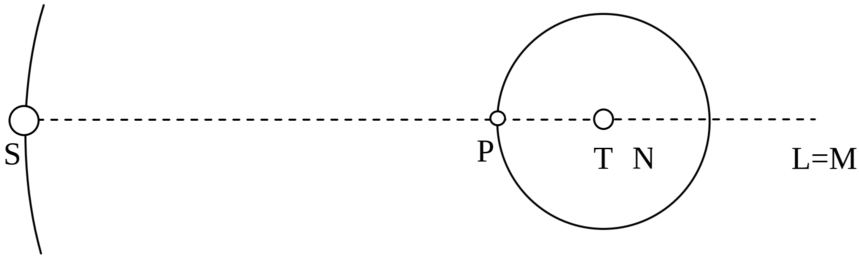

Figure 3 - Force de marée lorsque la Lune est en opposition
Elle est représentée par le segment MN, obtenu par la différence entre l'attraction LS du Soleil sur la Lune et l'attraction NS du Soleil sur la Terre. La force de marée s'oppose à l'attraction de la Lune par la Terre.

Lorsque la Lune *P* est en opposition (figure 3), le point *L* est confondu avec le point *M* sur la ligne Soleil-Terre et $SP = ST - PT$. La Lune étant plus près du Soleil, elle subit une attraction de sa part plus forte que la Terre. Newton montre que la force perturbatrice du Soleil sur la Lune est *MN* et qu'elle vaut le double de *PT*. En effet, comme on l'a déjà vu pour le cas général :

$$SM = SL = \frac{ST^3}{SP^2}$$

En faisant le développement limité (ce que Newton sait faire), il vient :

$$SM = \frac{ST^3}{ST^2(1 - PT/ST)^2} \approx ST + 2PT$$

La force de marée *NM*, qui est donnée par la différence entre *SM* et *ST*, est bien égale à *2PT*. Elle est deux fois plus forte que dans les quadratures et surtout, elle agit dans un sens opposé : elle s'oppose à l'attraction de la Lune par la Terre, alors que dans les quadratures, elle s'y ajoutait. Le résultat est identique lorsque la Lune est en conjonction. Cette fois la Lune est plus loin du Soleil et subit donc une attraction de sa part plus faible que la Terre. La force *SM* est égale à $SM \approx ST - 2PT$ et la force de marée *NM* est donc toujours égale à 2*PT*. Les forces de marée ont donc la même valeur et le même effet, que la Lune soit en conjonction ou en opposition : elles s'opposent toujours à l'attraction de la Lune par la

Terre. Cette propriété aura une implication importante lorsque Newton appliquera la théorie lunaire au flux et au reflux de la mer et lui permettra d'expliquer les deux marées quotidiennes (ce que personne avant lui n'avait réussi).

2. Les marées océaniques

2.1. Passage des forces perturbatrices sur la Lune aux forces de marée sur la Terre

Après l'étude des perturbations du mouvement de la Lune, Newton continue sa réflexion et applique les mêmes principes à la Terre. Dans le corollaire 19 de la proposition 66 du livre I, il passe du phénomène céleste du mouvement de la Lune au phénomène terrestre des marées océaniques. C'est dans l'intuition de ce passage, qui lie la mécanique céleste et la mécanique terrestre, qu'il fonde la théorie des marées gravitationnelles terrestres. Son procédé consiste à remplacer la Lune par plusieurs corps fluides, qu'il regroupe ensuite en un seul anneau. Il finit par ramener cet anneau fluide dans un canal entourant la Terre solide. Sans l'attraction du Soleil, l'eau contenue dans le canal resterait au repos. Mais en présence du Soleil, elle subit exactement les mêmes perturbations que celles que subissait la Lune. Newton affirme : « Le mouvement de cette eau [du canal] étant accélérée et retardée tour à tour, sera plus prompt dans les syzygies et plus lent dans les quadratures, que celui de la superficie du globe, et ainsi il y aura dans ce canal un flux et un reflux tel que celui de la mer. »[3] Il continue : « Qu'on imagine de plus l'attraction du corps *S*, et alors l'inégalité de cette attraction [du Soleil] troublera le mouvement de l'eau, puisque les parties de l'eau les plus voisines seront les plus attirées, et les plus éloignées le seront moins. La force *LM* attirera l'eau en en bas dans les quadratures, et la fera descendre jusqu'aux syzygies ; au contraire, la force *MT* l'attirera en en haut dans les syzygies, l'empêchera de descendre davantage et la fera monter jusqu'aux quadratures, à la retardation près qui est produite dans le flux et le reflux de l'eau, par le frottement du fonds. »[4]

Grâce à l'analogie avec le mouvement lunaire, Newton comprend que les différentes parties du globe, situées à des distances différentes du Soleil, subissent des attractions différentes de la part du Soleil et que ce sont ces différences d'attraction qui mettent les mers en mouvement.

