

Galilée et la mathématisation du mouvement

par

Michel PATY

En mathématisant le mouvement, Galilée ouvrait la voie à l'un des bouleversements les plus considérables qu'ait connus l'histoire de l'humanité. Car il n'inaugurait pas seulement ainsi les premiers pas de la physique théorique et mathématique; il réconciliait également la science et la technique en faisant bénéficier cette dernière de toute la force de la pensée abstraite, réservée auparavant à la science "pure" des entités parfaites et à l'examen des questions métaphysiques ou théologiques. Au contraire de ces dernières, objet des joutes des érudits, les problèmes portant sur les propriétés des corps matériels qui nous entourent, par exemple leur mouvement, concernent la nature, qui parle par l'expérience dans la vie de tous les jours et sont accessibles aux hommes ordinaires, par-delà toute érudition. Pour se faire comprendre d'eux, Galilée choisit de s'exprimer dans la langue du peuple, l'italien, et non plus en latin.

La nouvelle conception qu'il proposait, en même temps qu'elle faisait descendre les mathématiques de leur ciel éthéré pour les faire servir à la représentation de notre monde physique sublunaire, était lourde d'implications philosophiques, au premier rang desquelles la désacralisation de la nature. En développant ses idées, Galilée eut soin de séparer les deux connaissances, celle des choses divines et de la religion d'une part, révélées par les Ecritures et objet de la théologie, et celles de la nature d'autre part, révélées par l'observation et directement intelligibles par la raison, qui prend la forme précise du raisonnement mathématique dans le cas du mouvement des corps.

La grande innovation de Galilée, ce fut de conjuguer le souci de l'expérience (réservée jusque-là à la technique empirique) avec l'utilisation des mathématiques (dont l'application avait été cantonnée aux objets supposés parfaits, tels les corps célestes dans la philosophie aristotélicienne) comme moyen d'investigation des corps matériels ordinaires de la nature, imparfaits et changeants.

Comment cette transformation s'est-elle produite ? Selon une interprétation longtemps répandue, la rupture opérée par Galilée avec la pensée traditionnelle fut radicale, et on l'attribuait au rôle nouveau qu'il faisait tenir à l'expérience. C'est de l'observation pure et simple qu'il aurait induit les lois de la chute des corps et du mouvement des projectiles.

Dans cette ligne d'idées, l'imagerie d'Epinal attribue à la ville de Pise un rôle décisif dans la naissance de la science moderne. Ce n'est pas sans raisons, puisque Galileo Galilei (1564-1642), notre Galilée, qui y était né et y avait vécu ses premières années, y séjourna comme étudiant de 1581 à 1585, puis comme

professeur, de 1589 à 1592, et c'est là qu'il eut quelques unes de ses idées "révolutionnaires" (il y rédigea un ouvrage sur le mouvement, *De Motu*, qu'il renonça à publier mais qui comporte les éléments de ses premières recherches).

Son disciple et futur biographe, Vincenzo Viviani, prétend avoir recueilli de la bouche de Galilée lui-même, peu avant sa mort, le récit de son observation, quand il était encore adolescent, durant un office religieux, de la régularité des oscillations du lustre de la cathédrale de Pise (la durée d'une oscillation reste constante quelle que soit l'amplitude, c'est-à-dire la longueur de l'arc parcouru, et la vitesse croît avec celle-ci), qui l'amena à réfléchir sur la chute des corps et sur la pesanteur, et à refaire, une fois rentré chez lui, des expériences précises.

Il paraît cependant, selon des esprits chagrins qui n'aiment pas les légendes, que le grand lustre ne fut installé dans la cathédrale qu'après que Galilée ait quitté Pise. Quant à l'expérience qu'il aurait faite du haut de la Tour, rapportée également par Viviani, elle n'a jamais été retenue par les historiens, quoiqu'elle ait une signification symbolique par son côté spectaculaire, prenant le public à témoin sur une controverse de "philosophes", dont chacun pouvait en fait juger. Elle fut faite, en tout cas, ultérieurement, en 1612, par un professeur de philosophie de Pise qui prétendait vérifier Aristote et réfuter Galilée. A cette époque, d'ailleurs, Galilée s'intéressait davantage, à l'aide de la lunette qu'il avait mise au point, à l'observation des cieux où il venait de faire des découvertes imprévues et fondamentales (les satellites de Jupiter, les cratères de la Lune, les taches solaires), sujet qui l'occupa de nombreuses années et qui le détourna de publier alors ses recherches sur le mouvement des corps.

