

La théorie des marées de Galilée n'est pas une théorie fausse

Essai sur le thème de l'erreur dans l'histoire et l'historiographie des sciences

Pierre Souffrin*

Résumé: Galilée n'a laissé aucun doute sur la place centrale qu'il conférait à sa théorie des marées dans sa défense du système de Copernic. La critique moderne la récuse quasi-unaniment comme fausse ou sans rapport à son objet, généralement sans discussion sinon sans embarras, et la réduit à une anecdote sans grande signification. Pour dépasser un jugement aussi superficiel, j'ai procédé à un examen théorique de la *causa primaria* des marées selon Galilée: la succession quotidienne d'une accélération et d'un ralentissement du mouvement "absolu" des lieux géographiques du fait de la composition des deux mouvements, diurne et annuel, de la terre. Il en ressort 1) qu'une accélération et un ralentissement horizontaux quotidiens résultent bien des deux mouvements supposés, et qu'il en résulterait un phénomène de marée dans les conditions du modèle de Galilée, 2) que ce phénomène est précisément l'une des deux composantes constitutives de la théorie élémentaire newtonienne des marées. Je montre que l'on peut en déduire une présentation non standard de cette dernière théorie comme simple superposition du mécanisme galiléen *stricto sensu* et de l'action du soleil (disons) sur le mouvement des eaux superficielles, action ignorée : ou plutôt qui n'a aucun droit de cité, dans la physique de Galilée. La théorie galiléenne apparaît ainsi, à l'aune de la théorie newtonienne, comme une théorie juste mais partielle des marées.

Abstract: Galileo consistently stated in his correspondence that he considered his theory of the tides the central argument in his defense of Copernicus. It is however refuted by most modern critics as allegedly false or irrelevant, without specific discussion if not without embarrassment, and reduced to an anecdote of little significance. Little satisfied with such an attitude I undertook a theoretical analysis of the *causa primaria* of the tides according to Galileo: the daily succession of an acceleration and of a slowing down for the "absolute" motion of any point at the surface of the Earth resulting from the combined two motions, diurnal and annual. The outcome is 1) the two supposed motions do actually result in successive accelerations and decelerations, inducing a diurnal tide for Galileo's physical model, 2) such a tide is actually one of the two constitutive components of the elementary Newtonian theory of the tides. From this a nonstandard derivation of this Newtonian theory can be exhibited, by the mere superposition of Galileo's mechanical process *stricto sensu* and the action on the seawater of, say, the sun - an action for which there is no room in Galileo's physics. Galileo's theory is then seen, by the light of Newtonian physics, as a correct but partial of the tides.

* Astronome, Observatoire de Nice – souffrin@abs-nice.fr.

Introduction

QUELQUES RECHERCHES sur les travaux scientifiques de Galilée et sur l'histoire que l'on en fait m'ont conduit, sans que je l'aie en rien cherché, à rencontrer le thème de l'erreur si fréquemment et sous une telle variété d'aspects que j'en suis arrivé à tenter d'ébaucher une typologie raisonnée de l'erreur en histoire des sciences centrée, pour baliser le champ, sur les études galiléennes (en comprenant cette expression dans son extension la plus large: les travaux de Galilée, les travaux sur Galilée, les travaux sur les œuvres de Galilée).

Plusieurs caractéristiques concourent à faire des études galiléennes un champ particulièrement propre à une telle exploration.

Les sources primaires dont nous disposons, en ce qui concerne la personnalité et l'œuvre de l'homme lui-même, sont d'une extension singulière. À côté des œuvres qu'il a publiées, Galilée conservait une masse de brouillons, de premières ébauches, de traités rédigés puis abandonnés, auxquels s'ajoute une correspondance abondante. La disponibilité de ce corpus est elle-même exceptionnelle grâce au monumental travail d'édition critique de Favaro dont l'*Edizione Nazionale*¹, toujours disponible, n'a négligé que quelques folios autographes sur lesquels ne se trouvent que des opérations arithmétiques sans texte.

S'agissant d'une œuvre qui a joué un rôle décisif dans la formation de la culture européenne moderne, la littérature secondaire est évidemment extrêmement copieuse: elle s'accroît en moyenne de plusieurs dizaines d'articles de recherche et de plusieurs livres chaque année. Entre les sources primaires et la littérature secondaire, c'est donc un matériel riche et doté d'une certaine unité par constitution qui s'offre à l'exploration d'un thème, et celui de l'erreur, comme je l'ai dit, s'est présenté avec insistance dans les recherches que j'ai menées sur le travail de Galilée sur la théorie du mouvement.

Si la littérature secondaire concernant Galilée est abondante, elle n'en est pas pour autant très variée: la répétition semble sans limite d'un nombre très restreint de passages supposés représentatifs et canoniques, toujours les mêmes avec toujours les mêmes commentaires.

La réduction de l'œuvre à une très petite partie, canonique donc par force, que l'on peut présenter comme relativement cohérente ou ne contenant d'incohérences que ce que l'on peut justifier ou exploiter clairement dans le cadre d'une conception théorique préétablie de l'histoire des sciences ne saurait

¹ Galileo Galilei, *Le opere* (Firenze: Barbèra, 1899-1909 réimpression 1964-1968). Dans la suite, EN X, nn est mis pour la page nn du volume X de cette édition.

trop surprendre: c'est une caractéristique de la vulgate de l'histoire des sciences, et le genre a ses justifications. On relèvera cependant que dans le cas des études galiléennes cette pratique est également fréquente dans les ouvrages savants, livres ou articles, des historiens des sciences et des épistémologues. C'est en fait un large consensus sur la notion d'incohérence concevable ou inconcevable dans le cadre d'une théorie de l'histoire des sciences qui me semble à la fois définir le corpus canonique retenu pour représenter l'œuvre, et rendre compte de la quasi unanimité de la littérature sur la qualification même des incohérences ou erreurs alléguées.

Première partie: "come è noto, la teoria galileiana è erronea"

La renaissance et le problème des marées

Pour rester dans un format compatible avec ce volume collectif, et en hommage à l'intérêt que Jacques Merleau-Ponty a porté, en plusieurs occasions, à la cosmologie et à Galilée, je vais tenter d'illustrer ces problèmes sur le cas de la théorie galiléenne des marées (TGM dans la suite). Cette épisode de l'histoire des sciences est exemplaire à bien des points de vue pour mon propos.

En premier lieu il est clair que l'enjeu théorique est ici d'une importance historique exceptionnelle. Cet enjeu n'est pas en premier lieu, *rétrospectivement*, la production d'une théorie des marées; l'enjeu principal, du point de vue de l'épistémologie moderne, est la recherche d'une preuve physique irréfutable du double mouvement – journalier et annuel – de la terre demandé par le système de Copernic (pour serrer l'argument, je négligerai ici le rôle historique du problème du troisième mouvement de la terre dans ce système). Il s'agit, avec ces mouvements de la terre, du véritable talon d'Achille de la physique et du cosmos aristotéliens: E. Grant a montré d'une façon convaincante², par une argumentation historique (et ici les arguments usuels non étayés par des sources textuelles ne sont que des exercices de dialectique sinon de sophistique) qu'au XVI^e siècle les partisans du cosmos et de la physique d'Aristote parvenaient à absorber bien des nouveautés sans se trouver vraiment ébranlés, comme la corruptibilité des cieux (les taches solaires, la nova de 1604, ...), même les phases de Vénus, mais que l'héliocentrisme, s'il venait à être démontré par une preuve physique irréfutable,

2 E., Grant, "A New look at Medieval Cosmology, 1200 – 1687", *Proceedings of the American Philosophical Society*, 129(1985), 417-32.

table, ruinait l'édifice sans possibilité de récupération. Il est attesté que Galilée lui-même considéra très tôt le phénomène des marées comme un argument décisif, ou plutôt comme la seule preuve de la réalité objective des deux mouvements la terre et qu'il tint cette position jusqu'à ses dernières années³ Je ne veux certainement pas suggérer que l'adhésion de Galilée au système de Copernic ait pu dépendre d'une telle preuve physique: elle reposait évidemment en premier lieu sur son rejet de la philosophie naturelle aristotélicienne et scolastique, et en second lieu, comme celle des coperniciens contemporains et pour tout dire de Copernic lui-même, sur la cohérence d'un faisceau d'arguments dont on avait reconnu dès le XIV^e siècle aussi bien la force persuasive que le caractère non probant⁴

