



HAL
open science

La moindre petite force suffit à mouvoir un corps sur l'horizontal. L'émergence d'un principe mécanique et son devenir cosmologique

Egidio Festa, Sophie Roux

► **To cite this version:**

Egidio Festa, Sophie Roux. La moindre petite force suffit à mouvoir un corps sur l'horizontal. L'émergence d'un principe mécanique et son devenir cosmologique. *Galilaeana*, 2006, 3, pp.123-147. halshs-00806469

HAL Id: halshs-00806469

<https://shs.hal.science/halshs-00806469>

Submitted on 2 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA MOINDRE PETITE FORCE PEUT MOUVOIR UN CORPS SUR UN PLAN HORIZONTAL

L'ÉMERGENCE D'UN PRINCIPE MÉCANIQUE ET SON DEVENIR COSMOLOGIQUE¹

À Salviati qui, dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, demande ce qui arriverait à une boule posée sur une surface qui ne monte ni ne descend, Simplicio répond que le mobile, se trouvant indifférent entre la propension et la résistance au mouvement (*indifferente tra la propensione e la resistenza al moto*), devra y rester naturellement arrêté. Cependant, sous l'action d'une poussée (*impeto*), il se mettrait en mouvement dans la direction de celle-ci ; et, puisqu'il est sur une surface qui ne monte ni ne descend, il n'y aurait aucune cause d'accélération ou de ralentissement, donc son mouvement se perpétuerait uniformément². Autrement dit, de l'indifférence par rapport au mouvement ou au repos d'un corps sur un plan horizontal, Salviati déduit que ce dernier demeure éternellement dans l'état qui est le sien, soit de repos, soit de mouvement uniforme.

¹ Cet article a été écrit lors de la préparation d'un travail d'édition critique, de traduction et de commentaire du traité *Le Mécanique* de Galilée, à paraître aux Belles-Lettres. Nous avons bénéficié d'une aide financière via le programme « Formes d'articulation entre mathématiques et philosophie naturelle (XIV^e-XVII^e siècles) », dans le cadre de l'Action Concertée Incitative du CNRS « Histoire des Savoirs ».

² « Salviati: [...] ditemi quel che accaderebbe del medesimo mobile sopra una superficie che non fusse nè acclive nè declive / Simplicio: [...] verrebbe ad essere indifferente tra la propensione e la resistenza al moto; parmi dunque ch'ei dovrebbe restarvi naturalmente fermo [...] / Salviati: [...] Ma se gli fusse dato impeto verso qualche parte, che seguirebbe? / Simplicio: Seguirebbe il muoversi verso quella parte. / Salviati: Ma di che sorte di movimento? di continuamente accelerato come ne' piani declivi, o di successivamente ritardato, come negli acclivi? / Simplicio: Io non ci so scorgere causa di accelerazione nè di ritardamento, non vi essendo nè declività nè acclività » (OG, VII, p. 173, tr. fr. in *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, trad. de R. Fréreau avec le concours de F. De Gandt, Paris, Seuil, p. 169). Un corps animé d'une vitesse uniforme reste indéfiniment dans cet état inertiel ; inversement, un corps animé d'un mouvement non-uniforme ne peut être un référentiel inertiel (OG, VII, p. 450, commenté in MAURICE CLAVELIN, *La Philosophie naturelle de Galilée* (1968), 2^{ème} éd., Paris, Albin Michel, 1996, pp. 253-254.

L'importance des thèses que Galilée rassemble ici n'est plus à établir³. Les étapes qui ont conduit Galilée à élaborer ce qu'on appelle parfois le "principe d'inertie circulaire" sont bien connues. Dans la version longue des *Mecaniche*, usuellement datée de la fin des années 1590, Galilée qualifie d'« axiome indubitable »⁴ l'indifférence d'un corps sur un plan horizontal par rapport au repos et au mouvement. Une lettre de Benedetto Castelli, datée du 1^{er} avril 1607, montre Galilée soutenant que le mouvement d'un corps se conserve une fois qu'il a été acquis⁵. Dans la lettre à Welser du 14 août 1612, Galilée articule pour la première fois explicitement l'indifférence entre repos et mouvement et la conservation du mouvement ; bien plus, il étend au soleil ce qui fut initialement élaboré à propos des corps terrestres⁶.

Dans ce qui suit, nous étudions les tout premiers linéaments de ces thèses. Nous commençons par examiner quelques justifications, au XVI^e siècle, du principe que la moindre force peut mouvoir un corps sur un plan horizontal (que nous appellerons pour faire bref le Principe de la Force Minimale, ou PFM). Dans un deuxième temps, nous analysons les démonstrations géométriques de ce principe que donne le traité *De Motu* en 23 chapitres.

³ Voir ainsi EMIL WOHLWILL, « Die Entdeckung des Beharrungsgesetzes », *Zeitschrift für Völkerpsychologie und Sprachwissenschaft*, 14 et 15, 1883-1884, resp. pp. 365-410 et pp. 70-135, pp. 337-387 ; Émile MEYERSON, *Identité et réalité* (1907), Paris, Vrin, 1951, pp. 115-155 ; ALEXANDRE KOYRÉ, *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1966, pp. 161-165, CLAVELIN, *La Philosophie naturelle* (cit. not. 2), pp. 238-239 et p. 253 sqq.

⁴ *Les Mécaniques*, éd. critique, trad. et comm. d'E. Festa et S. Roux, Paris, Les Belles-Lettres, (à paraître), v.I., p. 58, l. 50. Dans ce qui suit, nous désignons la version brève par « v.b. » et la version longue par « v.l. ». Ce texte est commenté plus bas, § 3.

⁵ Benedetto Castelli à Galilée, 1^{er} avril 1607, in OG, X, p. 170 : « Dalla dottrina poi di V.S., che a principiar il moto è ben necessario il movente, ma a continuarlo basta il non haver contrasto, mi vien da ridere quando essaltano questa dottrina come quella che mi faccia venir nella cognitione dell'essistentia di Dio ; conciosiachè se fusse vero che il moto fosse eterno, io potrei doventar ateista e dire che di Dio non havemo bisogno, bestemia scelerata (*Étant donné la doctrine de votre Seigneurie que, pour commencer le mouvement, un moteur est bien nécessaire, mais que, pour le continuer, il suffit qu'il n'y ait pas d'obstacle, je me prends à rire quand ils se gargarisent de cette doctrine [l'argument aristotélicien du premier moteur] comme pouvant me faire connaître l'existence de Dieu ; puisque, s'il était vrai que le mouvement est éternel, je pourrais devenir athée et dire que nous n'avons pas besoin de Dieu — un blasphème criminel*) ».

⁶ OG, XII, pp. 134-135.

Nous montrons ensuite que la justification qualitative qu'on trouve dans ce même traité a conduit Galilée, dans les *Mécaniques*, à l'idée qu'un corps sur un plan horizontal est dans un état d'indifférence entre repos et mouvement. De cette indifférence, on pourrait déduire la perpétuité du mouvement circulaire : ce n'est pas le cas dans les *Mécaniques*. Pourtant, comme nous l'établissons dans un quatrième temps, les écrits *De Motu* s'interrogeaient sur le statut d'un mouvement à égale distance du centre du monde. A titre d'épilogue, nous rappelons que, dans le *Dialogue*, l'inertie circulaire galiléenne a une portée cosmologique, voire cosmogonique.

1. Le PFM au XVI^e siècle

Les deux textes de l'Antiquité que nous connaissons sur cette question s'opposent. *Les Mécaniques ou l'élèveur des corps lourds* de Héron posent le PFM, prenant explicitement le contre-pied de ce qui pourrait apparaître comme la leçon immédiate de l'expérience⁷. Pappus, dans la *Collection mathématique*, affirme au contraire qu'une force donnée est nécessaire pour mouvoir le corps sur le plan horizontal, sans aucun argument, mais sans doute avec le souci de donner une méthode de calcul aux ingénieurs, pour lesquels pousser ou traîner un corps matériel sur un plan horizontal, fut-il très lisse, demande qu'un certain effort soit déployé⁸. Il y a peu à dire sur un argument intuitif et sur une absence d'argument, il est impossible que Jérôme Cardan, Michel Varron et Jean-Baptiste Benedetti aient lu Héron et

⁷ HÉRON d'ALEXANDRIE, *Les Mécaniques ou l'élèveur des corps lourds*, I 20, réimpr. de l'éd. de B. Carra de Vaux (parue in *Journal asiatique*, série IX, vol. 1, 1893, pp. 386-472, puis vol. 2, 1894, pp. 152-269 et pp. 420-514) avec une introd. de D. Hill et des notes complém. d'A. G. Drachmann, Paris, Les Belles-Lettres, 1988, p. 87 : « Beaucoup de personnes, se plaçant à des points de vue faux, pensent que les fardeaux placés à terre ne peuvent être mis en mouvement que par une puissance qui leur est équivalente. Nous démontrerons que les poids qui ont une telle position peuvent être mus par une force moindre que toute force donnée ; et nous expliquerons pour quelle cause cela ne paraît pas évident dans le fait ». Sur la démonstration de Héron, voir plus bas note 38.

⁸ PAPPUS d'ALEXANDRIE, *Collection mathématique*, VIII 9, in *Pappi Alexandrini Collectionis quae supersunt*, ed. de F. Hultsch, 3 vol., Berlin, Weidmann, 1876-1878, vol. II, p. 833.

improbable qu'ils aient lu Pappus⁹. Aussi montrerons-nous, sans plus de préambule, que la neutralisation de l'action du poids sur un plan horizontal les conduit tous trois à poser le PFM¹⁰.

