

La force de la percussion chez Galilée et Descartes

Gianfranco Mormino

DANS **DIX-SEPTIÈME SIÈCLE** 2009/1 n° 242 , PAGES 45 À 57

ÉDITIONS **PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE**

ISSN 0012-4273

ISBN 9782130572619

DOI 10.3917/dss.091.0045

Date de mise en ligne : 18/02/2009

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://shs.cairn.info/revue-dix-septieme-siecle-2009-1-page-45?lang=fr>



Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...
Scannez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



Distribution électronique Cairn.info pour Presses Universitaires de France.

Vous avez l'autorisation de reproduire cet article dans les limites des conditions d'utilisation de Cairn.info ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Détails et conditions sur cairn.info/copyright.

Sauf dispositions légales contraires, les usages numériques à des fins pédagogiques des présentes ressources sont soumises à l'autorisation de l'Éditeur ou, le cas échéant, de l'organisme de gestion collective habilité à cet effet. Il en est ainsi notamment en France avec le CFC qui est l'organisme agréé en la matière.

La force de la percussion chez Galilée et Descartes

1. LES DEUX PROBLÈMES DU CHOC

Il arrive souvent, dans l'histoire des sciences, qu'un problème dont on n'avait longtemps soupçonné l'importance s'impose tout à coup comme essentiel pour le progrès des connaissances : c'est le cas du choc, qui, après une longue période où il n'a été étudié que sporadiquement, devient aux yeux des nouveaux physiciens, avant la moitié du XVII^e siècle, un modèle dont on ne peut se passer dans l'explication causale des phénomènes. Dans un univers où tout se produit en vertu du mouvement local des parties de la matière, et où il n'y a d'action que par poussée, les lois du choc sont comme la grammaire de base, avec la loi d'inertie et la loi de la chute, de la nouvelle physique mécaniste¹. Entre 1630 et 1680 le choc devient ainsi un des domaines les plus féconds du débat scientifique : Galilée, Beeckman, Marci, Descartes, Torricelli, Fabri, Huygens, Borelli, Wren, Wallis, Pardies, Mariotte, Malebranche, Leibniz s'en occupent avec passion ; après eux, la question sera encore au centre de la querelle sur les forces vives. Une formulation lucide de l'importance des lois du choc se trouve dans les *adversaria* de Huygens ; après avoir corrigé les règles de Descartes et trouvé les lois correctes du choc, le savant hollandais définit le rôle de ses découvertes pour tout programme de recherche dans la « vraie et saine philosophie » :

Si natura universa corpusculis quibusdam constat a quorum motu omnis rerum diversitas oriatur [...], ut probabile esse multi philosophi existimarunt ; non parum adjuvari haec contemplatio videbitur si verae motus leges innotuerint quaque ratione de corporibus in corpora transferatur.²

1. « [Descartes] a montré qu'au-delà de son aspect élémentaire, le choc direct de deux corps constituait en quelque sorte la notion la plus simple et universelle de l'événement physique, à laquelle devaient pouvoir se réduire les phénomènes les plus complexes, dans une philosophie naturelle mécaniste selon laquelle l'intelligibilité des faits procède des seuls concepts de la grandeur, de la figure et du mouvement des corpuscules matériels dans un monde plein, où toute action se fait par contact » (Michel Fichant, « Introduction », dans Gottfried W. Leibniz, *La réforme de la dynamique. Textes inédits*, éd. Michel Fichant, Paris, Vrin, 1994, p. 16).

2. Christiaan Huygens, *De motu corporum*, « Appendice III », dans *Œuvres complètes*, Martinus Nijhoff, La Haye, 1888-1950, XVI, p. 150.