Pour apprécier la force que pouvait revêtir, dans une polémique, un argument construit sur une théorie des marées, il est bon d'avoir à l'esprit que le phénomène des marées était perçu par les aristotéliciens de la Renaissance comme le seul phénomène cosmologique dont le Philosophe n'avait pas réussi à donner l'ombre d'une explication. La popularité dont jouissait alors la légende d'un Aristote se suicidant (cf. EN VII, 459), en se précipitant dans la mer du haut des rochers du Négroponte par désespoir de ne savoir en dire quelque chose de plausible, atteste l'importance accordée au problème. Mario Helbing fait remarquer⁵ qu'à la charnière du XVI^e et du XVII^e siècles l'explication théorique des marées représentait un tel défi pour la philosophie naturelle que le philosophe qui y parviendrait était sûr d'acquérir immédiatement une notoriété et une autorité considérable, et en conclut que cela fut probablement la motivation première de l'intérêt de Galilée pour une théorie du phénomène. Faire de la recherche d'une preuve du double mouvement de la terre l'origine des recherches galiléennes sur les marées, pour être plus conforme avec notre hiérarchie des problèmes épistémologiques, impliquerait, si l'on y regarde bien, une intuition préalable que le phénomène des marées pourrait constituer une telle preuve; on voit

3 Le *Discorso del Flusso e refluxo del mare*, EN V, 378 ff date de 1616, et est repris très largement en 1632 dans le *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, EN VII, 27-546. Dans la suite on désignera par *Dialogo* (1998) la grande édition critique: Galileo Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico e Copernico*, Edizione critica e commento a cura di O. Besomi e M. Helbing, vol. I Testo, vol. II Commento (Padova: Antenore, 1998).

4 Voir P. Souffrin, "Oresme, Buridan, et le mouvement de rotation diurne de la terre ou des cieux" *Terres médiévales*, ed. B. Ribémont; (Orléans: Kincksieck, 1992). "ce sont là arguments qui ne concluent pas" (Oresme).

5 M. Helbing, communication privée. On trouvera des indications précises sur cette tradition dans *Dialogo* (1998), Vol. II, p. 831 ff.

mal comment une telle intuition aurait pu précéder toute idée de solution théorique du problème des marées⁶. Il n'a pas été historiquement démontré, à ma connaissance, que le problème de la supériorité objective du système de Copernic sur celui de Tycho-Brahé aurait été perçu, avant la diffusion publique des propositions de Galilée, comme un problème crucial de la philosophie naturelle; bien que cela soit fréquemment soutenu, il ne s'agit que de l'une de ces thèses qui conviennent si bien à l'idéologie dominante de l'histoire des idées scientifiques qu'elles semblent ne nécessiter aucune justification et ne souffrir aucun questionnement. La force accordée très largement, encore au début du XV^e siècle, aux arguments bien connus, depuis alors plus de deux siècles, qui en suggéraient l'équivalence vis-à-vis de l'observation, de l'expérience et de la raison⁷, éclipsait l'intérêt pour une improbable possibilité de discrimination objective entre les grands systèmes du monde.

Des marées aux mouvements de la terre selon Galilée

La solution de Galilée au problème des marées repose sur l'analogie qu'il établit entre le phénomène communément observé des oscillations de l'eau contenue dans un récipient soumis à des phases d'accélération et de décélération et les oscillations des mers à la surface du globe terrestre; en présentant comme indissociables le phénomène – évident – des marées et le double mouvement de la terre autour du soleil, cette solution modifiait radicalement la hiérarchie des enjeux. La possibilité de trancher, par la seule existence d'un phénomène évident, de la vieille question du mouvement de la terre ou des cieux se présentait exposée ainsi pour la première fois⁸ sur des bases nouvelles depuis les argumentations du XIV^e siècle qui avaient laissé les partisans des deux thèses égale-

6 Cette proposition s'oppose au point de vue exprimé par Popper dans *Objective knowledge* (Oxford: University Press, 1979), (pp. 170-180): "It was another problem which led [Galileo] to the problem of the tides: the problem of the truth or falsity of the Copernician theory" (p. 172). Cette opinion de Popper est séduisante épistémologiquement, mais ne tient pas compte de la situation historique du problème des marées soulignée par Besomi et Helbing.

7 Oresme, *Du ciel et du monde*, cité in Souffrin, *op. cit.*: "... Mais, sous toute réserve, il me semble que l'on pourrait bien soutenir et illustrer la dernière opinion, à savoir que la terre est mue d'un mouvement journalier et le ciel non. Et je veux établir que l'on ne pourrait montrer le contraire par aucune expérience, ni par le raisonnement, et j'apporterai à ceci des raisons."

8 Sur l'existence de propositions assez proches de celles de Galilée, mais beaucoup moins développées et non publiées, aux XVI^e et au XVII^e siècles, voir W. R. Shea, *Galileo's Intellectual Revolution. Middle Period, 1610-1632*. (New York: Neale Watson Academic Publications, 1977). Traduction française par F. De Gandt: Le Seuil, Paris, 1992.

ment satisfaits par l'indécidabilité dans le champ de la philosophie naturelle. La nécessité du double mouvement de la terre dans l'explication galiléenne des marées transformait radicalement le problème de la comparaison des grands systèmes du monde et lui conférait un statut révolutionnaire. Ce statut révolutionnaire du problème des grands systèmes est un lieu commun de l'histoire de la pensée scientifique; ce qui est moins généralement perçu est que cette révolution était ancrée, pour Galilée lui-même, plus radicalement dans sa théorie des marées que dans toute autre argumentation, phases de Vénus et satellites de Jupiter compris. Cette théorie des marées a particulièrement préoccupé ses adversaires et en particulier la cour pontificale, probablement dès son premier procès de 1616, certainement lors du procès de 1633 puisque parmi les huit présomptions de culpabilité retenues contre Galilée le seul argument de philosophie naturelle mentionné est la preuve du copernicisme par la théorie des marées⁹ Enfin c'est cette théorie des marées – reprise quasiment inchangée du discours de 1616 – qui couronne le grand œuvre de la fin de sa vie, le *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Si l'on rappelle qu'il entendait titrer le *Dialogo De fluxu et refluxu maris*¹⁰ – il en fut dissuadé par ses amis et par les pressions de ses puissants adversaires – on reconnaîtra que non seulement il a soutenu cette théorie de façon constante sans l'amender en rien, mais encore qu'il la considérait comme une pièce maîtresse de sa philosophie de la nature.

La théorie galiléenne des marées (tgm) devant l'histoire

L'appréciation des historiens devant une théorie aussi importante pour son auteur, alors que cet auteur est considéré comme l'un des plus importants de l'histoire de la pensée scientifique, est assez paradoxale. Elle est dominée par un jugement quasi unanime: la théorie des marées de Galilée est une théorie fausse¹¹ Embarrassés par cette malheureuse errance, les historiens ont le plus

9 Voir par exemple F. Lo Chiato, S. Marconi, *Galilée entre le pouvoir et le savoir*. (ALINEA: Aix en Provence, 1988).

10 Voir *Dialogo* (1998), Vol. II, p. 39.

11 Par exemple: E.J. Aiton, "Galileo's Theory of the Tides", *Annals of science*, 1965, 10: 44-57: *Though fundamentally false, Galileo's theory of the tides merits attention...*; M. Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée* (Paris: Armand Colin, 1976, rééd. Albin Michel, 1996): "*Qu'il s'agisse des marées ou des vents alizés, l'argumentation de Galilée est donc profondément défectueuse*", p. 482; P. Costabel, *Encyclopaedia Universalis*, article "Galilée": "*la seule preuve formelle qu'il proposait du mouvement de la terre, à savoir le flux et le reflux de la mer, ne valait absolument rien*".

souvent négligé la quatrième Journée du *Dialogo*, passant la théorie des marées et ses conséquences cosmologiques aux profits et pertes de l'histoire¹².

Dans une importante introduction à son édition du *Dialogo*, Sosio analyse très justement la situation: “*La quatrième Journée du Dialogo est généralement considérée comme la moins importante, la moins réussie, la plus faible du point de vue scientifique – une sorte d’appendice non essentiel du Dialogo, et comme telle rapidement expédiée dans les présentations, et traitée de façon tout à fait insatisfaisante par les rares commentateurs. Il me semble nécessaire de réfuter ce procédé: celui qui s’occupe d’histoire des sciences sait bien qu’il n’est pas de saine méthodologie de garder ce qui survivra et de jeter à l’eau les parties mortes, et que parfois justement une erreur se révèle être plus productive qu’une vérité trouvée par hasard. Si l’on considère le Dialogo dans son ensemble, les trois premières Journées se présentent comme une préparation lente et patiente [...] Les trois premières Journées n’apportent aucun argument concluant. [...] Galilée a vu dans la théorie des marées l’unique preuve physique irréfutable du mouvement de la terre et lui a réservé la place d’honneur, celle de l’argument décisif*”¹³. A la suite de cette analyse, à laquelle j’adhère complètement, Sosio ajoute: “*comme on sait, la théorie galiléenne est fausse, au moins dans la mesure où elle prétend expliquer un phénomène essentiellement dû à d’autres causes*”.