Cardan : le PFM et la théorie des proportions

La proposition 40 de l'*Opus Novum*, publié par Cardan à Bâle en 1570, affirme qu'un corps sphérique qui touche un plan en un point peut être mû par toute force capable de vaincre la résistance du milieu¹¹. Voici comment cette affirmation est justifiée :

⁹ L'ouvrage de Héron, écrit au I^{er} siècle de notre ère, nous est connu par une traduction arabe de Qostâ ibn Lûkâ du IX^e siècle ; au XVII^e siècle, Golius rapporte d'Orient une copie du XV^e siècle de cette traduction ; la première édition et traduction intégrale de cette copie est celle du baron Carra de Vaux, en 1893. La première édition de la *Collection mathématique* est la traduction latine de Federico Commandino, achevée avant sa mort en 1575 et finalement publiée en 1588 (voir PAUL LAWRENCE ROSE, *The Italian Renaissance of Mathematics. Studies on Humanists and Mathematicians from Petrarch to Galileo*, Genève, Droz, 1975, pp. 209-212 et pp. 224-225 ; LORENA PASSALACQUA, « Le collezioni di Pappo : polemiche editoriali e circolazione di manoscritti nelle corrispondenze di Francesco Barozzi con il Duca di Urbino », *Bollettino di storia delle scienze matematiche*, XIV/1, 1994, pp. 91-156). La proposition de Pappus sur le plan incliné est assurément connue avant cette publication : GUIDOBALDO DEL MONTE, *Mechanicorum Liber*, Pisauri, Hieronymum Concordiam, 1577, prop. 2, p. 124, indique que Pappus réduit le plan incliné à la balance ; FEDERICO PIGAFETA, *Le Mechaniche dell'Illustriss. Sign. Guido Ubaldo de' Marchesi del Monte tradotte in volgare dal Sig. Filippo Pigafetta*, Venice, Francesco de' Franceschi Senese, 1581, p. 121, traduit le passage en question de Pappus. Mais Cardan publiant en 1570 un ouvrage ne contenant aucune allusion à la *Collection mathématique*, on ne voit pas pourquoi supposer qu'il vise l'hypothèse de Pappus ; pour Varron, sa connaissance de Pappus n'est pas impossible (voir MICHELE CAMEROTA et MARIO OTTO HELBING, *All' Alba della scienza galileiana. Michel Varro e il suo De Motu tractatus. Un importante capitolo della meccanica di fine cinquecento*, Cagliari, CUEC, 2000, p. 83, pp. 95-96), mais pas non plus prouvée ; quant à Benedetti, nous verrons que son analyse se réfère explicitement au pseudo-Aristote.

¹⁰ Les textes que nous allons commenter sont signalés in PIERRE DUHEM, *Les Origines de la Statique*, 2 vol., Paris, Hermann 1905-1906, pp. 49-50 ; CAMEROTA et HELBING, *All' Alba della scienza galileiana* (cit. note 9), pp. 150-152 ; MARIO OTTO HELBING, « Galileo e le *Questioni meccaniche* attribuite ad Aristotele. Alcune indicazioni », in JOSE MONTESINOS et CARLOS SOLÍS (éds.), *Largo Campo di Filosofare. Eurosymposium Galileo 2001 (Tenerife, 19-23 février 2001)*, La Orotava, Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001, pp. 217-236: 233-235.

« Soit un corps parfaitement sphérique qui touche le plan en un point (ceci est nécessaire d'après ce qui a été démontré par Euclide dans la seizième proposition du troisième livre des Éléments), je dis qu'il sera mû par une force capable de séparer l'air. En effet, puisqu'il ne monte ni ne descend, mais se meut pour ainsi dire en cercle autour du centre du monde, le poids ne compte pas. Et le contact en raison de la grandeur ne compte pas non plus, car il se fait en un seul point. Il ne reste donc que l'obstacle de l'air. D'où il découle que le plan doit être d'une matière très dure, qui ne cède d'aucune façon, autrement il toucherait la sphère en plus d'un point »¹².

L'idée de Cardan est qu'il est possible d'éliminer les facteurs qui font que, d'ordinaire, il faut déployer une grande force pour mouvoir un corps sur un plan. On neutralisera le poids si ce mouvement se fait « pour ainsi dire en cercle autour du centre du monde », autrement dit sur une surface définie par la propriété d'être à égale distance du centre du monde, supposé être aussi le centre des graves¹³. On éliminera la résistance due aux frottements si le corps

¹¹ GIROLAMO CARDANO, *Opus Novum de proportionibus numerorum, motuum, ponderum, sonorum, aliarumque mensurandarum, non solum geometrico more stabilitum, sed etiam variis experimentis et observationibus rerum in natura, solerti demonstratione illustratum, ad multiplices usus accomodatum, et in V libros digestum*, Basel, ex officina Henricpetrina, 1570, prop. 40, p. 41 [*in Hieronymi Cardani Mediolanensis philosophi et medici celeberrimi operum tomus quartus*, Lyon, Jean Antoine Huguetan et Marc Antoine Ravaud, 1663, p. 480] : « Omne corpus sphæricum tangens planum in puncto movetur ad latus per quamcunque vim, quae medium dividere potest ».

¹² *Ibid.* : « Sit corpus ad unguem sphæricum tangens planum in puncto (est enim hoc necessarium ex demonstratis ab Euclide in decima sexta Propositione tertij Elementorum), dico, quod movebitur a vi, quae potest scindere aërem. Nam, cum non ascendat, nec descendat, sed quasi in circulo ad centrum mundi moveatur, pondus non affert. Neque ratione magnitudinis contactus, cum fit in puncto solo, igitur remanet solum aeris impedimentum. Ex hoc liquet, quod oportet planum esse ex durissima materia, quae nullo modo cedat, aliter tanget plusquam in puncto ».

¹³ La prop. 92, *in ibid.*, p. 85 [p. 506], souligne que le plan incliné sur lequel une sphère se meut naturellement ne peut pas être un vrai plan, car alors le mouvement de cette sphère l'éloignerait du centre de la terre, ce qui est

considéré est une sphère. Ainsi ne restera-t-il que l'obstacle de l'air. Le PFM est donc justifié par ce qu'on pourrait appeler l'argument par élimination des facteurs de résistance, ou, plus brièvement, l'élimination de la résistance.

Un peu plus loin, une application stricte de la théorie des proportions conduit Cardan à modifier quelque peu ce principe. Se proposant de déterminer quel est le rapport entre les poids d'une sphère placée sur des plans de différentes inclinaisons, la proposition 72 affirme, sans le justifier, que ces poids sont dans le rapport des angles d'inclinaison. Cardan remarque au passage que, sur un plan horizontal, la force nécessaire pour mouvoir une sphère parfaite est nulle :

« Puisque, sur BE [un plan horizontal], [la sphère] A est, d'après ce qui a été dit ci-dessus, mue par une force aussi petite qu'on veut, la force qui mouvra A sur BE sera, selon la notion commune, nulle »¹⁴.

« Ce qui a été dit ci-dessus » renvoie à la proposition 40. La notion commune évoquée est la septième, selon laquelle « ce à quoi une quantité a un rapport infini, cela n'est pas compris dans le genre de cette quantité »¹⁵. La proposition 72 consiste donc à appliquer la théorie des

impossible pour un mouvement naturel. La nuance « *quasi in circulo* » vient peut-être simplement de ce qu'il ne va pas de soi de qualifier un plan de circulaire. Elle peut également venir de ce que les prop. 23 à 26, *in ibid.*, pp. 23-24, distinguent trois espèces de mouvement : le mouvement naturel (rectiligne vers le haut ou le bas, ayant pour cause un principe interne mais non intelligent), le mouvement volontaire (circulaire, ayant pour cause un principe interne et intelligent), le mouvement violent (ni circulaire ni rectiligne, ayant pour cause un principe externe). Or, tout en étant de fait circulaire, le mouvement d'un corps sur un plan qui reste à égale distance du centre n'est pas volontaire et n'a pas pour cause un principe interne et intelligent comme le mouvement des astres. Cardan hésiterait donc à le ranger dans la même catégorie que le mouvement des astres.

¹⁴ *Ibid.*, prop. 72, p. 63 [p. 496] : « Quia ergo in *be* movetur *a*, quavis modica vi per dicta superius, erit per communem animi sententiam vis quae movebit *a* per *eb* nulla ».

¹⁵ *Ibid.*, p. 4 [p. 466] : « Ad quod quantitas proportionem habet infinitam, id in genere illius quantitatis non comprehenditur. Nam proportio est duarum quantitatum ejusdem generis comparatio certa : at haec comparatio

proportions au PFM, posé dans la proposition 40 : si cette force est aussi petite qu'on veut, il n'y a aucun rapport avec quelque force que ce soit, donc, d'après la notion 7, elle est nulle. Cardan ne s'interroge pas sur la signification physique d'une force nulle. Il y a là un vrai problème. Comment en effet une force nulle pourrait-elle avoir l'effet positif de mettre un corps en mouvement ? Ou encore, en quoi une force nulle différerait-elle d'une absence de force, qui par définition n'a aucun effet ? Le problème rencontré ici, que nous retrouverons chez Galilée, est un problème de passage à la limite dans un contexte mathématique dominé par la théorie des proportions.

Varron : une version plus abstraite du même argument

L'argument par élimination de la résistance se retrouve dans le *De Motu tractatus* de Varron, publié à Genève en 1584 :

« Ce qui se meut selon une ligne équidistante du lieu naturel (c'est-à-dire, selon la ligne qui coupe les lignes d'inclinaison à angle droit), cela ne résiste

certa non est : non igitur quantitates ambae sunt, aut non ejusdem generis (*Ce à quoi une quantité a un rapport infini, cela n'est pas compris dans le genre de cette quantité. Car un rapport est une comparaison déterminée de deux quantités de même genre ; or cette comparaison-ci n'est pas déterminée ; donc elles ne sont pas toutes les deux en même temps des quantités, ou elles ne sont pas des quantités du même genre*) ». Le contexte de cette notion commune est la controverse sur l'angle de contingence, d'ailleurs lancée par une remarque in GIROLAMO CARDANO, *De Subtilitate*, Basel, Ludovicum Lucium, 1554, pp. 550-553. L'angle de contingence étant, d'après la proposition III 16 d'Euclide, plus petit que tout angle rectiligne, son rapport avec un angle rectiligne devrait être infini, ce qui est impossible d'après la théorie des proportions. D'où, dans le dernier quart du siècle, une controverse sur la nature de cet angle : selon Peletier, l'angle de contingence et l'angle rectiligne ne sont pas de même genre (l'un est courviligne et l'autre rectiligne), et l'angle de contingence n'est pas une quantité ; selon Clavius, l'angle de contingence est bien un angle au même titre que l'angle rectiligne, et donc une quantité (sur cette controverse, voir LUIGI MAIERÙ, « '...in Christophorum Clavium de Contactu Linearum Apologia'. Considerazioni attorno alla polemica fra Peletier e Clavio circa l'angolo di contatto (1579-1589) », *Archive for history of exact sciences*, XLI/2, 1990, pp. 115-137). Ce sont ces deux positions auxquelles Cardan fait allusion à la fin de la notion commune 7.

pas au moteur. (...) plus [la ligne] selon laquelle le corps se meut s'approche de la ligne d'inclinaison, plus sa force ou sa résistance est grande, et plus cette ligne s'approche de la ligne équidistante au lieu naturel, plus la force ou la résistance est petite. [La force ou la résistance] la plus grande de toutes est sur la ligne d'inclinaison, en revanche l'équidistante au lieu naturel est totalement opposée au mouvement selon la ligne d'inclinaison, et il en est autrement des lignes obliques »¹⁶.