La communication du mouvement entre corps libres se rencontrant dans un espace vide, ou dans un milieu qui ne fait pas de résistance, est donc, dans cette période cruciale, le plus important objet de recherche concernant le phénomène du choc, en raison non seulement de son importance pour la mécanique abstraite mais aussi de ses possibles applications dans l'explication, par exemple, de la lumière ou de la gravité. Considérée de ce point de vue, l'histoire des lois du choc a été faite, au moins partiellement, plusieurs fois³ et on n'entend pas la résumer ici dans peu de pages. Mon propos est plutôt de mettre en relief un autre côté du problème, moins étudié mais non moins intéressant : il s'agit de la question de la « force de la percussion », c'est-à-dire de la mesure de la force exercée par un corps frappant sur un corps qui fait résistance, comme un marteau sur un clou à planter. Ce problème se révéla plus difficile que le premier ; si la question de la communication du mouvement est passible d'un traitement cinématique, voire presque entièrement géométrique (comme le traité de Huygens le montre), où le temps ne joue aucun rôle, l'explication de la force de la percussion implique une évaluation des impulsions qui ne peut pas être le fait de la seule imagination. En effet, la vraie compréhension de l'extraordinaire puissance des forces percussives, qui dérive de la petitesse du déplacement du corps frappé et de la rapidité de la variation de vitesse imprimée, ne sera atteinte qu'avec Newton, tandis que les vraies lois de la communication du mouvement pour des corps libres sont déjà publiées en 1669-1670 par Huygens, Wren et Wallis. Il est curieux de constater que si la question de la force de la percussion, quoique plus difficile à résoudre, est reconnue et étudiée dès l'Antiquité, la question des règles du mouvement n'apparaît que très tard : Leonardo da Vinci semble avoir été un des premiers à avoir fait des expériences là-dessus mais sans en donner aucune théorie accomplie. L'intérêt suscité par le jeu du *billiard* est à l'origine de quelques traitements au XVI^e siècle et au début du XVII^e⁴, mais ce n'est qu'avec Isaac Beeckman, apparemment, que le problème est posé avec méthode, sans doute à cause de la perspective atomiste qui anime les recherches du savant hollandais ; dans des notes datées 1618 il propose, indépendamment de Descartes, des règles touchant les corps dépourvus d'élasticité qui ont été très vraisemblablement une source d'inspiration pour le philosophe français (qui pourtant traitera presque uniquement le choc entre des corps capables de rebondir). Encore en 1639, en ce domaine, il n'y a que quelques généralisations de l'expérience, comme le traité de Marci le montre⁵, sans aucune perspective générale. Galilée, et cela est bien étrange, ne semble pas s'être intéressé à cette question, qui pourtant deviendra bientôt centrale pour quel-

3. Cf. Ernst Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Brockhaus, Leipzig, 1883¹ ; cf. aussi Johannes Mac Lean, *De historische ontwikkeling der stootwetten van Aristoteles tot Huygens*, Academisch proefschrift [...], Amsterdam, 1959. Cette dissertation a le mérite de fournir un tableau soigneux des thèses sur le choc soutenues à partir de la Renaissance ; elle souffre cependant d'une insuffisante attention aux questions épistémologiques concernant le statut de la force mouvante.

4. C'est, par exemple, Marci qui se confronte avec ce problème.

5. *De proportionione motus seu Regula sphygmica ad celeritatem et tarditatem pulsuum ex illius motu ponderibus geometricis librato absque errore metuendam*. Authore Ioanne Marco Marci Phil.^{ac} et Medic.^{ac} Doctore et ordinario Professore eiusdem Medic : facultatis in Universitate Pragensi, physico Reg. Boh., Typis I. Bilinae, Pragae, 1639.

ques-uns de ses disciples et continuateurs, en premier lieu Borelli. Descartes, au contraire, consacre ses études principalement à la question des règles du choc, de sorte que les chemins des deux savants ne se croisent que marginalement. On peut dire, en général, que si Galilée n'a pas compris l'importance, voire l'existence même du problème des lois de la communication du mouvement, Descartes, pour sa part, est demeuré plus lié que le savant pisan aux positions anciennes concernant l'évaluation de la force de la percussion, qu'il croit homogène au poids. On cherchera dans ces pages à éclaircir leurs positions sur cette dernière question, en confrontant les deux traitements galiléens du problème (dans les *Mecaniche* et dans les *Discorsi e dimostrazioni matematiche*) avec les réactions de Descartes, qui eut connaissance du dernier ouvrage avant que des *Mecaniche* et qui, malheureusement, ne put jamais lire la « Giornata aggiunta della forza della percossa » des *Discorsi*, inédite jusqu'à 1718.