J’ai dit plus haut que la TGM était considérée unanimement comme une théorie fausse. Sans doute Sosio partage-t-il cette opinion, mais il modère cette conclusion – qui prise à la lettre est tout de même ravageuse pour l’ouvrage dont Sosio a correctement rétabli l’économie contre la lecture habituelle – en précisant qu’elle est fausse “au moins en tant que théorie de marées” Cette précision est potentiellement très importante du point de vue épistémologique, dans la mesure où elle laisse ouverte une possibilité que cette théorie ne soit fausse “que comme théorie des marées” Si cette voie entrevue n’est pas explorée par Sosio, il faut reconnaître qu’il est l’un des rares commentateurs à avoir émis une réserve¹⁴ à la qualification de théorie fausse partout affirmée; cependant, en l’absence de développement son argument reste imprécis et empreint d’ambiguïtés. Cette réserve pertinente trahit essentiellement une perplexité que de rares auteurs se sont risqués à exprimer. Ainsi Finocchiaro, qui ose ce courageux commen-

12 Par exemple, Clavelin ne réserve à la TGM que quelques pages en appendice de *La philosophie naturelle de Galilée*, qu’il conclut ainsi: “*La quatrième journée [...] n’est pas tout à fait sur le même plan que les autres journées. Son apport pouvait donc être dissocié (comme cela se produisit effectivement) sans que l’influence de l’œuvre en soit d’aucune façon amoindrie*”, p. 482.

13 Sosio, L., dans son introduction à: *Galileo Galilei, Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, a cura di Libero Sosio* (Torino: Einaudi editore, 1970, 1982), p. LXXII.

14 Voir cependant *supra* note 21.

taire: “*this causal explanation is erroneous, although his supporting argument is not worthless, and it is not clear where his reasoning goes wrong*”¹⁵, ou De Gandt¹⁶ qui donne un sous-titre interrogatif: “*La théorie des marées, une erreur mémorable?*” mais se contente d’ajouter: “*la théorie galiléenne des marées a été unanimement rejetée comme fausse et mal accordée aux observations. Et pourtant il faut encore la lire [...] Galilée fait preuve d’une étonnante ingéniosité [...]*”

Si prudentes et peu concluantes qu’elles soient, les citations qui précèdent sont loin d’être représentatives des commentaires modernes sur cette question; la théorie galiléenne est très généralement considérée péremptoirement¹⁷ comme une erreur malheureuse, que l’on peut comprendre dans le contexte historique mais dont le traitement le plus honorable pour son auteur serait l’oubli pur et simple.

L’analyse de la TGM par Mach¹⁸ est d’une tout autre teneur, aussi bien sur le plan de l’épistémologie que de la compétence scientifique. Son objection porte – du moins en apparence – sur le modèle développé par Galilée et non sur ce qui le distingue de la théorie newtonienne. Mach conclut de sa discussion que le modèle de Galilée serait stationnaire, c’est à dire qu’il ne comprendrait aucune accélération superficielle *dépendant du temps*; dans ces conditions la discussion galiléenne serait effectivement radicalement invalidée.

Popper, dans *Objective Knowledge*¹⁹, hésite curieusement entre cet argument de Mach et une variante consistant à considérer qu’au modèle de Galilée correspondrait bien un effet dépendant du temps, mais d’une amplitude négligeable et par là étranger au phénomène des marées. Cette dernière variante de

15 Finnochiaro, M. A., *Galileo on the World Systems, A New Abridged Translation and Guide, Translated and edited by* – (Berkeley/Los Angeles/London: University of California Press, 1997), p. 397.

16 De Gandt, dans sa présentation du *Dialogo* ..., traduction française par R. Fréreau avec le concours de F. De Gandt, (Paris: Le Seuil, 1992), p. 27.

17 Les affirmations sont parfois d’autant plus péremptoires que l’argumentation est – pour le moins – discutable. Ainsi Clavelin estime que “*Si l’explication de Galilée était exacte, ce sont tous les corps non rigidement liés à la terre qui devraient, chaque vingt-quatre heures, être alternativement projetés vers l’avant et vers l’arrière ...*” (*op. cit.* p. 480). Si cette objection était pertinente, Clavelin devrait soutenir que cela se produit effectivement toutes les douze heures, selon la théorie de Newton. Il poursuit dans la même veine: “*Galilée ne voit donc pas que la quatrième Journée du Dialogue est incompatible avec la seconde*”; Clavelin semble “donc” ne pas distinguer pas entre une rotation uniforme et la composition de deux rotations uniformes, distinction qui est la base de la TGM.

18 Mach, E. *La mécanique/ exposé historique et critique de son développement* (Paris: Hermann, 1904, Gabay, 1987), Ch. II, IV, 11, p. 208 ff.

19 *Op. cit.*, note 6. Je remercie J.-J. Szczeciniarz de m’avoir signalé l’intervention de Popper sur ce problème historique.

la théorie de Mach avait déjà été soutenue par Strauss²⁰ dans le commentaire à son édition du *Dialogo*.

Pour tous les commentateurs, en fin de compte, la TMG est une théorie fausse, au mieux ingénieuse; aucun²¹ ne semble avoir entrevu au moins une possible pertinence de cette théorie au but que Galilée vise dans le *Dialogo*: une preuve physique du double mouvement de la terre.

Un réexamen nécessaire

Les hésitations qui ont pu être exprimées quant à la simple qualification comme théorie fausse de la TGM, si exceptionnelles qu'elles aient été, pourraient suffire à rendre nécessaire un réexamen critique de cette qualification. De deux choses l'une en effet: ou bien ces hésitations sont mal fondées, et il faut alors le montrer, ou bien elles ont quelques fondements solides dont on doit alors en explorer les conséquences. Il faut reconnaître que dans la dernière hypothèse on pourrait s'étonner que ceux qui ont eu assez de lucidité pour émettre ces réserves aient pu en rester là.

Quant à l'objection soulevée par Mach, le peu de cas qui en est fait par les historiens des sciences peut surprendre; car si elle est irréfutable, elle dit tout sur la TMG et rend vaine les tergiversations dont il vient d'être question. Elle a été peu citée et mal comprise lorsqu'elle a été citée²²: ceci éclaire peut-être cela. Un examen critique en est cependant nécessaire, et je montrerai plus loin qu'elle est réfutable en tant que critique du modèle de Galilée.

Avant d'aborder ce programme il est convient de décrire plus précisément le contenu de la proposition galiléenne.

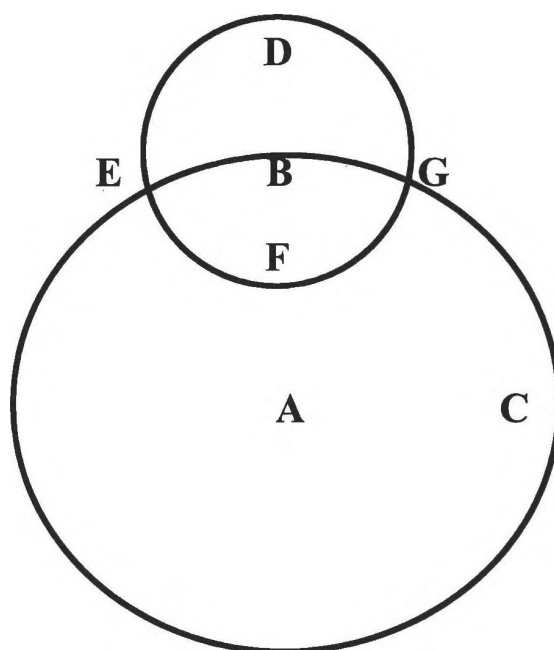
20 E. Strauss in: Galileo Galilei, *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme* (Leipzig: 1891) p. 566. J'ai souvent entendu ce même argument (i.e.: si il y a un effet, il est négligeable) dans les discussion que j'ai pu avoir à propos de la TGM.

21 Note ajoutée aux épreuves: J'ai eu connaissance, après cette conférence, de deux exceptions notables curieusement ignorées par la littérature historique. Nobile (1954) et Burstyn (1962) ont en effet contesté sans ambiguïté la thèse d'un caractère *essentiellement erroné* de la TGM, c'est-à-dire ont soutenu *quant au fond* la thèse je soutiens ici. Voir ma discussion dans *Cahier du SEHS*, 25 (1999) sur <http://wwwrc-obs-azur.fr/cerga/hdsn/Psouffrin/souffrin.html>.