Comme Cardan, c'est dans le contexte d'une analyse du plan incliné que Varron affirme qu'un corps se mouvant sur un plan équidistant à son lieu naturel ne rencontre aucune résistance ; comme lui également, c'est par élimination de la résistance qu'il procède. La seule différence qui le sépare de Cardan est sa volonté d'abstraction : il n'indique pas que le corps qui se meut doit être sphérique et indéformable ; les définitions de la "ligne d'inclinaison" et du "lieu naturel" n'étant pas données par référence au poids et au centre des graves, il ne précise pas que le plan sur lequel se meut le corps est un plan circulaire¹⁷.

Benedetti : l'introduction de la notion de centre de gravité

C'est dans un contexte un peu différent que Benedetti aborde la question. Une partie du *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber* qu'il publie à Turin en 1585 est consacrée à discuter les *Questions mécaniques* ; il en est ainsi du chapitre 14, « Quod rationes ab Aristotele de octava quaestione confictae sufficientes non sint (*Que les causes*

¹⁶ MICHEL VARRON, *De Motu tractatus* (1584), in CAMEROTA et HELBING, *All' Alba della scienza galileana* (*op. cit.* note 9), pp. 312-314 : « Quod vero per lineam a loco naturali aequè distantem (id est, per eam quae nutus lineas secat ad angulos rectos) movetur, illud moventi non resistit, (...), quo propius quaelibet ad nutus lineam accedit, per illam rei motae vis aut resistentia maior est, quo vero propius ad lineam a loco naturali aequi distantem accedit, eo minor est. Omnium autem maxima est in nutus linea, aequidistans vero a loco naturali motui per lineam nutus omnino opposita est, obliquae vero non ita ».

¹⁷ Ces définitions sont données dans la "Definitio 4" et la "virium Divisio", in *ibid.*, pp. 250-252. L'abstraction de Varron est soulignée dans le commentaire, *ibid.*, p. 152.

forgées par Aristote à propos de la huitième question ne sont pas suffisantes) ». Cette huitième question consistait à déterminer pourquoi les corps de forme circulaire ou sphérique sont plus aisés à mouvoir sur un plan que les autres. Après avoir distingué trois cas selon les mouvements respectifs du centre et du corps¹⁸, le Pseudo-Aristote donnait deux explications de ce phénomène. Celui-ci a lieu, écrivait-il, parce que i) touchant le plan en un seul point, aucune friction ne ralentit le mouvement du cercle, ii) lorsqu'il commence à se mouvoir, le cercle fait basculer son poids vers l'avant ; l'équilibre ainsi rompu, il continue de se mouvoir là où son poids l'entraîne. Il notait enfin que certains soutiennent que le mouvement d'un cercle se perpétue¹⁹. Ce sont donc ces explications-là qui sont insuffisantes selon Benedetti.

Considérant une sphère en mouvement sur un plan, Benedetti commence par rappeler qu'elle touche le plan en un point et un seul, et que sa tendance vers le bas, causée par son poids, est également distribuée de part et d'autre de la verticale passant par ce point. Aussi la figure circulaire *aneu* (Fig.1) peut-elle être mue sans difficulté ni résistance aucune le long du plan horizontal *bad*, parce que son centre *o*, sur lequel se rassemble tout le poids du corps, ne se meut ni vers le haut ni vers le bas, mais selon la ligne *nou*, parallèle à *bad*²⁰.

¹⁸ Soit le centre se meut en même temps que le corps (une roue de véhicule par exemple), soit le centre est immobile tandis que le corps tourne autour d'un axe horizontal (une poulie fixe par exemple), soit le centre est immobile tandis que le corps tourne autour d'un axe vertical (une roue de potier par exemple).

¹⁹ ARISTOTE, *Problemi meccanici*, 851b15-37, introduzione, testo greco, traduzione italiana, note, a cura di M. E. Bottecchia Dehò, Rubettino, Soveria Mannelli (Catanzaro), 2000, p. 61. Pour un commentaire de ce texte voir par ex., au XVI^e siècle, ALESSANDRO PICCOLOMINI, *In Mechanicas Quaestiones Aristotelis paraphrasis paulo quidem plenior*, Roma, Antonium Bladum Asulanum, 1647, pp. 29-32 ; au XVII^e siècle, MARIN MERSENNE, *Questions inouïes. Questions harmoniques. Questions théologiques. Les Mécaniques de Galilée. Les Préludes de l'harmonie universelle*, 5, éd. de A. Pessel, Paris, Fayard, 1985, p. 20.

²⁰ GIOVANNI BATTISTA BENEDETTI, *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber*, Torino, Bevilacqua, 1585, p. 155 : « Nunc igitur si imaginabimur ductum esse centrum versus *u* per lineam *ou* parallelam ipsi *ad*, clarum nobis erit quod absque ulla difficultate aut resistentia idem [centrum *o*] ducemus, quia hujusmodi centrum ab inferiori parte ad superiorem, numquam mutabit situm respectu distantiae seu intervalli,

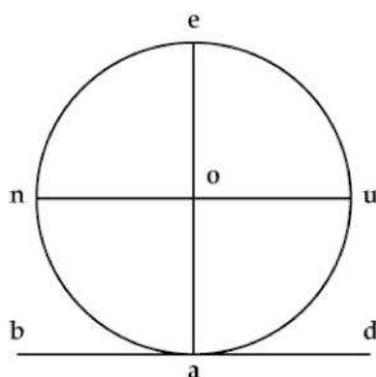


Fig. 1

Benedetti exploite donc la notion archimédienne de centre de gravité, auquel il ramène le poids de la sphère ; dans le cas d'un plan horizontal, le centre de gravité se meut sur une ligne parallèle à ce plan. Benedetti précise alors que *bad* n'est pas un plan, mais une surface sphérique qui a pour centre le point vers lequel se meuvent les corps graves²¹. Pour finir, il précise que la force *F*, nécessaire pour mouvoir la sphère, suffit à la faire tourner sur elle-même²² : la ligne *nou* est assimilée à une balance, si *F* est appliquée en *u* au lieu d'être appliquée en *o*, la sphère tournera vers *d*²³. Ici se termine la réponse à la question du Pseudo-

quae inter ipsum lineamque *ad* intercedit, quod quidem centrum in se colligit totum pondus figurae *aneu* et beneficio lineae *eo* illud ipsum puncto *a* in linea *bad* committit ».

²¹ *Ibid.*, p. 156 : « In quo animadvertendum est, quod etiam si ipsum planum appellem, pro plano tamen perfecto intelligi nolo, sed pro superficie perfecte spherica circa centrum a corporibus gravibus expetitur ; nam ratione magnae amplitudinis huiusmodi superficiei, nullam differentiam notatu dignam a perfecto aliquo plano exigui intervalli ad curvitem eiusdem superficiei imaginari poterimus ».

²² *Ibid.* : « Ut redeamus ad sermonem de revolutione figurae rotundae susceptum, clarum igitur erit quamlibet minimam vim (ut ita dicam) quae trahat, aut impellat centrum *o* versus *u* huiusmodi figuram revoluturam, cujus media pars ad trahendum, aut impellendum punctum *e* sufficere ».

²³ *Ibid.* : « Imaginemur autem quod linea *nou* esset libra quaedam in figura perfecte rotunda *aneu* posita, et vis, quae trahere centrum deberet, divisa esset per medium, cujus medietas appensa esset extremitati *u* diametri *nou*, clarum erit, quod absque ulla difficultate revolveret figuram super lineam *bad* versus *d*, quia huius vis, aut pondus, nullum contra pondus habet ultra centrum *o* versus *n*, quod centrum *o* perpetuo quiescit super *a* in linea

Aristote. Benedetti ajoute cependant une remarque dans le cas du plan incliné : si la sphère monte sur un plan incliné, elle perd d'autant plus de sa force et de sa vertu (pour aller de l'avant) que le plan est incliné, tant et si bien que, le long d'un plan vertical, même une force infinie ne pourrait pas déplacer son centre o hors de la ligne aoe ²⁴.

On peut à ce point faire la part des ressemblances et des différences entre les trois textes considérés. L'argument est le même chez Cardan, Varron et Benedetti : un corps ne résiste pas au mouvement lorsque celui-ci se fait sur une surface équidistante du centre vers lequel ce corps tend naturellement. Cet argument est lié chez tous trois à une analyse du mouvement sur un plan incliné, qui apparaît naturellement comme un intermédiaire entre plan horizontal et vertical. Pour tous trois, le PFM est donc un principe "mécanique", qui permet de décrire le comportement local des corps lourds qui nous entourent. Étant donné ces éléments communs, les différences qui les séparent sont plutôt des nuances : Cardan passe d'une force minimale à une force nulle en raison de la théorie des proportions, Varron donne une présentation abstraite et générale du PFM, Benedetti exploite la notion archimédienne de centre de gravité.

2. Les tentatives de démonstration géométrique des *De Motu Antiquiora*

*eo*a per medium dividente semper totum pondus. Tanto facilius ergo tota dicta vis applicata centro, ipsum versus *u*, trahens per lineam parallelam ipsi *ad* dictam figuram revolveret ».

²⁴ *ibid.*, pp. 156-157 : « Et si linea qua dictum centrum trahitur ab ipso *bad* non aequidistaret, sed sursum traheret super *u* aut subter, aliquid de sua vi virtuteque amitteret, et tanto plus, quanto inclinata magis esset versus *aoe* et tandem cum esset unita cum *aoe* aut ad superius, aut ad inferius quantalibet vi, etiam si infinita, figuram extra situm primae lineae *aoe* non moveret, sed si sursum traheret se jungeret eam a linea *bad* non ob id tamen efficeret, ut centrum *o* exiret extra primam lineam *AOE*».