La plus importante analyse ancienne de ce problème se trouve dans les *Questions mécaniques* du pseudo-Aristote, où l'auteur inconnu se confronte avec la question du coin, instrument dont la principale énigme à résoudre est la remarquable force déployée dans la pénétration des corps :

Pourquoi, avec un coin même petit, on peut briser des poids lourds et des corps de grande dimension et exercer une considérable pression ?⁶

Étroitement lié à cette question est le problème posé par la grande différence entre l'effet produit par un poids simplement appuyé sur un corps et celui produit par un poids tombant sur le même corps :

Pourquoi, si on pose une grande hache sur une souche de bois et un grand poids sur elle, la hache ne brise pas le bois en manière considérable ; mais si on lève la hache et, avec elle, on frappe le bois, il se brise à moitié, même si la hache qui frappe a un poids beaucoup moindre du poids imposé sur elle et qui fait pression sur elle ?⁷

Dans le deuxième cas, en particulier, il est question de l'augmentation de l'efficacité de l'action produite par un corps frappant en raison de son mouvement ; l'auteur interprète ces phénomènes comme déterminés, d'un côté, par le fait que le coin agit comme un double levier, de l'autre côté, par le fait que le poids du corps frappant est augmenté par la vitesse de chute. Comme écrit Mac Lean, on trouve dans cette deuxième idée la racine de la conviction erronée selon laquelle la force de la percussion est comparable au poids⁸ ; cette conviction aura une grande influence jusqu'à l'âge de Galilée et Descartes, qui sur ce point auront des opinions opposées. Il n'est pas possible ici de se confronter avec les nombreux commentaires aux *Questions mécaniques* ; il suffit de noter que la formulation de l'ouvrage impliqua que l'attention des commentateurs fût dirigée presque exclusivement sur la grande puis-

6. Aristotele [Pseudo-], *Problemi meccanici*, 16, a cura di Maria Elisabetta Bottecchia Dehò, Introduzione, testo greco, traduzione italiana e note, Rubbettino, Soveria Mannelli, 2002, p. 93.

7. *Ibid.*, p. 95.

8. Cf. Johannes Mac Lean, *De historische ontwikkeling der stootwetten van Aristoteles tot Huygens*, Academisch proefschrift [...], Amsterdam, 1959, p. 3, 10.

sance de la percussion (d'où le titre de beaucoup d'ouvrages et chapitres au XVII^e siècle : *de ictus vi, de vi percussiois, la forza della percossa*, etc.), en laissant en arrière-plan la question, non touchée par l'auteur des *Questions*, des changements de vitesse et de direction se produisant dans le choc de deux corps mobiles, c'est-à-dire le problème de la communication du mouvement.

Aucun des commentateurs des *Questions* pseudo-aristotéliennes n'arrive à une systématisation efficace ou à un véritable progrès par rapport aux conclusions anciennes, fondées sur la fausse idée que le poids tombant, à cause de sa vitesse, devient « plus pesant » que le même poids appuyé sur le corps sous-jacent. Il s'agit d'une erreur capitale, que seul Giovanni Alfonso Borelli, en 1667, arrivera à dissiper définitivement dans son *De vi percussiois* ; il montrera que la grandeur qui entre en jeu dans ce phénomène est la *moles corporea*, c'est-à-dire la masse, pas le poids. Au début du XVII^e siècle le problème de la force de la percussion est donc encore irrésolu ; dans ce domaine la contribution de Galilée et de Descartes est importante, quoique non décisive : Galilée, en particulier, semble avoir été le premier à soupçonner l'hétérogénéité entre le poids et la force de la percussion, tandis que Descartes confirme la thèse de l'homogénéité.

Il est intéressant de comparer l'attitude prudente de Galilée avec la grande assurance montrée par Descartes. Dans la dernière journée des *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, à propos de notre question, Salviati dit :

Io vi pensai per alcun tempo in vano, accrescendo sempre la confusione, sin che finalmente, incontrandomi nel nostro Academico [*c'est-à-dire Galilée même*], da esso ricevei doppia consolazione : prima, nel sentire come egli ancora era stato lungo tempo nelle medesime tenebre ; e poi nel dirmi che, dopo l'avervi in vita sua consumate molte migliara di ore specolando e filosofando, ne aveva conseguite alcune cognizioni lontane dai nostri primi concetti, e però nuove e per la novità ammirande.⁹