22 Par exemple par W. Shea *op. cit.*, p. 174 (trad. fr., p. 228). L'ouvrage de Shea, bien qu'embarrassé d'erreurs de géométrie et de mécanique, n'en est pas moins, à mon avis, l'une des meilleures présentations de la philosophie naturelle de Galilée. Cf ma revue dans *AIHS*, 45 (1995), 171-3.

La théorie galiléenne des marées: simplicité et sophistication

La TGM repose d'abord, comme je l'ai indiqué plus haut, sur la référence aux mouvements d'un liquide par rapport au récipient qui le contient lorsque celui-ci est soumis à des accélérations et décélérations successives. Galilée affirme que dans l'hypothèse d'un double mouvement de la terre – un mouvement de rotation uniforme autour de son centre, et un mouvement de circulation uniforme de ce centre sur une orbite circulaire autour du soleil – les grandes masses d'eau à la surface de la terre se trouvent dans leurs bassins naturels comme l'eau dans un tel récipient. Alors, remarque-t-il, la composition des deux mouvements de rotation uniforme – la rotation diurne et le mouvement orbital annuel – a pour effet que le bassin de tout lac, mer ou océan a un mouvement non uniforme, la rotation diurne s'ajoutant au mouvement orbital au milieu de la nuit et s'en retranchant au milieu du jour²³ Pour faire plus facilement comprendre ce résultat, Galilée l'explique sur la figure ci-dessous où, pour simplifier, il fait coïncider le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique.



23 *"Dalla composizione di questi due movimenti, ciascheduno per sè stesso uniforme, dico risultare un moto difforme nelle parti della Terra"* (EN VII, p.452).

Le cercle EGFD représente la terre, B son centre, le cercle C de centre A l'orbite annuelle. Un point fixe sur la terre parcourt le petit cercle en un jour et le centre B parcourt le cercle C en un an, les deux rotations étant de même sens, disons de D vers E. Galilée fait voir par la figure que *"lorsque [la surface terrestre] tourne autour de son propre centre, il résultera forcément pour les parties de cette surface, par le couplage entre ce mouvement diurne et le mouvement annuel, un mouvement absolu <un moto assoluto> tantôt très accéléré, tantôt tout autant retardé pour les parties de cette surface [...] Donc, si il est vrai (et l'expérience prouve que c'est bien vrai) que l'accélération et le ralentissement du mouvement d'un vase fait aller et venir, et monter puis descendre à ses extrémités, l'eau qu'il contient, qui saurait ne pas concéder qu'un tel effet puisse, ou plutôt doive également se produire de toute nécessité dans le cas des mers, dont les contenants sont soumis à de semblables variations [...]?"*²⁴

Cette description préliminaire n'est qu'une version très simplifiée de la discussion que Galilée développe, dans les pages qui suivent, pour tenir compte de façon de plus en plus réaliste des caractéristiques géométriques et cinématiques des mouvements de la terre selon Copernic et des conséquences de la diversité topographique des côtes et des fonds sur les eaux en mouvement. Dans son ensemble, l'argumentation de Galilée est finalement très sophistiquée, complexe, impliquant l'inclinaison de l'écliptique et le mouvement orbital de la lune autour de la terre pour ce qui est de la cosmographie, les mouvements que nous appelons des oscillations propres d'une masse fluide et sa conception d'un *impetus* spontanément dissipatif²⁵ pour ce qui est de la physique, pour ne citer que quelques-uns des ingrédients qui font partie de l'arsenal explicitement mis en œuvre dans la comparaison de son modèle théorique aux observations. Mais il est parfaitement clair que Galilée considère que le modèle simple suffit à lui seul pour démontrer l'essentiel, à savoir que les deux mouvements de la terre ont pour conséquence nécessaire des flux et reflux des eaux superficielles de la même nature que ceux que l'on observe dans le phénomène des marées, et qu'en l'ab-

24 E.N. VII, p. 453.

25 Galilée explique l'absence de marées de l'air atmosphérique et les alizés par les propriétés de l'*impetus* dissipatif dont il a développé le concept dans le chapitre 17 de son *De motu antiquiora*. Je ne vois pas d'autre interprétation possible pertinente du passage crucial de cette démonstration: *"imperocché, come altra volta s'è detto, i corpi leggeri sono ben più facili ad esser mossi che i più gravi, ma son ben tanto meno atti a conservare il moto impressoli, cessante la causa movente"* (*Dialogo*, EN VII, p.463). Ignorant – ou négligeant – cette proposition, Clavelin considère que toute cette discussion est, elle aussi, incompatible avec la deuxième journée du *Dialogo* (*op. cit.* p.481). Cette accumulation d'incompatibilités alléguées (par Clavelin mais aussi par d'autres) suggère plutôt qu'on affaiblit la cohérence de la philosophie naturelle de Galilée en évacuant arbitrairement certains concepts pre-modernes qui peuvent s'y lire.

sence de toute explication alternative (recevable) les marées constituent une preuve du double mouvement de la terre.

Dans la mesure où le jugement porté par la critique moderne sur la TGM, c'est-à-dire sa qualification comme fausse, et non pas simplement comme incomplète ou imprécise, s'articule essentiellement sur le modèle simplifié, et que ce qui est ici d'abord en examen est justement cette qualification, c'est sur la discussions des propriétés de ce modèle que je développerai ma réfutation de ce jugement.

Deuxième partie:

la théorie des marées de Galilée comme théorie fausse

Sur la réfutation d'une théorie par une théorie

L'objection "théorique" la plus fréquemment opposée à la TMG est l'affirmation que la théorie newtonienne de l'attraction gravitationnelle est le fondement de la théorie correcte (de l'essence) du phénomène de marée, et que la TGM en ignore, bien évidemment, les concepts fondamentaux. Cette objection épistémologiquement très naïve ne mériterait guère l'attention si elle n'était émise de façon si constante, par des scientifiques presque toujours, par des historiens des sciences souvent, et parfois même par des philosophes – sous une forme plus ambiguë bien sûr. Il n'est donc peut-être pas hors propos de souligner que juger de la pertinence d'une théorie physique par une référence à une autre théorie physique relève d'une confusion sur le rapport des théories aux phénomènes. La justification apparente d'une démarche de ce genre réside dans le fait que certaines théories peuvent légitimement être comparées, et qu'une théorie peut être dite, d'une certaine façon, supérieure à une autre; la question est justement de savoir de quelle façon. Dans le cas par exemple où l'une des théories conduirait, pour tous les *phénomènes* dont l'autre théorie peut donner une description, à un meilleur accord entre les déductions de la théorie et les phénomènes, on devra certainement dire qu'elle elle est meilleure en tout point *comme théorie*, mais en conclure à une supériorité ontologique de ses *concepts* constitutifs sur ceux de la théorie qu'elle surpasse reviendrait à une réification de ces concepts, ce qui n'est philosophiquement pas défendable.

Si une théorie peut-être normative par rapport à une autre, ici par exemple la théorie de Newton par rapport à la TGM, ce ne peut être par référence aux concepts qui les constituent, mais seulement par la comparaison des conséquences des deux théories. Seule la confrontation des implications d'une théo-



Il n'est pas possible, et il ne sera pas nécessaire, de décrire ici en quelques détails cette complexité *phénoménale* des marées. Il suffira à notre propos de rappeler que l'aspect le plus caractéristique *qualitativement*, bien connu et observé de longue date est que, de façon dominante à l'échelle du globe, la marée en un lieu géographique se produit *deux fois par jour*, et plus précisément deux fois par *jour lunaire* si l'on entend par jour lunaire le temps qui sépare deux passages successifs de la lune au méridien du lieu (soit un peu moins de 25 heures).