Une fois la convergence entre Cardan, Varron ou Benedetti établie, déterminer si Galilée a lu leurs textes est, non seulement difficile, mais peut-être pas décisif²⁵. Mieux vaut insister sur ce qui caractérise ses écrits, à commencer par les *De Motu antiquiora*²⁶. Dans le chapitre 14 du traité *De Motu* en 23 chapitres, Galilée ne se contente pas d'avancer un argument établissant le PFM : il tente d'en donner des démonstrations géométriques, fondées, pour la première, sur le principe du levier et, pour la seconde, sur la loi du plan incliné²⁷.

Démonstration géométrique (1) : de la balance au plan horizontal

²⁵ Cela est difficile. Sur Galilée lecteur de Benedetti, voir les conclusions négatives de ENRICO GIUSTI, « Gli Scritti 'De Motu' di Giovan Battista Benedetti », *Bollettino di Storia delle Scienze Matematiche*, XVII/1, 1997, pp. 51-104 : 93-96. Sur Galilée lecteur de Varron, voir les hypothèses de CAMEROTA et HELBING, *All' Alba della scienza galileana* (op. cit. note 9), pp. 218-223. Les quelques éléments concernant Galilée lecteur de Cardan sont rassemblés in MICHELE CAMEROTA, « Movimento circolare e *motus neuter* negli scritti *De Motu* di Galileo Galilei », *Annali della Facoltà di Magisterio dell'università di Cagliari*, nuov. ser., vol. XV, 1991, pp. 1-37: 16.

²⁶ On désigne ainsi l'ensemble de manuscrits autographes datant de la période pisane de Galilée, donnés in OG, I, pp. 250-419. D'après les indications fournies par Viviani, il s'agissait de plusieurs petits cahiers (*quinternetti*) placés dans une chemise portant le titre *De Motu antiquiora*, c'est-à-dire les études plus anciennes sur le mouvement (VINCENZO VIVIANI, *Quinto Libro degli elementi di Euclide, ovvero scienza universale delle proporzioni, spiegata colla dottrina del Galileo, con nuov'ordine distesa e per la prima volta pubblicata da Vincenzo Viviani ultimo suo discepolo. Aggiuntevi cose varie e del Galileo e del Torricelli ; i ragguagli dell'ultime opere loro dall'indice si manifesta*, Firenze, alla Condotta, 1674, pp. 104-105). Parmi les textes qui constituent les écrits *De Motu*, l'ordre chronologique de rédaction aujourd'hui le plus généralement admis est le suivant : un plan de travail, in OG, I, pp. 418-419 ; le *Dialogus*, in *ibid.*, pp. 367-408 ; un traité en 23 chap., in *ibid.*, pp. 251-340 ; un remaniement des chap. 1 et 2 de ce premier traité, in *ibid.*, pp. 341-343 ; un essai en 10 chap., in *ibid.*, pp. 344-366 ; des notes intitulées « Memoranda », in *ibid.*, pp. 409-419. Sur ce point, voir principalement ANTONIO FAVARO, « Alcuni scritti inediti di Galileo Galilei tratti dai manoscritti della Biblioteca Nazionale di Firenze », *Bullettino di bibliografia e di storia delle scienze matematiche e fisiche*, 16, 1883, pp. 1-97 et 135-157: 3 ; RAYMOND FREDETTE, « Galileo's *De Motu antiquiora* », *Physis*, XIV/4, 1972, pp. 321-348 ; MICHELE CAMEROTA, *Gli scritti de motu antiquiora di Galileo Galilei : il Ms. Gal 71. Un'analisi storico-critica*, Cagliari, CUEC, 1992, pp. 19-62 ; ENRICO GIUSTI, « Elements for the relative Chronology of Galilei's *De Motu antiquiora* », *Nuncius*, XIII, 1998, pp. 427-460 ; RAYMOND FREDETTE, « Galileo's *De Motu antiquiora*: notes for a reappraisal », in MONTESINOS et SOLÍS (éds.), *Largo Campo di Filosofare* (op. cit. note 10), pp. 165-182 : 169-177.

²⁷ OG, I, pp. 299-300.

Considérons un cercle de centre a , une balance bc mobile autour de ce centre et la ligne ad dirigée de a vers le centre du monde (Fig. 2).

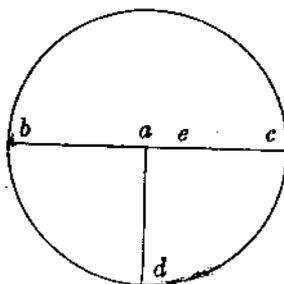


Fig. 2

Galilée commence par montrer qu'une force quelconque peut faire monter vers c le poids placé en d ²⁸. Qu'on suspende en b un poids aussi petit qu'on veut et soit le rapport entre les poids en d et en b égal au rapport entre la ligne ba et la ligne ae . D'après le principe du levier, si l'on suspend en e le poids qui est en d , la balance est en équilibre. Mais le poids en d est plus léger lorsqu'il est suspendu au centre a que lorsqu'il est suspendu en e , car non seulement il se rapproche, mais il pend, en effet, de ce centre. Aussi, lorsque le poids en d est suspendu en a , la balance se penche du côté de b et le poids en d monte vers c . Et Galilée d'enchaîner par un raisonnement *a fortiori*, reposant sur l'intuition, non explicitée ici, qu'il est plus difficile de soulever un corps que de le mouvoir à l'horizontal : « Si donc un poids quelconque en d est non seulement mû mais aussi soulevé par une force quelconque, qu'y a-t-il d'étonnant si ce même poids en d est mû par cette même force, ou même par une force plus petite que la force en b , sur un plan qui ne monte pas »²⁹ ?

Dans cette démonstration, Galilée assimile donc la situation d'un poids sur le plan horizontal à la situation d'un poids suspendu à une balance. Le principe du levier indiquant

²⁸ *Ibid.*, p. 299 : « Dico igitur, quamcunque vim puncto b impositam posse movere pondus in d , et necessario movere ».

²⁹ *Ibid.* : « Ergo, si a quacunque vi quodcunque pondus in d , nedum movetur, verum etiam attollitur, quid ergo mirum est, idem pondus d ab eadem vel minori vi, quam sit vis in b , in plano non ascendenti moveri » ?

dans quelles conditions les poids d'une balance sont en équilibre, il s'agit de déduire de ce principe ce que doit être le comportement d'un corps sur un plan horizontal. Pour cela, Galilée imagine de petits accroissements de la gravité de position du poids placé en d autour de la valeur nulle : lorsque ce poids est suspendu en a , sa gravité de position est nulle ; dès qu'il monte, elle ne l'est plus. De ces accroissements de gravité de position résultent de petites variations de mouvement vers le haut, qu'un mathématicien d'aujourd'hui n'hésiterait pas à assimiler à des mouvements sur le plan horizontal. Mais les mathématiques dont dispose Galilée, c'est-à-dire la théorie des proportions, ne permettent pas cette assimilation : puisque la gravité de position est nulle sur le plan horizontal, on ne peut strictement rien déduire de l'égalité du rapport des gravités de positions et du rapport des forces. C'est sans doute parce qu'il sait qu'il quitte l'ordre de la démonstration géométrique que Galilée conclut par une formule interrogative : « qu'y a-t-il d'étonnant si... » ?

Démonstration géométrique (2) : du plan incliné au plan horizontal

Après une justification qualitative du PFM que nous commentons au paragraphe suivant, Galilée propose une démonstration géométrique alternative³⁰. Elle suppose acquise la loi du plan incliné, dont il a donné un peu plus haut une démonstration. Nous savons donc que, en appelant respectivement P_i , P_v , les gravités selon l'oblique et selon la verticale, et h et l la hauteur et la longueur du plan, on a : $P_i / P_v = h/l$.

Pour montrer qu'une force plus petite que toute force donnée peut mouvoir une sphère sur un plan horizontal, Galilée a également besoin d'une hypothèse similaire à celle qu'il avait implicitement fait jouer dans la première démonstration, mais ici d'emblée explicitée : un

³⁰ *Ibid.* : « Quod etiam aliter demonstrare possumus : nempe quodcunque mobile, nullam extrinsecam resistantiam patiens, a vi quae minor sit quacunque vi proposita, in plano quod nec sursum nec deorsum tendat, moveri posse ».

corps grave peut être mû sur un plan parallèle à l'horizon par une force plus petite que celle qui le meut sur un plan incliné par rapport à l'horizon³¹.

Soient alors un plan parallèle à l'horizon selon la ligne ab , et bc une ligne qui lui est perpendiculaire ; e est une sphère et f une force quelconque (Fig. 3). Il s'agit de démontrer qu'en l'absence de toute résistance extérieure et accidentelle, la sphère e peut être mue sur le plan horizontal par une force plus petite que f .

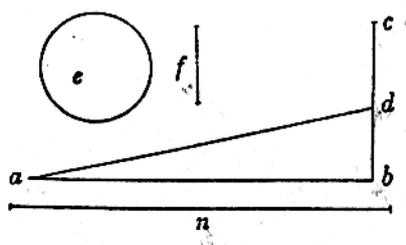


Fig. 3

On désigne par n une force qui peut hisser le poids e selon la verticale bc et on tire la ligne ad dont le rapport avec la ligne db est égal au rapport de la force n avec la force f . D'après la loi du plan incliné, la sphère e pourra être hissée sur le plan incliné ad par la force f , et donc, écrit Galilée, sur le plan horizontal ab par une force plus petite que f ³². Cette conclusion est-elle valable ?

La loi du plan incliné, appliquée au rapport des gravités de la sphère e selon la ligne verticale db et l'oblique ad , respectivement, permet effectivement d'établir que $n/f = ad/db$. Il est donc vrai que, sur tout plan moins incliné que ad , la sphère e peut être soutenue (et même

³¹ *Ibid.*, pp. 299-300 : « Ad cujus demonstrationem hoc supponimus : nempe, mobile grave quodcumque a minori vi moveri posse per planum æquidistans horizonti, quam per planum supra horizontem inclinatam ».