Reste, à propos du lustre, le fait que Galilée a bien effectué des observations sur l'oscillation des pendules pesants (en 1602), comme d'ailleurs (vers 1604) sur le temps mis à tomber par un corps placé sur un plan légèrement incliné (qui permet des mesures plus précises que la chute verticale, en ralentissant le mouvement), mesurant, en l'absence d'horloges de précision, le temps en prenant son pouls, idée empruntée au mathématicien Girolamo Cardano (Jérôme Cardan), auteur d'un grand traité d'algèbre, l'*Ars Magna*.

L'expérimentation, venue de la pensée technique, tient donc un rôle très important dans la pensée physique de Galilée, tributaire, par là, de ses prédécesseurs, mais il s'agit alors des ingénieurs et des techniciens plutôt que des scientifiques. Ingénieur et mathématicien au service du Grand Duc de Toscane, responsable de l'Arsenal, Galilée s'intéressait à des problèmes posés par des exigences techniques comme celles, très marquées aux XVI^e et XVII^e siècles, de la balistique, c'est-à-dire la technique des projectiles, suscitée par l'invention des armes à feu et les besoins de l'artillerie (étude de la portée en fonction de l'angle de tir, forme de la trajectoire, etc.). Ajoutons que Galilée avait peut-être aussi été rendu sensible aux aspects pratiques par l'exemple de son père, musicien, qui faisait des expériences sur la tension des cordes de ses instruments.

Mais Galilée s'inscrit aussi dans une autre tradition, qui se situe au plan des idées théoriques - fût-ce pour s'y opposer en grande partie. Pierre Duhem fut le premier, dans les premières années de ce siècle, à retrouver des textes importants de penseurs du Moyen-Âge et de la Renaissance, de Jordan de Nemore à Léonard de Vinci, qu'il estimait être à l'origine de la pensée de Galilée. Cette parenté a par la suite été relativisée par d'autres historiens des sciences, mais il n'en reste pas moins que les recherches de Galilée sur la nature et les propriétés du mouvement

s'inscrivent dans la lignée de celles ouvertes par les docteurs des Ecoles d'Oxford et de Paris, aux XIII^e et XIV^e siècles. Ces derniers, qui raisonnaient à la suite d'Aristote en termes d'une distinction entre le mouvement naturel et le mouvement "violent" dû à des causes externes, tentèrent cependant de dépasser cette distinction et de penser ensemble les deux sortes de mouvement, en développant la notion d'*impetus* et en comparant les mouvements uniformes et accélérés par une première mathématisation de la vitesse en fonction du temps.

La difficulté demeurait, quand Galilée s'intéressa au problème, de décrire le passage d'un mouvement rectiligne initial à un autre dans la chute oblique des projectiles. L'application purement qualitative de la géométrie (dans la pensée des savants et des philosophes) n'était jusqu'alors pensable que par un raccord de segments de droites et de cercle, bien que l'on sût (par l'observation des ingénieurs) que la trajectoire effective était une courbe continue de nature différente.

Galilée joignit, dans ses études sur le mouvement des projectiles qu'il ne publia que tardivement, en 1638 (*Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, imprimé à Leyde), les deux espèces de mouvement (naturel ou de vitesse uniforme et rectiligne, et violent, c'est-à-dire celui de chute, vertical et de vitesse continuellement variée), en les élucidant (mouvement d'inertie et loi de la chute des corps) et en les unifiant par l'addition de leurs vitesses pour chaque intervalle de temps, ce qui lui fournit la forme de la trajectoire, qui est une parabole. Ce faisant, Galilée résolvait, en les transformant, des problèmes posés initialement dans la tradition aristotélicienne, mais dont il fut amené à renverser le point de vue sur plusieurs aspects décisifs.

A propos de l'établissement de la loi de la chute libre, dont la vitesse augmente avec le mouvement du corps - ce qui était déjà connu -, Galilée se proposa d'en trouver l'expression mathématique et observa que les distances parcourues sont comme les carrés des temps écoulés. Il lui fut plus difficile d'en trouver l'explication: il posa d'abord que la distance est tout simplement proportionnelle à la vitesse de chute. Puis il s'aperçut - trois ans après - qu'elle variait avec le carré de la vitesse de chute, et tenait ainsi la raison de la loi. Mais il crut encore un certain temps que la vitesse de chute dépendait de la nature du corps (qu'elle était proportionnelle à sa densité), en cela tributaire, mais seulement en partie, d'Aristote, pour qui elle était proportionnelle à la grosseur du corps (c'est-à-dire à sa taille et à son poids), avant de se rendre compte qu'elle était la même pour tous les corps.