[3] Isaac Newton, *op. cit.*, livre I, proposition 66, corollaire 19, p. 192.

[4] *Ibid.*, livre I, proposition 66, corollaire 19, p. 193.

Newton montre ainsi que les marées océaniques sont un effet inévitable de l'attraction mutuelle des corps et qu'elles constituent une confirmation supplémentaire et intéressante de son système de l'attraction universelle de la matière. Sa théorie des marées apparaît ainsi comme un corollaire de sa théorie lunaire. Elle en est en quelque sorte une application supplémentaire et peut-être inattendue.

2.2. Les caractéristiques du flux et du reflux des eaux

Dans la proposition 24 du livre III, Newton reprend le problème des marées océaniques, qui proviennent de l'action conjuguée du Soleil et de la Lune. Si, dans un premier temps, Newton a utilisé la Lune comme un révélateur, pour mettre en évidence les marées solaires, il remarque maintenant qu'elle met elle aussi l'eau des océans en mouvement. Il précise d'ailleurs, et il le montrera par la suite, que son influence est plus grande que celle du Soleil. Le but de Newton est d'expliquer les différentes caractéristiques du flux et du reflux de la mer. Il ne s'agit plus des principes et de l'origine de la force de marée mais de ses conséquences et de leurs adéquations avec les observations. Trois phénomènes sont envisagés : la périodicité de l'oscillation des océans, la concordance avec le passage des astres dans le ciel et l'amplitude des marées.

Newton affirme sans démonstration que, sous l'action d'un astre (le Soleil ou la Lune), les mers prennent à chaque instant la forme d'un ellipsoïde allongé, dont le grand axe est constamment dirigé vers l'astre perturbateur (figure 4). Cette figure paraît « naturelle », puisqu'elle a déjà été avancée par les astrologues et des médecins du début du XVIe siècle[5]. Newton en donne la justification : elle résulte de la symétrie de la force de marée, qui abaisse la mer pour tous les points situés à 90° de l'astre et qui la soulève pour les points à l'aplomb mais aussi à l'opposé de l'astre. Grâce à cette déformation des mers, Newton explique les différentes périodicités des marées comme les astrologues et des médecins du début du XVIe siècle l'avaient fait avant lui.

[5] Pierre Duhem (1906), *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, Rivière & Cie, réédition, Vrin, 2007. Nous utilisons le texte mis en ligne : http://www.ac-nancymetz.fr/enseign/philo/textesph/Duhem_theorie_physique.pdf, pp. 189-190.

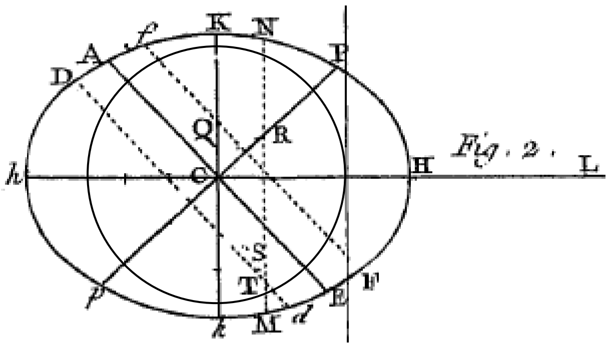

Figure 4 - L'ellipsoïde des marées et l'inégalité diurne (figure 2 du livre III des Principia). Sous l'effet des forces de marée, les océans se déforment en un ellipsoïde dont le grand axe est dirigé vers un astre fictif en retard de trois heures sur l'astre réel. Pp est l'axe de rotation, AE l'équateur, Ff un parallèle. La trace sphérique de la Terre solide a été rajoutée. Lorsque l'astre a une certaine déclinaison, les deux marées quotidiennes en F et en f n'ont pas la même amplitude : il s'agit de l'inégalité diurne.