³² *Ibid.* : « Sit itaque planum horizonti æquidistans secundum lineam ab , cui ad rectos angulos sit bc ; et mobile sit sphaera e ; sit autem quæcumque vis f : dico, sphaeram e nullam extrinsecam resistantiam habentem, posse per planum ab moveri a minori vi quam sit vis f . Sit vis n quæ potest sursum trahere pondus e ; et sicut vis n ad vim f , ita sit ad linea ad lineam db . Ex his itaque quæ supra demonstrata sunt, poterit sphaera e sursum trahi per planum ad a vi f : ergo per planum ab a minori vi, quam sit f , movebitur sphaera e ».

mue³³) par une force plus petite que f . Le problème est cependant, ici encore, de savoir si l'on peut en toute rigueur passer d'un plan incliné, aussi faiblement que ce soit, au plan horizontal. Que Galilée ait initialement avancé une hypothèse explicite pour pouvoir garantir ce passage ne le rend pas plus aisé.

On peut cerner le problème en appliquant directement la loi du plan incliné au cas du plan horizontal, dans lequel $h = 0$, donc $P_i = 0$. Mais, si la gravité de position du mobile est nulle, la force pour le soutenir ou le mouvoir l'est aussi. L'application directe de la loi du plan incliné au cas limite où $h = 0$ ne conduit donc pas à la conclusion avancée par Galilée, mais à l'affirmation de Cardan qu'une force nulle suffit à mouvoir le corps. Or, comme nous l'avons signalé à propos de la proposition 72 de l'*Opus novum*, comment une force nulle pourrait-elle mouvoir un corps ? Ne faudra-t-il bien plutôt conclure que, sur un plan horizontal, la sphère est immobile ? Mais, bien sûr, cela n'était pas à démontrer. Ce problème renvoie, comme dans le cas de la première démonstration, à la difficulté que constitue, dans un contexte mathématique dominé par la théorie des proportions, le passage d'un plan incliné, aussi faiblement que ce soit, au plan horizontal.

La première tentative de démonstration semble assez heureuse : Galilée imagine un dispositif montrant de petites variations de la gravité de position autour de sa valeur nulle, et permet donc, en quelque sorte, de visualiser ce qui arrive à un corps qui se trouve sur un plan horizontal, et dont la gravité est, de ce fait, neutralisée . Dans le contexte de la théorie des proportions, elle ne peut cependant, pas plus que la démonstration fondée sur la loi du plan incliné, être considérée comme une démonstration mathématique rigoureuse.

Au terme de ce développement, Galilée remarque que, le PFM valant seulement dans des conditions qui ne sont pas réalisées dans notre monde, il serait vain d'en tenter la vérification

³³ Comme nous le verrons plus bas en effet, une des hypothèses initiales de la démonstration de la loi du plan incliné qui occupe le début de ce chapitre est que la gravité d'un corps et la force pour le mouvoir sont égales.

expérimentale. On a en effet supposé que les lignes de suspension des poids sont à angles droits avec le fléau de la balance (alors qu'elles convergent), que les mobiles ne rencontrent aucune résistance extrinsèque (ce qui n'arrive jamais) ou que la ligne équidistante du centre des graves est un plan (alors qu'il s'agit, dans notre monde, d'une surface circulaire)³⁴. Ces remarques ayant été faites par Cardan ou Benedetti, il n'y a pas lieu d'y voir un platonisme ou un archimédisme propre à Galilée³⁵. Elles sont cependant dignes de commentaire : elles montrent que Galilée, comme Cardan ou Benedetti, considère l'étude du mouvement local d'un corps sur le plan horizontal comme une étude purement "mécanique", séparée de toute étude cosmologique.

3. De la justification qualitative des *De Motu antiquiora* à la notion d'indifférence

Après le *De Motu*, on ne trouve plus chez Galilée de tentative de démonstration géométrique du PFM : il privilégie des variantes d'une justification qualitative qu'on trouve

³⁴ *Ibid.*, p. 298 : « (...) supponendum est, planum esse quodammodo incorporeum, vel saltem exactissime expoliturum et durum, ne, dum mobile super planum gravat, inclinaret planum, et quodammodo tanquam in fovea, in eo quiesceret. Necessesse est etiam mobile esse expolitissimum, et figura quae motui non resistat, qualis esset perfecta spherica, et, item, materia durissima, aut fluida ut aqua ». *Ibid.*, pp. 300-301 : « Hic autem non me praeterit, posse aliquem obiicere, me ad has demonstrationes tanquam verum id supponere quod falsum est : nempe, suspensa pondera ex lance, cum lance angulos rectos continere ; cum tamen pondera ad centrum tendentia concurrerent (...). Et haec quae demonstravimus, ut etiam supra diximus, intelligenda sunt de mobilibus ab omni extrinseca resistentia immunibus: quae quidem cum forte impossibile sit in materia invenire, ne miretur aliquis, de his periculum faciens, si experientia frustretur, et magna sphaera, etiam si in plano horizontali, minima vi non possit moveri (...) Accedit enim, praeter causas jam dictas, etiam haec : scilicet, planum non vere posse esse horizonti aequidistans. Superficies enim terrae sphaerica est, cui non potest aequidistare planum : quare, plano in uno tantum puncto sphaeram contingente, si a tali puncto recedamus, necesse est ascendere : quare merito a tali puncto non quacunquē minima vi poterit removeri sphaera ». Comme le rappellent les références données in KOYRÉ, *Études galiléennes* (*op. cit.* note 3), p. 208, ce sera une constante chez Galilée de considérer que la gravité agit de l'intérieur même du corps et ne lui laisse aucune chance, pour ainsi dire, de s'éloigner indéfiniment selon une trajectoire rectiligne.

³⁵ Ceci vaut contre la célèbre conclusion que KOYRÉ, *Études galiléennes* (*op. cit.* note 3), pp. 77-79, avance en s'appuyant sur ces textes.

entre les deux démonstrations géométriques³⁶. Nous analysons cette justification qualitative puis montrons qu'elle conduit, dans les *Mécaniques*, à l'idée qu'un corps sur un plan horizontal est indifférent au repos et au mouvement.

La justification qualitative du De Motu : le plan horizontal entre deux plans inclinés

Entre les deux démonstrations géométriques du *De Motu*, on trouve une justification du PFM de type qualitatif, plus proche de l'expérience de pensée que les deux démonstrations géométriques :

« De surcroît, en l'absence de résistance extérieure, un mobile descend naturellement sur un plan un tant soit peu incliné sans qu'on lui applique une force extérieure, comme c'est clair dans le cas de l'eau. Et ce même mobile ne monte pas sur un plan élevé par rapport à l'horizon, sinon violemment. Il reste donc que, sur l'horizon lui-même, il ne se meut ni naturellement, ni violemment. Et, s'il n'est pas mû violemment, il pourra être mû par une force plus petite que toutes les autres »³⁷.

Comme Héron, Galilée fait du plan horizontal un intermédiaire entre deux plans d'inclinaison opposée. Mais Héron réussit seulement à prouver qu'un corps sur un plan

³⁶ Cette justification est seulement introduite par « Amplius », alors que la deuxième démonstration géométrique est introduite de manière plus marquée par « Quod etiam aliter demonstrare possumus ». Il est donc possible que ce que nous appelons la justification intuitive soit seulement un complément de la première démonstration ; nous la traitons cependant séparément, dans la mesure où elle débouche sur l'idée d'indifférence dans les *Mécanique*.

³⁷ *Ibid.* : « Amplius : mobile nullam extrinsecam habens resistentiam, in plano sub horizonte quantumcunque inclinato naturaliter descendet nulla adhibita vi extrinseca ; ut patet in aqua : et idem mobile in plano quantumcunque super horizontem erecto non nisi violenter ascendit : ergo restat, quod in ipso horizonte nec naturaliter nec violenter moveatur. Quod si non violenter movetur, ergo a vi omnium minima moveri poterit ».

horizontal demeure au repos³⁸. Galilée va plus loin en exploitant l'opposition entre mouvement naturel et mouvement violent³⁹. Le mouvement vers le bas étant naturel, et le mouvement vers le haut, violent, un mouvement sur un plan qui ne va ni vers le haut ni vers le bas n'est ni naturel ni violent. Dans la mesure où il n'est pas naturel, il suppose une force, mais, dans la mesure où il n'est pas violent, la plus petite force est suffisante pour l'initier.

La version longue des Mécaniques : l'indifférence de la matière au repos et au mouvement

Le chapitre consacré à la vis s'ouvre, dans la version brève et dans la version longue des *Mécaniques*, par une remarque liminaire : pour expliquer la nature de la vis, il faut faire appel à un principe qui peut paraître, tout au moins à première vue, éloigné du but poursuivi, mais qui est, en réalité, un moyen tout à fait approprié pour y parvenir⁴⁰. Le principe en question est la loi du plan incliné, qui elle-même suppose le PFM. La structure de l'argumentation est exactement la même dans les deux versions des *Mécaniques*, ce qui confirmerait, si besoin était, l'existence de liens étroits entre les deux textes⁴¹ :

[a] Tous les corps graves ont tendance à se mouvoir naturellement vers le centre : ils descendent selon la direction perpendiculaire à l'horizon,

³⁸ HÉRON, *Les Mécaniques* (*op. cit.* note 7), I 20, pp. 87-88, remarque que, si on incline le plan sur lequel se trouve le corps à droite ou à gauche, le corps descendra à droite ou à gauche ; donc, conclut-il, « lorsque le plan est replacé de niveau, sans inclinaison dans aucun sens, le poids demeure en repos sans qu'aucune puissance ne le retienne, jusqu'à ce que le plan soit incliné dans un sens ou dans l'autre ; alors le poids penche dans ce sens par l'effet de la pesanteur qui le fait partir d'un côté ou de l'autre ; il n'a donc pour entrer en mouvement que la puissance très petite capable de soulever le plan. Donc le poids est mû par toute force, si petite soit-elle ». On voit bien que l'intuition qu'il suffit d'une petite puissance pour soulever le plan revient à supposer ce qu'on veut démontrer.

³⁹ Au fil des écrits *De Motu*, de ce qu'il n'y a pas de corps léger en soi, la conséquence sera dégagée qu'il n'y a pas de mouvement naturel vers le haut ; voir en particulier, OG, I, pp. 352-364. Galilée n'abandonnera cependant jamais l'idée que tout corps étant naturellement grave, le mouvement vers le centre est naturel.