La théorie newtonienne comme théorie des marées

On sait que Newton, dans ses *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, rend précisément compte de cet aspect caractéristique: "*Par les corollaires 19 et 20 de la Proposition 66 du premier Livre, on voit que la mer doit s'abaisser et s'élever deux fois chaque jour tant solaire que lunaire*"³⁰

Ces deux marées quotidiennes correspondent au fait que le niveau moyen des eaux superficielles présente en permanence deux renflements antipodiques le long du diamètre terrestre dirigé vers le disque lunaire (pour ne parler que du phénomène quantitativement dominant). Cette figure caractéristique du géoïde est obtenue comme une conséquence nécessaire de la théorie newtonienne, et même plus précisément de la forme la plus simple de la théorie, dite *théorie statique* des marées, qui ne considère que la figure d'équilibre du géoïde. Il n'est peut-être pas déplacé de souligner que la théorie newtonienne des marées implique, pour rendre compte de deux marées quotidiennes en un lieu géographique, un double mouvement de la terre par rapport à l'astre responsable de la marée. En effet, si la terre montrait toujours la même face à son satellite (pour ne parler que de l'effet dû à la lune), le niveau des eaux ne serait pas variable dans le temps en un lieu géographique donné, comme on peut le déduire de façon certaine justement de ce que nous savons de la théorie de Newton; il n'y aurait alors à proprement parler pas de marées mais seulement une déformation symétrique géographiquement stationnaire de la surface du géoïde aqueux. La complexité dont il a été question a pour conséquence que la théorie statique est gravement déficiente lorsqu'il s'agit de donner quelque estimation quantitative d'intérêt pratique en un lieu donné, comme l'amplitude, la phase ou même la période précise du phénomène réel. Mais la forme général du géoïde est le phénomène le plus caractéristique à grande échelle. Pour cette raison, seule une

30 Je cite d'après I. Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, Trad. Marquise du Châtelet, (Paris: Blanchard, 1966), Livre III, Proposition XXIV, Théorème XIX.

théorie qui rend compte de la double marée quotidienne peut être considérée comme une théorie *satisfaisante* des marées, et pour cette raison encore il est raisonnable de dire que la *théorie statique* de Newton, si imprécise qu'elle soit, est essentiellement une théorie juste des marées.

La théorie newtonienne et ses développements au XVIII^e siècle ont été popularisés dans un grand article de d'Alembert dans l'*Encyclopédie Méthodique Mathématiques*³¹, dont on ne peut que souligner l'intérêt historique.

Troisième partie: la théorie de Galilée revisitée

Les fondements conceptuels de la tgm

Les deux fondements de la description newtonienne sont le concept de force à distance et celui de force d'inertie, c'est-à-dire les effets dus au fait que la terre ne soit ni au repos ni en mouvement uniforme de translation, pour rester dans le langage de Newton.

La force à distance a deux fonctions dans la théorie de Newton. Avec le globe terrestre comme centre, elle rend compte de la *gravitas* – c'est-à-dire du poids – des eaux, donc de leur stabilité dans leurs bassins. Avec l'astre perturbateur, disons la lune, comme centre elle rend compte ensuite, *par composition avec des forces d'inertie centrifuges*, de la symétrie du géoïde aqueux qui est, nous l'avons vu, le phénomène justement dont *doit* rendre compte une théorie pour qu'on puisse la considérer comme *satisfaisante*.

Qu'en est-il des fonctions de la force à distance de Newton dans le modèle galiléen?

La première de ces fonctions trouve chez Galilée un parfait équivalent fonctionnel, précisément en la *gravitas* que Galilée attribue *par nature* à tout les corps terrestres. La *propria gravitas* est pour Galilée la tendance ou propension des corps au mouvement vers le centre de la terre. Pour ce qui est de la stabilité des eaux dans leurs bassins, où la variation du poids avec le lieu n'est pas essentielle, cette conception de la *gravitas* est aussi valable et efficace que la conception newtonienne.

Dans sa seconde fonction, la force d'attraction gravitationnelle de Newton n'a pas de substitut dans la physique galiléenne. Dans le cadre des concepts

31 D'Alembert, *Encyclopédie Méthodique. Mathématique*. (Paris: Panckoucke; Liège: Plomteux, 1785) Vol. II, Article: Flux et reflux. Le caractère dominant des composantes *horizontales* des forces dans les effets de marées, généralement ignoré par les non-spécialistes, y est expliqué clairement, p. 62).

galiléens, la force gravitationnelle de Newton due à la lune – ou au soleil – serait une *gravitas* des corps terrestres correspondant à une tendance ou propension au mouvement vers le centre du mouvement orbital, qui se composerait avec la *gravitas propria*, et qui dépendrait de la distance à cet astre. De telles conceptions sont absolument étrangères à la philosophie de la nature de Galilée. Dans le modèle mécanique de la TGM rien ne joue un rôle comparable à l'attraction gravitationnelle de l'astre autour duquel a lieu le mouvement orbital, si ce n'est que *par nature* la terre a un tel mouvement orbital.

Quant aux forces d'inertie, le schéma théorique de Galilée les prend fondamentalement en considération, comme effets conjugués d'un mouvement non uniforme du contenant et de la propension (*propensione*) du contenu à la suite d'un mouvement uniforme.

On voudra peut-être objecter que Galilée ne pouvait pas maîtriser le concept de force d'inertie. Soit, si on l'entend dans un sens très général, mais les forces d'inertie dont il est question ici sont celles que l'on appelle aujourd'hui forces centrifuges; or, Galilée explique longuement la nature inertielle de la force centrifuge dans la deuxième Journée du *Dialogo*³², et le fait qu'il ne parvienne pas à en comparer correctement *quantitativement* les effets à la chute libre ne fait rien à l'affaire. Qualitativement les effets centrifuges des rotations sont aussi bien compris par Galilée que quelques années plus tard ils le seront par Huygens qui ira lui, jusqu'à la maîtrise quantitative. Contrairement à ce que peut laisser penser le discours habituel des historiens sur le concept d'inertie chez Galilée, celui-ci admet – et cela n'est pas une innovation – que la force centrifuge affecte les corps célestes en mouvement circulaire aussi bien que les corps élémentaires du monde sublunaire³³; c'est donc de façon parfaitement cohérente

32 Par exemple, EN VII, p. 216: "*i corpi gravi, girati con velocità intorno a un centro stabile, acquistano impeto di muoversi allontanandosi da quel centro, quando anco e' sieno in stato di aver propensione di andarvi naturalmente. Leghisi in capo di una corda un secchiello, dentrovi dell'acqua, e tenendo forte in mano l'altro capo, e fatto semidiametro la corda e 'l braccio, e centro la snodatura della spalla, facciasi andare intorno velocemente il vaso, sì che egli descriva la circonferenza di un cerchio [...] seguirà che l'acqua non cascherà fuori del vaso, anzi colui che lo gira sentirà sempre tirar la corda e far forza per allontanarsi più dalla spalla [...] e se in cambio d'acqua si metteranno pietruzze, girando nell'istesso modo, si sentirà far loro l'istessa forza contro alla corda.*"

33 EN VII p. 146, note marginale: *Accresce l'inverisimile (e sia il sesto inconveniente), a chi più saldamente discorre, l'essere inescogitabile qual deva esser la solidità di quella vastissima sfera[...]: o se pure il cielo è fluido, come assai più ragionevolmente convien credere, sì che ogni stella per sè stessa per quello vadia vagando, qual legge regolerà i moti loro ed a che fine, per far che, rimirati dalla Terra, appariscano come fatti da una sola sfera?* [paraphrase: Si la terre est immobile, on comprend difficilement la solidité de l'immense sphère céleste à laquelle les étoiles seraient fixées, et si cette sphère est fluide (ce qui semble beaucoup plus raisonnable) on ne comprend pas ce qui peut ainsi régler le mouvement d'ensemble des étoiles comme celui d'une seule sphère].

que Galilée considère un effet centrifuge de la rotation orbitale sans avoir de conception *dynamique* de la cause de ce mouvement orbital.

Il convient de rappeler à ce point que s'il est bien avéré que Galilée prétendait avoir effectivement expliqué les marées, et que cela fut son projet initial, nous avons vu que l'enjeu s'est trouvé profondément modifié par le contenu même de la théorie: dès sa première version de 1616 il devient avant tout de proposer une preuve observable du double mouvement de la terre.

Le problème historique ne peut donc être réduit à la question du rapport du modèle de Galilée au phénomène des marées; la question se pose également de savoir si la TMG, qu'elle soit ou non une théorie satisfaisante des marées (ce que l'on accordera, pour faire court, à celle de Newton), serait de nature à justifier la prétention de Galilée de présenter une preuve du double mouvement de la terre. On peut même soutenir que cette dernière question est la plus significative du point de vue épistémologique³⁴

Je poserai donc dans la suite de cet essai le problème sous la forme suivante:

1) le mécanisme invoqué par Galilée a-t-il pour effet, en principe, une accélération horizontale périodique des eaux en un point donné à la surface du globe terrestre?

2) si c'est le cas, la réalité du double mouvement de la terre est-il une cause suffisante pour l'existence de cet effet?

Je dis que si la réponse à la première question est positive, il conviendra d'examiner dans quelle mesure cette accélération est effectivement une composante du phénomène réel, et que si la réponse à la deuxième de ces deux questions s'avérait être positive il faudra reconnaître que la TGM est bien une théorie juste *en tant que preuve de la réalité du double mouvement de la terre*, exactement dans le sens et dans les limites où l'on dit que le pendule de Foucault constitue une preuve de la rotation diurne de la terre.