Quant au principe d'inertie, Galilée, qui en donna un premier énoncé approché, le concevait comme valide seulement pour la mécanique terrestre (sur le plan horizontal), mais non pour la mécanique céleste, où il gardait encore le mouvement circulaire comme naturel.

Les philosophes et historiens des sciences ont souvent mis en doute le fait que Galilée ait véritablement procédé à des expériences, se contentant de les imaginer: Alexandre Koyré, qui défendait cette thèse, voyait en lui un héritier de Platon contre Aristote, par son utilisation des mathématiques dans la recherche de la vérité. Cependant, la découverte, relativement récente, des carnets de travail de Galilée ne permet plus le doute: il procéda bien à des expériences et à des mesures. Et, à la vérité, en tenant ensemble les mathématiques et l'expérience, c'est à une autre tradition que Galilée se rattachait - tradition retrouvée peu avant lui - celle d'Archimède, sur laquelle Koyré insiste d'ailleurs à juste titre.

Galilée eut donc vraiment recours à l'expérience et fit des mathématiques un usage raisonné, appliqué à la loi même donnée dans l'expérience: c'est-à-dire selon une conception ou l'expression mathématique est approchée, en l'absence de toute situation idéale. En faisant descendre les mathématiques d'un monde supposé de la perfection, il posait non pas l'existence d'un monde absolu des essences parfaites dont nous aurions une notion approchée, mais celle d'un monde à notre portée que notre raison peut directement connaître et auquel nos sens accèdent par l'expérience pratique. Pour cela, il avait abattu l'astronomie de son piédestal, s'étant aperçu que les objets célestes sont aussi imparfaits et changeants que ceux que nous rencontrons sur la Terre. Il demeure cependant chez Galilée quelque chose de son ancien attachement aux idées classiques de l'astronomie : son énoncé seulement partiel du principe d'inertie, et sa conception d'un mouvement circulaire uniforme comme étant le mouvement naturel et parfait.

Le long intermède astronomique dans l'œuvre de Galilée n'est pas de portée seulement anecdotique: il fut amené à préciser, par ses recherches à l'aide de la lunette, comment les objets du ciel étaient de nature absolument semblable à ceux de la Terre, et par là le statut des mathématiques elles-mêmes fut modifié. Leur adéquation privilégiée à l'astronomie n'était que le signal de leur adéquation générale à la description du monde physique, qu'il s'agissait dès lors de rendre effective ("Le livre de l'univers est écrit dans la langue mathématique"). La physique était dès lors appelée à se constituer à l'aide des mathématiques. C'est pourquoi le traité des "deux sciences nouvelles" vient naturellement, dans la chronologie galiléenne, après les œuvres d'astronomie.

Quoi qu'il en soit, pour la théorie comme pour l'expérience, Galilée inventa quelque chose de radicalement neuf, tout en ayant hérité des connaissances qui le précédaient, qu'il ne craignit pas de critiquer, et dont il lui restait cependant quelque chose...

Mais n'est-ce pas généralement ainsi que se font les grandes innovations ?

Michel PATY

BIBLIOGRAPHIE

Galileo GALILEI, *Le messenger des étoiles* (1610), trad. du latin, présenté et annoté par Fernand Hallyn, Seuil, Paris, 1992.

- *Dialogues sur les deux grands systèmes du monde* (1632), trad. par , Seuil, Paris, 1992.

- *Dialogues sur deux sciences nouvelles* (1638), trad. M. Clavelin, A. Colin, Paris, 1970.

Alexandre KOYRE, *Etudes galiléennes* (1935-1939), Hermann, Paris, 1966.

Ludovico GEYMONAT, *Galilée* (1957), trad. de l'italien par François-Marie Rosset, Laffont, Paris, 1968 ; Seuil, Paris 1992.

Maurice CLAVELIN, *La philosophie naturelle de Galilée*, A. Colin, Paris, 1968.

Stilman DRAKE, *Galilée* (1980), trad. de l'anglais par Jean-Paul Sheidecker, Actes Sud, 1986.

William SHEA, *La révolution galiléenne* (1972), trad. de l'anglais, Seuil, 1992.

Egidio FESTA, *L'erreur de Galilée*, Austral, Paris, 1994.

Semyon Grigorevich GINDIKIN, *Horloges, pendules et mécanique céleste. Mathématiciens et physiciens de la Renaissance à nos jours* (1985), trad. du russe par Jean-Michel Kantor, préfacé par Michel Paty, Diderot éditions, Paris, 1995.

Michel Paty est directeur de recherche au CNRS. Philosophe et historien des sciences, il est l'auteur de *La matière dérobée* (Ed. des Archives contemporaines, 1988), *L'analyse critique des sciences* (L'Harmattan, 1990), *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, 1993).