En affirmant que les mers se déforment en un ellipsoïde, Newton effectue un saut qualitatif important dans sa démarche. Il simplifie la réponse des océans en considérant une figure d'équilibre simple. Nous qualifierions aujourd'hui cette réponse des océans de statique et nous dirions que Newton étudie les marées d'équilibre. Cela revient à considérer que la rotation de la Terre n'a pas d'autre effet que de déplacer le bourrelet des eaux, qui constamment s'aligne avec les astres perturbateurs. À son époque, il s'agit de la seule hypothèse accessible aux calculs, mais qui est la source de plusieurs difficultés. Newton note en effet que les marées observées montrent des anomalies importantes par rapport aux marées théoriques. Il y a des retards conséquents entre les marées quotidiennes et le passage des astres au méridien (l'établissement du lieu) et entre les plus fortes marées et les syzygies (l'âge de la marée). Les amplitudes des marées sont également fortement variables d'un port à l'autre et l'inégalité diurne théorique n'est pas observée dans les ports de l'Atlantique. Les marées théoriques d'équilibre n'expliquent donc pas la diversité des observations, en particulier pour les horaires et l'amplitude des marées. Les marées océaniques sont en effet un problème de mouvement dynamique des eaux et ne peuvent pas être expliquées par la réponse statique des océans supposée par Newton. Celui-ci se rend compte de l'inéquation entre sa théorie et l'observation et ce faisant, il soulève un problème nouveau.

2.3. Calcul de l'ampleur de la marée solaire

Newton veut encore montrer que la force invoquée peut rendre compte approximativement de l'amplitude du flux et du reflux. Mais s'il est possible de calculer l'ampleur des forces de marée exercées par le Soleil grâce à la troisième loi de Kepler, il n'y a aucun moyen de connaître directement l'ampleur des marées exercées par la Lune, la masse de celle-ci étant inconnue. Newton calcule donc uniquement l'ampleur des marées solaires. Il ne cherche pas à établir une formule finale mais il progresse par applications numériques successives au cours des propositions 25 et 36 du livre III.

Pour calculer l'élévation des eaux sous l'action du Soleil, Newton considère une Terre fictive, entièrement fluide et homogène : la mer, qui recouvre entièrement la Terre, a donc la même densité que le globe et ne se distingue plus de lui. Pour déterminer la différence de longueur entre le demi-grand axe et le demi-petit axe de l'ellipsoïde de marée, il utilise la même condition d'équilibre que dans le cas de l'aplatissement de la Terre sous l'effet de sa rotation journalière : deux canaux remplis d'un fluide homogène, partant du centre de la Terre et rejoignant la surface, l'un dans la direction du Soleil et l'autre dans une direction perpendiculaire, doivent se faire équilibre. Le canal qui pointe vers le Soleil est plus long que le canal qui lui est perpendiculaire puisque dans le premier canal la force de marée se retranche à la pesanteur alors qu'elle s'y ajoute dans le second. En supposant la proportionnalité entre la force perturbatrice et l'aplatissement de l'ellipsoïde, Newton obtient (proposition 36, livre III) que la force de marée solaire élève le point à l'aplomb du Soleil par rapport aux points situés à 90° de 1,9 pied de Paris (soit près de 60 cm). Ce calcul est exact à condition d'accepter les hypothèses très contraignantes de Newton : il s'agit de l'ampleur des marées d'équilibre d'une Terre fluide, homogène et auto-gravitante (la gravité dépend de la forme de la Terre). Newton conclut : « Une force de cette nature suffit pour causer tous les mouvements de la mer, et elle répond assez exactement à la quantité de ces mouvements. »[6]

---

[6] Isaac Newton, *op. cit.*, livre III, proposition 37, corollaire 1, pp. 98-99.

3. En conclusion des travaux de Newton

Comme on le sait, la réception de la théorie des marées de Newton est très contractée, entre la ferveur de ses compatriotes et la grande hostilité des savants du continent. Pour notre part, résumons d'une manière un peu schématique, les points que nous pouvons retenir.