Réfutation de la critique de Mach

L'objection la plus sérieuse à la TGM – celle de Mach – s'est bien placée dans la perspective du modèle proposé par Galilée: Mach a récusé la TGM en niant la réalité des propriétés physiques que Galilée attribue à son modèle mécanique. Nous allons voir que la pertinence de cette critique de Mach à la TGM peut être elle-même récusée.

34 C'est, bien sûr, le point de vue de Popper (*op. cit.*).

Mach a cru légitime de penser que l'explication de Galilée concernait une composition de mouvements où le mouvement *circulaire uniforme orbital* serait remplacé par un mouvement *rectiligne uniforme*. Or, si le mouvement orbital est remplacé par un mouvement rectiligne uniforme, la trajectoire d'un lieu géographique dans le modèle galiléen devient une cycloïde à base rectiligne, et la critique de Mach est alors parfaitement fondée: il y aura bien une force d'inertie, mais elle ne sera pas variable dans le temps en un lieu géographique et il n'y aura donc pas de marée³⁵. Cette absence d'effet de marée lorsque le deuxième mouvement uniforme est rectiligne ressort justement de l'absence d'effet dynamique d'un entraînement rectiligne uniforme³⁶; il n'y aura comme effet d'inertie que la force centrifuge de la rotation terrestre, qui est purement indépendante du temps en un lieu géographique.

Je ne vois pas ce qui autorise à préférer cette interprétation à la lecture stricte du texte qui ne fait mention que de mouvements *circulaires uniformes*, sauf lorsque dans l'introduction didactique Galilée utilise l'image du mouvement rectiligne d'une barque freinée qui aurait pris l'eau, mais alors l'essentiel est justement que ce mouvement *rectiligne* est *non uniforme*, décéléré. Tout dans le texte, dans les figures, ainsi que le contexte astronomique, implique clairement que *les deux mouvements* uniformes dont l'existence simultanée est requise essentiellement par Galilée sont des *rotations uniformes*.

La critique de Mach est donc juste dans la mesure où elle s'applique au modèle qu'il soumet à sa critique, mais ce modèle n'est pas celui de Galilée, et la critique n'est pas pertinente en tant que réfutation de la TGM.

Quant à la variante de la critique de Mach proposée par Strauss et par Popper, elle ne peut être elle-même réfutée, du fait de son caractère *essentiellement quantitatif*, qu'après une analyse quantitative des phénomènes participant aux marées; j'y reviendrai donc à la suite de la brève annexe "mathématique"

La tgm et les marées

La question de l'existence ou non existence des effets physiques que Galilée attribue à son modèle doit être considérée sur le modèle proposé par Galilée lui-même et non sur celui qu'un lecteur moderne peut lui substituer. Il faut donc en revenir au texte. Le modèle de Galilée est sans aucune ambiguïté,

35 Comme le signalait déjà Newton dans les *Principia* au Livre I, Proposition 66, Théorème 26, Corollaire 19.

36 *Principia*: Corollaire 5 des Lois.

dans la forme simplifiée qu'il lui donne d'abord avant de rentrer dans le détail de nombreux accidents qui peuvent moduler le fonctionnement d'un modèle plus réaliste, celui d'un disque en rotation uniforme autour d'un centre lui-même en rotation uniforme autour de son centre réputé fixe. Du point de vue cinématique ce modèle n'est autre qu'un cas simplifié (sans équant) des épicycles de Ptolémée, c'est-à-dire d'une certaine façon un paradigme de l'astronomie ancienne. La théorie de Galilée est fondée sur l'affirmation qu'un point fixé à la périphérie du disque extérieur est soumis à une accélération tangentielle dont le sens change périodiquement, et la première question est de savoir si cette affirmation est juste ou fausse. Pour y répondre on peut bien sûr penser à un dispositif expérimental, et on sait que Galilée a prétendu en avoir effectivement construit un – dont il dit finalement qu'il est impossible d'en rien tirer de convaincant³⁷ Une autre méthode consiste à substituer à cette expérimentation le recours au calcul. Le problème de cinématique est fort simple. La solution³⁸ fait apparaître effectivement l'existence d'une composante "horizontale" de l'accélération, qui change de sens à l'aphélie et au périhélie; cette composante est due au mouvement orbital, et du fait du mouvement diurne elle donne lieu en un point fixe de l'équateur à une oscillation périodique quotidienne.

Le calcul confirme donc littéralement les propositions de Galilée quant à l'existence, dans son modèle, de variation périodiques de l'accélération en un point de son "équateur" Cependant, comme de simples considérations de symétrie du modèle permettaient de le prévoir, la seule composition des forces centrifuges en présence et de la *gravitas propria* est incapable de produire aux points de "l'équateur" situés au milieu du jour et au milieu de la nuit (soit en D et F sur la figure) des effets opposés; c'est dire que le modèle est incapable de rendre compte de la symétrie du géoïde et la double marée quotidienne. C'est en ce sens restreint que la TGM n'est pas une théorie satisfaisante des marées.

L'accélération dont le modèle rend compte valide cependant, dans la logique de la physique galiléenne du mouvement et de la *gravitas*, l'analogie qualitative entre les marées et le mouvement de l'eau dans une barque brusquement freinée. La *gravitas* empêche l'eau d'être expulsée verticalement par la force cen-

37 Curieusement Frereux et De Gandt dans leur traduction française, rendent "*ed io, ho la costruzione d'una machina ...*" (EN VII, p. 456) par "*je pense à la construction d'une machine ...*" Le texte signifie précisément "*j'ai construit une machine ...*".

38 En notation complexe, si on représente par $\mathbf{M} = e^{iWt}\{\mathbf{R} + re^{iwt}\}$ un point du cercle extérieur du modèle de Galilée, son accélération absolue est $\mathbf{M}'' = -W^2\mathbf{M} - [w^2 + 2wW]re^{i(W+w)t}$, dont la composante tangentielle, qui est *stricto sensu* ce dont parle Galilée, est $RW^2 \sin(wt)$.

trifuge, et le fond de la mer retient l'eau dans la direction verticale. Si aucune liaison autre que la côte ne fait obstacle au mouvement horizontal de l'eau, si cette côte est accélérée ou décélérée horizontalement l'eau s'y précipitera. Or nous avons vu que les effets cinématiques impliqués par le modèle de Galilée sont de cette nature, et qu'ils résultent de la composition de deux mouvements circulaires.

Que Galilée puisse dire réels, absolument et non seulement relativement, les deux mouvements dont il est question ressort suffisamment du fait que dans le cas d'un modèle à la Tycho-Brahe, la logique de sa discussion conduit évidemment à l'absence de cet "effet de marée"

La tgm comme partie de la théorie newtonienne des marées

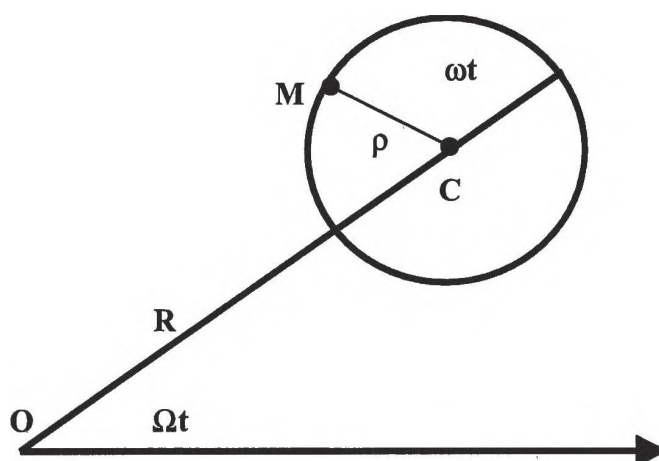
Nous avons dit en quoi la théorie de Galilée n'est pas une théorie *satisfaisante* en tant que théorie des marées. On doit ajouter que les conclusions obtenues avec le modèle de Galilée ne sont *pertinentes* à la description de la situation physique réelle que si les phénomènes physiques propres à ce modèle sont présents dans le phénomène réel. Il s'agit de s'assurer que les phénomènes que Galilée ignorait n'ont pas pour effet d'annuler précisément ceux qu'il décrit, à la façon dont la lourdeur d'un corps est annulé dans un ascenseur qui tombe en chute libre, pour prendre un exemple qui a un rapport étroit avec notre problème. Pour en décider, nous pouvons avoir recours aux ressources de la meilleure théorie disponible aujourd'hui. Nous pouvons plus précisément nous contenter de nous référer à la théorie la plus élémentaire propre à nous éclairer, c'est-à-dire à la théorie newtonienne *statique* des marées. Aux forces d'inerties prises en considération par le modèle de Galilée, la théorie statique de Newton ajoute les effets dont son concept de force de gravitation rend bien compte. La seule composante du modèle newtonien à considérer ici est l'attraction du corps central (il est clair qu'il suffit de se limiter au problème à deux corps, le deuxième corps étant soit le soleil soit la lune) dont l'attraction centripète s'oppose à la force d'inertie centrifuge du mouvement orbital de la terre; on sait que cette force centripète ne compense exactement – c'est-à-dire n'annule – l'effet de cette force d'inertie qu'au centre d'inertie de la terre et que de cette composition résulte justement la symétrie du géoïde et le doublement de la fréquence des marées. Au niveau de la surface terrestre, *l'effet des forces d'inertie* qui constituent l'essence du phénomène dans la TGM est ontologiquement exactement le même dans la description newtonienne, où il se compose quantitativement avec un autre effet que Galilée ne soupçonnait absolument pas pour provoquer, ensemble, la "marée newtonienne".