⁴⁰ *Les Mécaniques* (*op. cit.* note 4), v.b., p. 11, l. 2-6 ; v.l., p. 57, l. 11-14.

⁴¹ *Ibid.*, v.b., pp. 11-13, l. 2-34 ; v.l., pp. 57-59, l. 2-79.

[b] mais également, quand ils ne peuvent faire autrement, le long de n'importe quelle surface un tant soit peu inclinée ;

[c] c'est ce que montre par exemple le cours des fleuves.

[d] En revanche, le mouvement vers le haut ne peut se faire sans une certaine violence.

[e] De ces remarques on peut déduire le comportement d'une boule parfaitement ronde et lisse sur une surface exactement horizontale.

Les deux versions diffèrent cependant légèrement dans la manière de formuler cette conclusion. Selon la version brève, sur un plan horizontal, les choses graves « ne se mouvraient pas d'elles-mêmes, et il est vrai qu'une force minime suffirait à les mouvoir »⁴². Deux énoncés sont donc juxtaposés : un corps sur un plan horizontal ne se meut pas de lui-même, et il peut être mis en mouvement par une force minime. On peut facilement expliciter le lien entre ces deux énoncés : le corps ne se meut pas spontanément ou naturellement, donc il faut l'intervention d'une force extérieure, *et*, ou encore *mais*, cette force peut être aussi petite qu'on veut. La version brève ne fait donc que reprendre ce que nous avons appelé la justification qualitative du *De Motu*, et encore n'est-ce pas de manière totalement explicite.

Selon la version longue maintenant, la sphère placée sur un plan horizontal est « pour ainsi dire indifférente et hésitante entre le mouvement et le repos, de telle sorte qu'une force minime serait suffisante à la mouvoir et que, inversement, une très petite résistance, par exemple seulement celle de l'air qui l'entoure, peut la maintenir à l'arrêt »⁴³. La version longue ne se contente donc pas de décrire le comportement d'un corps grave sur un plan horizontal ; en caractérisant l'état de ce corps par son indifférence au repos et au mouvement, elle indique que c'est en raison de cet état que la moindre force peut le mouvoir et la moindre résistance le maintenir immobile. Il est remarquable que ce soit également dans la version

⁴² *Ibid.*, v.b., pp. 11-12, l. 12-16.

⁴³ *Ibid.*, v.l., p. 58, l. 44-55.

longue que Galilée présente pour la première fois le PFM comme un « axiome indubitable »⁴⁴, une proposition fondamentale qu'il est impossible de démontrer parce qu'elle découle de la nature même des corps graves. On peut penser qu'il estime alors avoir atteint un fondement qu'il n'y a pas lieu de démontrer à partir d'une autre proposition, fût-elle, comme le principe du levier, depuis longtemps établie.

4. La question de la conservation du mouvement circulaire dans les *De Motu antiquiora*

De l'affirmation selon laquelle sur un plan horizontal un corps est dans un état d'indifférence à l'égard du repos et du mouvement, il est naturel de déduire quel est son comportement dans le temps : ce corps demeurera perpétuellement dans son état, fût-il de repos ou de mouvement. En fait, dans les *Mécaniques*, Galilée ignore la question de ce qui advient à un mouvement ni naturel ni violent une fois qu'il a été initié sans doute parce qu'il s'agit d'un traité sur les machines simples écrit pour des étudiants. Il ne l'abordait pas non plus dans le chapitre 14 du traité *De Motu* ; elle était pourtant présente dans d'autres passages des *De Motu Antiquiora*, que nous allons maintenant examiner.

Soulignons d'emblée la différence de problématique entre ces passages et les textes de Jean Buridan, Albert de Saxe et Nicolas de Cues, sur lesquels Pierre Duhem a attiré l'attention, il y a maintenant plus d'un siècle⁴⁵. Pour les auteurs évoqués par Duhem, le

⁴⁴ *Ibid.*, v.l., p. 58, l. 50.

⁴⁵ PIERRE DUHEM, *Études sur Léonard de Vinci. Ceux qu'il a lus et ceux qui l'ont lu* (1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} séries), Paris, Hermann, 1906-1913, pp. 42-51 et PIERRE DUHEM, *Le Système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, 10 vol., Paris, Hermann, 1913-1959, vol. VIII, pp. 328-340. Les passages en question sont les commentaires de Buridan de la *Physique*, lib. VIII, q. 12, du *De Caelo*, lib. II, q. 12 et de la *Métaphysique*, lib. XII, q. 9, le commentaire d'Albert de Saxe du *De Caelo*, lib. II, q. 14, et le *De Ludo globi* de Nicolas de Cues, lib. I, fol. 154v dans l'édition de 1514. La thèse de Duhem selon laquelle ces textes constituaient une anticipation de la dynamique moderne a été suffisamment critiquée pour que nous n'y revenions pas (voir par exemple CLAVELIN, *La Philosophie naturelle*, pp. 111-114 ; MICHEL LERNER, *Le Monde des sphères*, 2 vol., Paris, Les Belles-Lettres, 1996-1997, vol. 1, pp. 186-194).

mouvement perpétuel des sphères est donné, et le problème est de savoir comment l'expliquer : si l'on admet la persistance de l'*impetus* que Dieu leur a initialement imprimé, sachant qu'aucune résistance ne vient, dans ce cas, l'épuiser, ne pourrait-on pas se passer des âmes motrices ou de l'hypothèse de la cyclophorie de l'éther ? Dans les passages que nous allons examiner, Galilée, partant de l'exemple d'une sphère en révolution - exemple classique lorsqu'il s'agit de réfuter la théorie aristotélicienne d'un mouvement violent ayant pour cause le milieu - pose une tout autre question sur le mouvement circulaire : en tant que tel, a-t-il sa place dans l'opposition entre mouvement naturel et mouvement violent ? Et combien de temps dure-t-il ? En l'absence d'obstacle, un mouvement circulaire n'aurait-il besoin d'aucune force pour persister ? Pourrait-il durer éternellement ?

Le Dialogus

Le plus ancien des écrits *De Motu antiquiora*⁴⁶, le *Dialogus* entre Alexander et Dominicus, entend, entre autres choses, montrer qu'un mouvement violent a pour cause, non pas le milieu comme le disait Aristote, mais un *impetus* imprimé par le moteur au mobile. Pour ce faire, le porte-parole de Galilée, Alexander, prend un contre-exemple montrant les limites de la théorie aristotélicienne : la révolution d'une sphère sur elle-même ne peut pas être causée par le milieu, puisque ce dernier, par définition, ne change pas⁴⁷. L'argument, comme le remarque son interlocuteur, Dominicus, ne vaut cependant qu'à condition que le mouvement d'une sphère soit violent ; ce qui ne va pas de soi, car certains y voient bien au contraire

⁴⁶ Sur la chronologie des écrits *De Motu*, voir plus haut note 26.

⁴⁷ L'expérience de pensée classique dans ce contexte consiste à imaginer un disque (ou une sphère) en mouvement dans la cavité d'une planche ; voir ainsi JULIUS-CAESAR SCALIGER *Exercitatarum exercitationum liber XV De Subtilitate ad Hieronymum Cardanum*, Paris, Vascosanus, 1557, exerc. 28, cité in DUHEM, *Études sur Léonard* (*op. cit.* note 45), p. 200. FRANCESCO BUONAMICI, *De Motu libri X*, Firenze, Bartholomaeus Sermarmartellius, 1591, lib. V, cap. 26, p. 505, cité in KOYRÉ, *Études galiléennes*, p. 32-33. Galilée s'y réfère dans le *De Motu*, chap. 17, in OG, I, p. 309 et conclut que la sphère tournera « per longum tempum ».

l'exemple par excellence du mouvement naturel⁴⁸. Cette objection amène Alexander à rappeler que tout mouvement circulaire n'est pas naturel : le seul mouvement circulaire naturel est celui qui se fait autour du centre du monde. Ainsi une sphère, qui ne tourne pas autour du centre du monde a-t-elle un mouvement mixte ; en revanche, le mouvement du ciel, qui se fait autour du centre du monde, a un mouvement naturel.

« C'est pourquoi, ajoute Alexander, s'il y avait une sphère en marbre au centre du monde, de sorte que le centre du monde et le centre de la sphère soient identiques, et que le début du mouvement était donné par un moteur externe, alors peut-être la sphère ne se mouvrait-elle pas d'un mouvement violent mais naturel, car il n'y aurait aucune résistance des axes et que les parties de la sphère ne s'approcheraient ni ne s'éloigneraient du centre du monde. J'ai dit « peut-être », car si ce mouvement n'était pas violent, il durerait indéfiniment ; or, cette éternité du mouvement semble être très éloignée de la nature de la terre elle-même, à laquelle le repos convient davantage, semble-t-il, que le mouvement »⁴⁹.

Dans la mesure où cette sphère ne s'éloigne ni ne s'approche du centre du monde, Alexander admet la possibilité que son mouvement soit naturel. Mais, s'il en était ainsi, il faudrait admettre une conséquence selon lui invraisemblable étant donné la tendance au repos

⁴⁸ *De Motu*, OG, I, p. 372 : « Nanque qui contrarias partes tuentur, forsan huiusmodi argumento ita respondere possent, dicentens motum illum non esse violentum, cum sit circularis. Cum enim motui violento contrarietur naturalis, motui vero circulari motus contrarius sit nullus, circularis motus violentus nullo pacto erit : et cum non sit violentus, consequentia, quam ex motu sphaera deducis, nullius erit momenti ».

⁴⁹ *Ibid.*, p. 373 : « Si itaque marmorea sphaera existeret in centro mundi, ita ut centrum mundi et centrum sphaerae essent idem, deinde initium motus sphaerae a motore externo daretur, tunc sphaera fortasse non moveretur motu violento sed naturali ; cum nulla ibi esset axium resistentia, nec partes sphaerae centro mundi accederent aut recederent. Dixi autem, fortasse : quia si talis motus non esset violentus, perpetuo duraret ; ista autem motus aeternitas ab ipsius terrae natura longe abesse videtur, cui quies iucundior quam motus esse videtur ».

de ses parties : la perpétuité de ce mouvement. L'aristotélisme structure ici le raisonnement d'Alexander : la question initiale est de savoir si la révolution d'une sphère au centre du monde est un mouvement naturel ou violent ; la conclusion semble être que la tendance naturelle de la terre au repos exclut la possibilité que le mouvement soit effectivement naturel. Cette conclusion n'est cependant pas explicitée, Galilée n'arrivant pas ici à élucider le statut d'une révolution au centre du monde ou, plus généralement, d'un mouvement qui se fait à distance constante de ce centre.