- Aujourd'hui, sa théorie des marées constitue un aspect peut-être moins connu de sa théorie de la gravitation universelle. En revanche, à son époque, elle est perçue comme étant emblématique de sa conception de la gravitation. D'abord, parce que les marées constituent un des grands défis de l'époque. Ensuite, parce que sa théorie des marées fait intervenir tous les points essentiels de sa physique : attraction universelle de la matière, loi en $1/r^2$, calcul différentiel, etc. Elle déchaîne ainsi les passions avec soit un accueil très fervent, soit au contraire une grande hostilité.
- Le raisonnement de Newton n'est pas direct. C'est en cherchant à expliquer le phénomène céleste des perturbations du mouvement de la Lune qu'il comprend le phénomène terrestre des marées. Les marées et les inégalités du mouvement de la Lune sont donc un seul et même phénomène.
- Le raisonnement géométrique de Newton, où il représente les attractions par des segments de longueurs judicieusement choisies, est profondément astucieux et lui permet de quantifier simplement les forces de marées solaires. Les calculs analytiques modernes plus directs oublient souvent ces astuces géométriques.
- Grâce à sa théorie des marées, il peut estimer la masse relative de la Lune (proposition 37 du livre III) en comparant les hauteurs des marées lors des syzygies et des quadratures. Il apparaît ici un lien entre la mécanique (étude des mouvements) et la physique (étude des caractéristiques des corps). Les marées constituent un exemple où la mécanique permet d'obtenir des informations sur la constitution des corps (d'après Newton, la Lune a une densité plus forte que la Terre).
- Newton fait une percée dans la partie « force », lorsqu'il définit le nouveau concept de force de marée, lorsqu'il explique pourquoi il y a deux marées par jour (ce que Galilée n'avait pas réussi à faire) et lorsqu'il quantifie les marées solaires. Il est moins précis dans la partie « effets », lorsqu'il cherche à calculer la hauteur de la déformation des eaux et à expliquer la diversité des observations des marées dans les ports. S'il a parfaitement compris le principe et l'ori-

gine de la force de marée, il est moins exact lorsqu'il étudie ses conséquences. Cela provient de sa conception statique des marées qui n'est pas satisfaisante puisque ces dernières résultent d'un mouvement dynamique des eaux.

- La théorie des marées de Newton, par ce qu'elle n'explique pas et laisse dans l'ombre, appelle et stimule de nouvelles études. Comme le remarque Greenberg[7], les « défauts » et les « lacunes » des *Principia* constituent un atout formidable pour les recherches ultérieures, car ils donnent la clé de nombreux problèmes sans pour autant les résoudre complètement. Ils constituent une source inégalable de problèmes, susceptibles de donner à ses lecteurs l'envie de faire de la recherche en mécanique et de combler les problèmes en suspens. La théorie des marées de Newton initie un grand nombre d'interrogations à la fois sur le plan théorique et sur le plan des observations, et prépare l'approche dynamique de la Terre et des océans. Elle sera d'abord reprise en 1740 par Daniel Bernoulli et Euler, puis en 1746 par D'Alembert. Elle sera ensuite amenée à sa forme quasi définitive par Laplace à la fin du XVIII[e] siècle.

---

[7] John Greenberg (1987), « Isaac Newton et la théorie de la figure de la Terre », *Revue d'histoire des sciences*, tome 40, n°3-4, p. 364.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BERNOULLI Daniel, « Traité sur le flux et le reflux de la mer », *Pièces qui ont remporté le prix de l'Académie royale des sciences en 1740,* Paris, Martin, Coignard et Guérin, 1741, pp. 55-191.

[2] CARTWRIGHT David Edgar, *Tides. A scientific history,* Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

[3] CHATELET (La marquise du), *Commentaires des Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle,* publiés à la fin de sa traduction de l'œuvre de Newton, réédition Sceaux : Jacques Gabay, 1990.

[4] D'ALEMBERT Jean le Rond, *Réflexions sur la cause générale des vents,* Paris, David l'Ainé, 1747.

[5] DUHEM Pierre, *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, Rivière & Cie, 1906, réédition : Paris, Vrin, 2007.

[6] EULER Leonhard, « Inquisitio physica in causam fluxus ac refluxus maris », *Pièces qui ont remporté le prix de l'Académie royale des sciences en 1740, op. cit.,* pp. 235-350.

[7] GREENBERG John, « Isaac Newton et la théorie de la figure de la Terre », *Revue d'histoire des sciences*, 1987, tome 40, n°3-4, pp. 357-366.

[8] HALLEY Edmond, « The true Theory of the Tides, extracted from that admired Treatise of Mr. Isaac Newton, Intituled, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, being a Discourse presented with that Book to the late King James, by Mr. Edmund Halley », *Philosophical Transactions*, 226, 1697, pp. 445-457.

[9] KOYRE Alexandre, *Études newtoniennes,* Paris, Gallimard, 1991.

[10] LAPLACE Pierre-Simon (de), *Traité de Mécanique céleste,* tome V, livre XIII, Paris, Bachelier, 1825, réédition : New York, Chelsea Publishing Compagny, volume V, 1969.

[11] MACLAURIN Colin, « De causa physica fluxus et refluxus maris », *Pièces qui ont remporté le prix de l'Académie royale des sciences en 1740, op. cit.,* pp. 193-234.

[12] NEWTON Isaac, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle,* traduction de la marquise du CHATELET, 1756, réédition Sceaux : Jacques Gabay, 1990.