En ce sens, la théorie newtonienne des marées confirme l'existence d'effets d'accélération horizontales périodiques décrits par la TGM. L'existence même de ces effets physique est bien une conséquence nécessaire du double mouvement de la terre, et cette conséquence justifie la prétention de Galilée d'avoir découvert une preuve physique de la réalité de ce double mouvement.

La même chose, en “langue mathématique”³⁹

L'objectif de ceci est d'exprimer ce qui a été dit précédemment sous une autre forme, pour les lecteurs informés de *la langue du Livre de la Nature*, de façon aussi simple que possible et en s'inspirant du raisonnement même de Galilée. La seule chose nouvelle qui ressortira de cette discussion sera une comparaison quantitative de la marée selon la TGM et de la marée “newtonienne”⁴⁰, et cela nous permettra de réfuter un argument de Popper que j'ai désigné plus haut comme variante de la critique de Mach.

1) On calcule d'abord l'accélération d'un point M représentant un lieu fixe sur l'équateur de la terre, dans l'hypothèse du double mouvement uniforme circulaire, dans le repère (réputé *assoluto* par Galilée) dans lequel le centre – le soleil pour Galilée – et la sphère étoilée sont fixes. Dans l'esprit de la discussion où les causes premières sont recherchées avec le minimum de sophistication, l'équateur est supposé dans le plan de l'écliptique. Si O représente le centre du déferent (le soleil), C le centre de la terre, r le rayon terrestre et R la distance terre soleil, on peut avantageusement utiliser la représentation complexe (cf. figure):



39 “Le livre de la nature est écrit en caractères mathématiques”. Galilée dans *Il Saggiatore* (E.N. VI, p. 232).

40 Comme nous l'avons dit plus haut, la quantification de la TGM n'a été rendue possible que postérieurement, par Huygens.

$$\mathbf{OM} = e^{i\Omega t} \{R + \rho e^{i\omega t}\}$$

de ce mouvement d'un point de "l'équateur"

On en déduit immédiatement l'accélération absolue de M, que l'on note $\mathbf{OM}''$:

$$\mathbf{OM}'' = -\Omega^2 \mathbf{OC} - (\Omega + \omega)^2 \mathbf{CM}, \text{ soit encore:}$$

$$\mathbf{OM}'' = -\Omega^2 \mathbf{OM} - [\omega^2 + 2\omega\Omega] \mathbf{CM}$$

La composante "horizontale" de cette accélération est, comme nous l'avons vu (note 38)

$$\text{accélération horizontale} = R\Omega^2 \sin(\omega t)$$

et est donc périodique de période diurne.

Cette composante "horizontale" (c'est-à-dire tangentielle en M) est l'expression quantitative que nous savons donner à l'accélération du bassin des mers dont parle Galilée de façon qualitative, accélération analogue à celle du bateau freiné ou accéléré. Il est explicitement attesté que Galilée conçoit que l'eau situé en ce point M tend naturellement à poursuivre son mouvement horizontal uniformément; cette composante "horizontale" de $\mathbf{OM}''$ est donc (au signe près) l'accélération horizontale de cette eau par rapport à la surface terrestre selon la conception de la TGM.

Il est possible de mettre mécaniquement en évidence cette accélération, mais cela est assez délicat si on utilise un liquide (cf. le modèle assez laborieux de S. Drake, "Galileo's Theory of Tides" *Galileo's Studies* (Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1970), p. 200-13, part. p. 206 ff.)⁴¹.

2) Le mouvement de la terre ainsi donné, dans un cas d'école (mouvements orbital et diurne tous deux circulaires et uniformes) que l'on sait être une solution du problème du mouvement d'un corps sphérique sous l'effet d'une force centrale d'attraction en $1/R^2$ selon la théorie newtonienne de la gravitation, on peut calculer selon cette même théorie newtonienne l'intensité la force, c'est-à-dire l'accélération dans le système "absolu" qu'exercerait la force centrale en question sur un *point matériel libre* P coïncidant avec M à l'instant considéré (les effets de la gravitation *terrestre* sont bien connus et peuvent ne pas être considérés explicitement dans cette discussion) la gravitation terrestre est l. Cette accélération due à l'attraction est bien sûr absolument absente des conceptions

41 Un modèle purement mécanique (sans composant liquide) très convaincant a été construit par A. Hairie (LERMAT-ISMRA, Caen, France) en 1998, dont la description ne peut être faite ici.

galiléennes, et c'est justement pour cela que pour Galilée ce point P aurait un mouvement horizontal uniforme si les côtes ne s'y opposaient finalement.

Ce que j'ai affirmé sur le caractère correct mais partiel du modèle de théorie des marées de Galilée traduit le fait que dans le cadre de la théorie newtonienne, *l'intensité* de la force qui s'exerce sur le corps matériel libre P (disons une masse d'eau) *dans le repère lié à la terre* est précisément *l'accélération par rapport au point M de la surface terrestre de la masse d'eau coïncidant avec ce point*, c'est-à-dire la différence entre l'accélération du point M lié à la terre – que nous avons obtenue ci-dessus, et l'accélération du point matériel P due à la force d'attraction centrée en O. L'accélération ainsi obtenue est ce qu'il est d'usage d'appeler la *force perturbatrice* des marées. Cette façon d'obtenir le résultat de la théorie newtonienne statique des marées est à la fois particulièrement simple et propre à faire apparaître la marée comme la superposition de deux effets, dont l'un est celui imaginé qualitativement par Galilée, et dont l'autre est l'accélération de la particule "libre" d'eau, décrite par Newton comme l'attraction gravitationnelle par le centre de force (le soleil) mais complètement ignorée par Galilée.

Montrons comment cela se présente quantitativement.

Il est d'usage d'exprimer la *force perturbatrice* dans un repère lié au mouvement orbital de la terre mais dépourvu de mouvement diurne, c'est-à-dire d'axes de directions absolues fixes; son intensité $\mathbf{G}$ exprimée à l'ordre le plus bas en r / R (supposé très petit par hypothèse) a alors la forme suivante, que l'on trouve dans tous les bons manuels⁴²:

$$\mathbf{G} = \rho \Omega^2 \cdot \{ 3/2 \sin(2\varphi) \mathbf{t} + [3\cos^2\varphi - 1] \mathbf{n} \}$$

où les notations ont le sens suivant:

φ : distance zénithale du centre de force, soit $\varphi = \omega t$ avec les notations de la figure

$\mathbf{t}$: vecteur "horizontal" en M

$\mathbf{n}$: vecteur unitaire "vertical" en M.

Cette marée a bien lieu *deux fois* par "jour" en chaque point géographique.

Pour passer dans un repère lié à la terre, donc aux *deux mouvements* de la terre, il suffit d'ajouter à cette expression la force d'entraînement en M due à la rotation diurne, c'est-à-dire la force centrifuge $\rho (\omega + \Omega)^2 \mathbf{n}$.