Le traité De Motu

Le chapitre 16 du traité *De Motu* en 23 chapitres « in quo de motu circulari quaeritur an sit naturalis an violentus (où l'on se demande si le mouvement circulaire est naturel ou violent) » semble promettre une élucidation de ce problème. De nouveau, Galilée en vient à considérer une sphère dont le centre de gravité coïncide avec le centre du monde⁵⁰. Dans la mesure où son mouvement est tel que son centre de gravité ne s'éloigne ni ne s'approche de ce centre, il n'est ni naturel ni violent⁵¹. Mais alors, deux questions se posent. La première, qui ne nous importe pas ici, est de savoir s'il en est de même pour une sphère hétérogène, dont le centre de gravité et le centre géométrique ne coïncident pas. La seconde est ainsi formulée par Galilée :

⁵⁰ *Ibid.*, p. 304 : « si marmorea sphaera esset in mundi centro, ita ut centrum eius a mundi centro non differet ».

⁵¹ *Ibid.* : « Manifestum est, sphaeram super mundi centrum circumvolutam neque naturali neque violento motu movetur, cum ad proprium locum nec accederet nec recederet ». CAMEROTA, « Movimento circolare » (*op. cit.* note 25), pp. 3-11, juge qu'il y a une évolution entre le *Dialogus* (dans lequel la révolution d'une sphère serait dite « mixte » en général, et « naturelle » dans le cas particulier où la révolution se fait autour du centre du monde) et le traité en 23 chap. (dans lequel la révolution d'une sphère serait dite « naturelle ou violente » en général, et « ni naturelle ni violente » dans le cas particulier où la révolution se fait autour du centre du monde). Nous ne partageons pas cette interprétation : les passages en question nous semblent témoigner d'une interrogation sur le mouvement circulaire, qui ne débouche à ce moment-là sur aucune thèse ferme.

« Si une sphère était au centre du monde, et que sa révolution n'était ni naturelle ni violente, on se demande si, ayant reçu d'un moteur externe un début de mouvement, elle aurait un mouvement perpétuel, ou non. Si en effet la sphère n'est pas mue contre la nature, il semble qu'elle doive se mouvoir perpétuellement, mais si elle ne se meut pas selon la nature, il semble qu'elle doive à la fin se reposer »⁵².

Mais, ajoutera-t-on, un bon aristotélicien poserait l'alternative suivante : ou bien la sphère a reçu d'un moteur externe son mouvement, qui n'est dès lors pas naturel et ne se conserve pas ; ou bien la sphère s'est mise spontanément en mouvement, et alors son mouvement se perpétuera, puisqu'il est naturel. On a ici le sentiment que Galilée, dissociant la question de l'origine du mouvement et la question de sa conservation, entrevoit la possibilité d'une troisième voie, celle d'un mouvement qui n'est pas spontané, mais qui serait tel qu'il se conserve. Dans un ajout marginal, il se demande comment appeler le mouvement qui se fait autour du centre du monde sur la circonférence d'un cercle : « on le dira plutôt neutre que mixte : le mixte en effet participe des deux mouvements, mais le neutre, d'aucun »⁵³.

⁵² *Ibid.*, p. 305 : « si sphaera esset in centro mundi, nec naturaliter nec violenter circumageretur, quaeritur, utrum, accepto motus principio ab externo motore, perpetuo moveretur nec ne. Si enim non praeter naturam movetur, videtur quod perpetuo moveri deberet; sed si non secundum naturam, videtur quod tandem quiescere debeat ».

⁵³ *Ibid.*, p. 300, ajout marginal : « Cum enim violentus gravium sit a centro, naturalis vero ad centrum, non potest ex his componi motus, qui partim ascendat, partim vero descendat : nisi forte dicamus, talem motum mixtum esse circa mundi centrum super circuli circumferentia fit. Sed iste melius dicetur neuter quam mixtus : mixtus enim de utroque participat, neuter vero de nullo ». CAMEROTA, « Movimento circolare » (*op. cit.* note 25), pp. 12-25, montre que la catégorie de mouvement neutre fut, des commentateurs médiévaux d'Aristote jusqu'à Mainetto Mainetti, Francesco Zabarella, Girolamo Borro ou Francesco Buonamici, utilisée dans différents contextes.

Il diffère cependant la réponse définitive à la question de savoir, si oui ou non, le mouvement de la sphère se perpétue⁵⁴. Finalement, il ne la donnera pas.

Dans les *De Motu antiquiora*, Galilée pose donc la question de la durée d'un mouvement circulaire sans la lier au PFM ; bien plus, il ne lui donne aucune réponse définitive. En guise d'épilogue, nous montrerons que cette réponse sera finalement apportée dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* et qu'elle sera alors articulée non seulement au PFM, mais à certains acquis de la science galiléenne.

5. Conservation du mouvement circulaire et cosmologie dans le *Dialogue*

A l'époque du *Dialogue*, les acquis principaux sont la maîtrise de la notion d'accélération et l'engagement copernicien. D'une part, Galilée sait désormais que la vitesse d'un corps en chute libre, se déplaçant d'un mouvement naturel rectiligne s'accroît à chaque instant d'une quantité constante⁵⁵ et que, pour passer du repos à un degré de vitesse donné, il faut passer

⁵⁴ *Ibid.*, p. 306 : « Ad secundum, quod supra quaerebatur, non est hic responsionis locus (...) ».

⁵⁵ La définition du mouvement uniformément accéléré comme celui qui acquiert, à chaque instant, un nouveau degré de vitesse, est attestée pour la première fois dans le fragment « Liber secundus. In quo agitur de motu accelerato », in OG, II, pp. 261-266 ; tr. fr. partielle in KOYRÉ, *Études galiléennes* (*op. cit.* note 3), pp. 136-138 ; cette définition est reprise dans les *Discours*, OG, VIII, p. 197. La datation du fragment en question est controversée : Antonio Favaro, in OG, II, pp. 259-260, le fait remonter à 1604 ; KOYRÉ, *Études galiléennes*, (*op. cit.* note 3), p. 138, note 2, le date de 1608-1609 ; PAOLO GALLUZZI, *Momento, Studi Galileiani*, Rome, Ed. dell'Ateneo et Bizzari, 1979, p. 334, le situe vers 1629-1630. Il est cependant selon toute probabilité postérieur à 1604, époque à laquelle, comme le montrent la lettre à Paolo Sarpi du 16 octobre 1604 (OG, X, 115-116) et un autre fragment (OG, VIII, pp. 373-374), Galilée pensait que l'accroissement uniforme du degré de vitesse se fait en fonction de l'espace (et non du temps). La démonstration que le mouvement d'un corps en chute libre est uniformément accéléré et que son degré de vitesse, c'est-à-dire sa vitesse instantanée, croît comme le temps est donnée dans le *Dialogue*, OG, VII, pp. 254-256 et dans les *Discours*, OG, VIII, pp. 208-209.

par tous les degrés de vitesse, en nombre infini, qui l'ont précédé⁵⁶. D'autre part, devenu copernicien, il inscrit le concept d'inertie circulaire dans un contexte cosmologique réformé⁵⁷.

Plus précisément, le problème du mouvement circulaire des planètes se pose alors chez Galilée à partir de deux prémisses, l'une plus cosmologique et l'autre plus mécanique :

1) Il est impossible que les corps "intégraux", c'est-à-dire les corps constituant l'univers, aient des mouvements naturels rectilignes, car ces derniers n'ont pas de terme ; aussi, les seuls mouvements naturels possibles pour des corps de ce genre sont les mouvements circulaires :

« (...) Si les corps qui composent le monde doivent être par nature mobiles, leurs mouvements doivent être circulaires et non rectilignes. (...) le mouvement rectiligne étant par nature infini, la ligne droite étant infinie et indéterminée, il est impossible qu'un mobile ait par nature un principe de mouvement en ligne droite, autrement dit vers là où il est impossible d'arriver puisqu'il n'y a pas là alors de terme défini ; or la nature, comme Aristote lui-même le dit, n'entreprend pas ce qui est impossible, elle n'entreprend pas non

⁵⁶ « Il mobile partendosi dalla quiete passa per tutti i gradi di velocità, senza dimorare in alcuno » (OG, VII, p. 46, tr. fr. in *Dialogue* (op. cit. note 2), p. 58). Dans une lettre du 21 mars 1626, in OG, XIII, p. 312, Cavalieri demande à Galilée si le mobile qui doit passer du repos à quelque degré de vitesse doit passer par les degrés intermédiaires ; selon les commentaires donnés in *Dialogo sopra i due massimi sistemi*, 2 vol., éd. et comm. d'O. Besomi et M. O. Helbing, Padova, Antenore, 1998, vol. II, p. 172, les échanges entre Salviati et Sagredo peuvent être interprétés comme des réponses à Cavalieri.

⁵⁷ Le *De Motu* soutient des positions géocentriques, voir par ex. OG, I, p. 273, et pp. 343-345, commenté in MARIO OTTO HELBING « Mobilità della Terra e riferimenti a Copernico nelle opere dei professori dello Studio di Pisa », in MASSIMO BUCCIANINI et MAURIZIO TORRINI (éds.), *La Diffusione del copernicanesimo in Italia, 1543-1610*, Firenze, Olschki, 1997, p. 64. Les premières déclarations pro-coperniciennes de Galilée se trouvent dans ses lettres à Jacopo Mazzoni du 30 mai 1597, in OG, II, pp. 197-202, et à Johannes Kepler du 4 août 1597, in OG, X, pp. 67-68.

plus de mouvoir vers là où il est impossible de parvenir »⁵⁸.

2) Un corps sur un plan à égale distance du centre des graves restera au repos s'il est au repos et conservera un mouvement de vitesse uniforme s'il est en mouvement :

« le mouvement sur une horizontale qui ne descend ni ne monte est un mouvement circulaire autour du centre : (...), une fois acquis, [le mouvement circulaire] se perpétuera avec une vitesse uniforme »⁵⁹.