42 D'Alembert, *Encyclopédie Méthodique*, op. cit., p. 61; Bouteloup, op. cit., p. 61.

Avec la notation

$$\Sigma = \omega + \Omega.$$

on obtient alors pour l'expression "newtonienne" de l'accélération Γ_r de l'eau par rapport au point **M** *lié à la terre* la forme suivante

$$(N) \Gamma_r = \rho \Omega^2 \cdot \{ 3/2 \sin(2\omega t) \mathbf{t} + [3\cos^2(\omega t) - 1 + \Sigma^2/\Omega^2] \mathbf{n} \}$$

Montrons que cette relation s'obtient bien précisément comme superposition des deux effets dont il est question.

a) L'accélération absolue de "la côte" résultant du double mouvement de la terre a été obtenue plus haut comme:

$$\mathbf{OM}'' = -\Omega^2 \mathbf{OM} - [\Sigma^2 - \Omega^2] \mathbf{CM}$$

b) L'accélération absolue d'une masse libre située au point P coïncidant avec M au temps t est, selon la théorie de Newton:

$\mathbf{OP}'' = GM/r^3 \mathbf{OM}$ où r est le module de $\mathbf{OM}$ et où GM/r^2 est l'attraction gravitationnelle centrée en O.

Puisque le mouvement circulaire uniforme orbital de la terre est dû à l'attraction gravitationnelle centrée en O, l'accélération due à cette force est identique à l'accélération centripète de la rotation orbitale, et on a

$$GM/R^3 = \Omega^2$$

ce qui permet d'écrire

$$\mathbf{OP}'' = -\Omega^2 (R/r)^3 \mathbf{OM}$$

c) L'accélération de cette masse libre *par rapport au point M lié au mouvement de la terre* (le bassin de la mer, ou le bateau dans l'exemple de Galilée) s'obtient par différence:

$$\mathbf{MP}'' = \mathbf{OP}'' - \mathbf{OM}'' = \{ 1 - (R/r)^3 \} \Omega^2 \mathbf{OM} + (\Sigma^2 - \Omega^2) \mathbf{CM}$$

Pour $\rho / R \ll 1$, en écrivant $r = R + \delta$ on obtient par développement, à l'ordre le plus bas en δ :

$$\mathbf{MP}'' = 3\Omega^2 (\delta / R) \mathbf{OM} + (\Sigma^2 - \Omega^2) \mathbf{CM} + O(\delta^2)$$

et, par projection sur la normale et sur la tangente en M à la "terre" on obtient exactement par un calcul qu'il n'est pas utile de développer

$$\mathbf{MP}'' = \Gamma_r$$

c'est-à-dire l'équation (N) de la théorie classique.

On voit bien ainsi que les marées, comme il est bien connu, résultent de la très petite différence (de l'ordre de $\rho\Omega^2$) entre les effets (de l'ordre de $R\Omega^2$) de deux phénomènes qui se manifestent de façon soustractive, chacun étant dans des conditions du système terre-soleil par quatre ordres de grandeurs supérieurs à cette différence essentielle. On peut séparer ces deux effets par une expérience de pensée comme celle que Mach propose dans sa discussion des marées⁴³, et on peut les décrire comme statique et gravitationnel pour l'un (suivant l'expérience de pensée proposée par Mach), et comme essentiellement inertiel (c'est-à-dire décrit en termes de forces d'inertie) pour l'autre. J'ai soutenu dans cet article que le phénomène auquel Galilée attribue qualitativement la marée est précisément localisable dans cette description: il s'agit de la composante horizontale de la partie inertielle du phénomène.

La théorie des marées de Galilée est ainsi doublement partielle. Le phénomène pris en compte par Galilée est partiel qualitativement et quantitativement, et de façon telle qu'on peut dire qu'il n'y a aucune façon de compléter la théorie galiléenne sans une révolution conceptuelle. Je dis seulement, contre l'opinion généralement admise, que Galilée a justement conçu la nature de l'une des composantes du phénomène des marées; il ne s'agit pas d'une théorie fausse, mais d'une partie d'une théorie satisfaisante – celle de Newton.

Une erreur *intéressante*:

la réfutation quantitative de la tgm par Popper

Les quelques pages que Popper consacre à la théorie galiléenne des marées dans *Objective knowledge* pour illustrer son concept de "*objective historical understanding*" me semblent singulièrement instructives du point de vue épistémologique. J'y lirais, en employant une formule de Koyré, une sorte de *comédie des erreurs*.

Après une paraphrase tout-à-fait fidèle du modèle épicyclique décrit par Galilée, Popper conclut: "*Galileo's theory is plausible but incorrect in this form: apart from the constant acceleration due to the rotation of the earth – that is the centripetal acceleration – which also arises if a [the orbital velocity] is zero, there does not arise any further acceleration and therefore especially no periodical acceleration*".

On reconnaît très précisément la critique de Mach, et ce que j'en ai dit plus haut vaut également pour cet argument de Popper. Ce qui mérite une attention particulière est la façon singulière dont Popper prolonge cet argument

43 Mach, *op. cit.*, p. 206.

par une note en bas de page évidemment ajoutée ultérieurement pour compléter la discussion:

*"One might say that Galileo's kinematic theory of the tides contradicts the so-called Galilean relativity principle. But this criticism would be false, historically as well as theoretically since this principle does not refer to rotational movements [...]. Moreover we get (small) periodical accelerations as soon as we take into account the curvature of the earth's movement round the sun"*⁴⁴.

Ce qui fait problème, et de plusieurs façon, est évidemment la dernière phrase de cette note.

À supposer qu'il soit exact que l'accélération périodique dont il s'agit soit effectivement petite, il me semble que la TGM devrait être considérée comme correcte en principe, et cela si petite que soit cette accélération périodique, du simple fait de son existence. Car c'est bien de l'existence d'un effet de marée qu'il est question, et Galilée n'a aucune préoccupation, quant à la *causa primaria*, pour l'ampleur de cet effet. Il est difficile de comprendre que Popper n'ait pas tiré cette conséquence radicale de sa remarque; il semble clair que la *petitesse* supposée de l'effet lui a semblé autoriser le maintien de la qualification de *théorie plausible mais incorrecte*. C'est explicitement sur cette base que Strauss se refuse à considérer comme *causa primaria* des marées l'effet physique qu'il concède effectivement au mécanisme de la TGM: *"Ich halte für sehr wohl möglich, dass aber die von Galilei aufgestellte Theorie in der Hauptsache nicht unrichtig ist, dass aber die Erscheinungen, die ihr zufolge eintreten, zu geringfügig sind, um neben der Mondflut bemerkt zu werden [...] so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dass die galileische Ansicht zur Aufklärung sekundärer Fluterscheinungen mit herangezogen werden kann"*⁴⁵.

En fait cette discussion est rendue fort académique, et pour tout dire inutile, du fait que l'idée que l'effet dû la courbure de l'orbite terrestre serait *négligeable* pour les marées est profondément fausse. Il ressort en effet de la discussion quantitative précédente que l'accélération due au mécanisme de Galilée est non pas *petite* devant la *force perturbatrice* globale, mais plutôt supérieure par plusieurs ordres de grandeur. Comme on l'a vu, l'accélération d'un bassin maritime correspondant à la courbure de l'orbite est *égale à très peu près* – au dix millième près dans le modèle de la discussion – à l'accélération de l'eau résultant de l'attraction gravitationnelle exercée par le soleil, et la marée newtonienne résulte justement de la *très petite différence* entre ces deux effets.

44 Popper, *op. cit.*, p. 171, n. 19 (édition de 1979). Les caractères romains sont italiques dans la texte.

45 Strauss, *op. cit.*, p. 566.

On se trouve donc devant cette situation quelque peu paradoxale que Popper (et d'une certaine façon Strauss) ne tire pas, d'une remarque qualitative-ment juste qu'il formule explicitement, les conséquences épistémologiques qui semblent devoir en résulter, et qu'il s'en justifie par une estimation quantitativement fausse de la situation.

Cet épisode me semble fort instructif, et assez révélateur de racines profondes de la critique traditionnelle de la TGM.

En guise de conclusion

Je dirais en conclusion que la TGM n'est une théorie irrémédiablement fausse que dans la mesure où l'on remplace le modèle physique de Galilée par un autre modèle dont il ne parle jamais. Du modèle dont parle Galilée, je dirais que dans l'optique de la recherche de *la cause première* du phénomène des marées, la TGM est une théorie *partielle* puisqu'elle ignore des effets comparables à ceux qu'elle connaît; enfin qu'elle est une théorie *juste*, dont seulement la dénomination est impropre, en tant qu'elle propose une preuve de la réalité du double mouvement de la terre, exactement dans le sens et dans les limites, il convient de le redire, où l'on dit que le pendule de Foucault constitue une preuve de la rotation diurne de la terre.

Et comme il n'est peut-être pas hors propos de souligner que le phénomène des marées est, à notre connaissance, ontologiquement indissociable du double mouvement – orbital et diurne – de la terre, je dirais que cette simple affirmation de Galilée, qui constituait probablement à ses yeux l'un de ses plus grands titres de gloire devant la postérité, est en définitive validée par la physique classique.