Comment, dans ces conditions, des corps intégraux comme les planètes ont-ils pu en venir à acquérir un mouvement circulaire donné ? Ils n'ont pu passer spontanément du repos à un degré de vitesse donné puisque, naturellement, ils se meuvent circulairement, et donc uniformément. Aussi faut-il, pour qu'ils passent du repos à un degré de vitesse donné, une intervention extérieure, en l'occurrence, un mouvement rectiligne. Tout mouvement circulaire uniforme est ainsi tributaire d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré qui l'a précédé et lui a permis d'acquérir le degré de vitesse qui est désormais le sien :

⁵⁸ « (...) se i corpi integrali del mondo devono essere di loro natura mobili, è impossibile che i movimenti loro siano retti, o altri che circolari (...) essendo il moto retto di sua natura infinito, perchè infinita e indeterminata è la linea retta, è impossibile che mobile alcuno abbia da natura principio di muoversi per linea retta, cioè verso dove è impossibile di arrivare, non vi essendo termine prefinito; e la natura, come ben dice Aristotile medesimo, non intraprende a fare quello che non può essere fatto, nè intraprende a muovere dove è impossibile a pervenire » (OG, VII, p. 43, tr. fr. in *Dialogue (op. cit. note 2)*, pp. 55-56). Cette doctrine se trouve déjà dans la lettre à Ingoli de 1624, in OG, VI, pp. 558-559. Pour l'opposition entre mouvement rectiligne, infini et non-naturel, et mouvement circulaire, borné et naturel, voir le *De Motu*, in OG, I, p. 353 : « Ipsius motus naturalis est aliquis terminus : sed motus sursum nullus est terminus : ergo motus sursum non est naturalis. Major manifesta est : natura enim non movet eo, quo numquam pertingere possit ».

⁵⁹ « [...] il moto per la linea orizzontale, che non è declive nè elevata, è moto circolare intorno al centro: adunque il moto circolare (...), bene acquistato che e' si sia, si continuerà egli perpetuamente con velocità uniforme » (OG, VII, p. 53, tr. fr. in *Dialogue (op. cit. note 2)*, p. 64).

« On peut donc raisonnablement dire que la nature, pour donner une vitesse déterminée à un mobile d'abord au repos, se sert du mouvement rectiligne, pendant un certain temps et sur une certaine distance. (...) Le mouvement circulaire ne s'acquerra donc jamais naturellement sans un mouvement rectiligne préalable »⁶⁰.

Ce sont ces considérations qui conduisent Galilée à avancer une curieuse hypothèse sur l'origine des mouvements planétaires, qu'il déclare inspirée par Platon : Dieu aurait créé toutes les planètes au repos ; pour leur donner une vitesse leur permettant d'atteindre le lieu où chacune d'elles devait tourner éternellement d'un mouvement uniforme autour du centre, il les aurait laissé tomber d'un mouvement rectiligne qui s'accélérera continuellement⁶¹. Or Galilée connaît à l'époque la règle de la double distance : le dernier degré de vitesse atteint à la fin d'une descente par le mobile animé d'un mouvement uniformément accéléré, est tel que, s'il continuait à se mouvoir avec ce degré de vitesse d'un mouvement uniforme pendant le même temps qu'a duré la descente, il parcourrait une distance double de la longueur de cette même descente⁶². Il est donc possible, selon Galilée, en connaissant la circonférence de

⁶⁰ « Possiamo dunque ragionevolmente dire che la natura, per conferire in un mobile, prima costituito in quiete, una determinata velocità, si serva del farlo muovere, per alcun tempo e per qualche spazio, di moto retto. (...) Il moto circolare non s'acquisterà mai senza il moto retto precedente » (OG, VII, pp. 44-45 puis p. 53, tr. fr. in *Dialogue* (op. cit. note 2), pp. 56-57, puis p. 64).

⁶¹ OG, VII, pp. 44 sqq. Cette hypothèse cosmogonique est reprise dans les *Discours*, in OG, VIII, p. 83 sqq. Pour des commentaires, voir ALEXANDRE KOYRÉ, « Newton, Galilée, Platon » (1960), in *Études newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968, pp. 243-265.

⁶² OG, VII, p. 52 : « L'impeto, cioè il grado di velocità, che la palla si trova avere acquistato quando arriva al punto A, è tale, che quando ella continuasse di muoversi con questo medesimo grado uniformemente, cioè senza accelerarsi o ritardarsi, in altrettanto tempo in quanto è venuta, per il piano inclinato passerebbe uno spazio lungo il doppio del piano inclinato ».

l'orbite et la période de chaque planète, de déterminer la distance que chacune d'elles a parcouru dans son mouvement de chute en ligne droite et le temps de la chute⁶³.

Les questions du *De Motu* ont donc trouvé une réponse : un mouvement circulaire naturel, qui se fait sur une ligne à distance constante du centre, est bien perpétuel. Il ne peut cependant pas commencer de lui-même : il est engendré par un mouvement rectiligne. À cette réponse, le *Dialogue* ajoute que, si le mouvement circulaire est perpétuel, c'est qu'il est uniforme, son degré de vitesse constant étant déterminé par le temps de chute du mouvement rectiligne uniformément accéléré qui l'a précédé.

Conclusion

Au terme de ce parcours, nous pouvons caractériser les différents textes que nous avons examinés par comparaison les uns avec les autres :

1. Le *De Motu* par rapport aux "précurseurs" de Galilée. Le PFM n'est pas spécifiquement galiléen. Cependant, alors que Cardan, Benedetti et Varron rencontrent ce principe de manière fugitive seulement, dans le *De Motu*, Galilée tente de le démontrer géométriquement. La justification qualitative qu'il en donne aboutira, dans la version longue des *Mécaniques*, à l'idée qu'un corps sur un plan horizontal qui neutralise son poids est indifférent au repos ou au mouvement.
2. Les *Mécaniques* par rapport au *De Motu* et au *Dialogue*. Les *Mécaniques* constituent un ouvrage à part où certains acquis affleurent, sans être systématiquement approfondis pour eux-mêmes. Cet isolement des *Mécaniques* s'explique aisément : il s'agit d'un

⁶³ Les manuscrits de Galilée relatifs à cette hypothèse sont analysés in STILLMAN DRAKE, « Galileo's Platonic Cosmogony », *Journal for the History of Astronomy*, 4, 1973, pp. 174-191, et surtout JOCHEN BÜTTNER, « Galileo's Cosmogony », in MONTESINOS et SOLÍS (eds.), *Largo Campo di Filosofare (op. cit. note 10)*, pp. 391-401.

ouvrage écrit pour des étudiants, qui expose une théorie des machines simples, non une analyse générale du mouvement.

3. Le *De Motu* par rapport au *Dialogue*. Nos analyses montrent qu'il existe entre ces deux textes une continuité thématique, le *De Motu* posant différentes questions que le *Dialogue* viendra réunir et résoudre quarante ans après. Il n'est cependant pas question de cosmologie de la même manière dans l'un et l'autre texte. Dans le *De Motu*, il s'agit d'élaborer une théorie du mouvement suffisamment générale pour se substituer à la théorie aristotélicienne : cette dernière distinguant mouvement naturel et mouvement violent et attribuant aux corps une lourdeur ou une légèreté absolues, on y trouve des énoncés qui ont une portée cosmologique, mais celle-ci est en quelque sorte dérivée. A l'exception de quelques passages témoignant du géocentrisme pisan de Galilée, il n'est en effet pas question de la structure du monde ou de l'ordre des planètes dans le *De Motu*. Le *Dialogue* en revanche s'engage explicitement sur ces questions et ce, de manière copernicienne. C'est pourquoi la perspective grandiose consistant à supposer d'emblée associées la mécanique et la cosmologie nous semble erronée : c'est dans le cadre du copernicianisme que Galilée a réuni des éléments lentement conquis ; la réussite de la synthèse qu'il a proposée dans le *Dialogue* ne doit pas conduire à juger rétroactivement que ces éléments s'appelaient nécessairement les uns les autres⁶⁴.

L'articulation effective du PMF, de la conservation du mouvement acquis et d'un

⁶⁴ L'idée que la découverte du principe d'inertie, ou en tout cas de l'"inertie circulaire", constitue une solution au problème du copernicianisme trouve sa source in WOHLWILL, « Die Entdeckung der Beharrungsgesetzes » (*op. cit.* note 3), pp. 72-82 ; PAUL TANNERY, « Galilée et les principes de la dynamique », *Revue générale des sciences*, 13, 1901, pp. 330-338 ; PAUL PAINLEVÉ, « Les axiomes de la mécanique et le principe de la causalité », *Bulletin de la Société française de philosophie*, tome V, 5^{ème} année, pp. 27-71. KOYRÉ, *Études galiléennes* (*op. cit.* note 3), pp. 161-204 sqq., la leur reprend via MEYERSON, *Identité et réalité* (*op. cit.* note 3), pp. 528-540. Pour des avatars récents, voir MAURICE CLAVELIN, « Le copernicianisme padouan de Galilée », in *Tribute to Galileo in Padua. Atti delle celebrazioni galileiane (1592-1992)*, Trieste, Lint, pp. 149-166 ; MASSIMO BUCCIANTINI, *Galileo e Keplero*, Torino, Einaudi, 2003, pp. 62-66.

engagement cosmologique au sens fort est décisive, mais pas pour autant primitive, dans le corpus galiléen.

Egidio Festa (centre Alexandre Koyré) et Sophie Roux (université de Grenoble II)

Summary : The paper focuses on the principle that a minimal force can move a body on a circular plane, which eventually developed into the Galilean circular inertia, according to which such a body stays either in a state of rest or in a state of uniform circular motion. Cardan, Varron and Benedetti had already defended such a principle; Galileo however 1) gives geometrical demonstrations (*De Motu*), 2) affirms that a body on a circular plane is in a state of indifference towards rest or motion (longer version of *Le Mecanique*). From this state of indifference, it would be logical to deduce circular inertia, but Galileo did not take that step in *Le Mecanique*. In the *De Motu*, he had already asked if a natural circular motion would go on perpetually, but neither answered the question nor linked it to the principle that a minimal force can move a body on a circular plane. Contrary to these earlier writings, the *Dialogo* develops thoroughly the cosmologic and cosmogonic implications of circular inertia.

Keywords : mechanics – circular inertia – motion on horizontal plane – acquisition of motion – conservation of motion – *De Motu* – *Le Mecanique*