Et vers la fin de l'ouvrage Sagredo y insiste :

Da diversi ragionamenti auti con amici intrinseci del nostro Accademico ho ritratto, questa materia della forza della percossa essere oscurissima, né di quella sin ora esserne, da chiunque ne ha trattato, penetrato i suoi ricetti, pieni di tenebre ed alieni in tutto e per tutto dalle prime immaginazioni umane.¹⁰

Comme on le sait, les *Discorsi* ne contiennent pas l'étude promise¹¹ : longtemps crue perdue¹², elle ne sera publiée qu'en 1718 par Tommaso Bonaventuri, qui lui

9. Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, in *Opere di Galileo Galilei*, Edizione Nazionale, VIII, p. 292-293.

10. *Ibid.*, VIII, p. 312-313.

11. « Do parola che, spedita che avremo la lettura di questo trattato de i proietti, gli spiegherò tutte quelle fantasie, o voglian dire stravaganze, che de i discorsi dell'Accademico mi son rimaste nella memoria » (*ibid.*, VIII, p. 293) ; et, ensuite : « Differiremo il congresso ad altro tempo più opportuno » (*ibid.*, VIII, p. 312).

12. « Cum autem Galileus postremis suae vitae annis scripsisset, sperabatur post eius mortem in armario secretiori inter alia scripta hanc dissertationem calamo exaratam saltem non omnino completam reperiri debere, sed non sine amicorum tristitia, nec inter schedulas reperta est pagella, quae hoc

donna le titre, inexact, de « Giornata sesta ». En 1638, Mersenne demande à Descartes des observations sur l'ouvrage, que Descartes se procure entre 29 juin¹³ et 23 août¹⁴ : sa réaction, contenue dans son « compte rendu » de l'ouvrage pour Mersenne, est la suivante :

Pour la force de la Percussion, elle n'est point si mal-aisée à expliquer, par mes *Principes*, que Galilée la represente sur la fin de son Livre ; mais ie n'en sçauois rien dire sans expliquer, mes *Principes*, c'est-à-dire mon Monde.¹⁵

En outre, sur la seule proposition prudemment avancée par Galilée dans les *Discorsi*, Descartes exprimera plus tard son désaccord : si Sagredo dit que, entre les conclusions de l'Académicien, il y a l'affirmation que la force de la percussion est « interminata, per non dire infinita »¹⁶, Descartes objecte en 1640 :

Le n'ay point icy ouy parler de l'ingenieur qui fiche des pieux en terre sans fraper ; mais ie ne doute point que cela ne se puisse faire par la force de la presse, qui peut par ce moyen estre comparée avec celle de la percussion ; mais il en faudroit plusieurs diverses experiences, avant qu'on en pust faire des regles generales.¹⁷

Il faut noter aussi que, si Galilée juge son hypothèse « stravagantissima »¹⁸, Descartes, au contraire, se déclare assuré de sa conclusion, sans pourtant en donner aucune preuve.

Quelle est la raison de positions si différentes ? Est-elle fondée, l'assurance de Descartes ? Pour répondre à ces questions, il faut tracer une petite histoire des échecs qui justifient la prudence de Galilée et, en suite, indiquer les raisons sur lesquelles Descartes fonde son opinion.

2. LES MECANICHE DE GALILÉE

Galilée traite pour la première fois la question de la force de la percussion dans ses *Mecaniche*, écrites à Padoue entre 1593 et 1599¹⁹ ; quoiqu'il n'y ait pas de traite-

titolo insigneretur, ut Galilei haeredes mihi retulerunt » (*De vi percussiois liber Io : Alphonsi Borelli in Patria Messanensi pridem, nunc vero in Pisana Academia Matheseos Professoris, Ex typographia Iacobi Montij, Bononiae, 1667, p. *5-*6*).

13. Cf. René Descartes à Marin Mersenne, 29 juin 1638, dans AT, II, p. 194.

14. Cf. René Descartes à Marin Mersenne, 23 août 1638, dans AT, II, p. 336 : « J'ay aussy le livre de Galilée, & j'ay employé deux heures [!] a le feuilleter ; mais i'y trouve si peu de quoy remplir les marges, que ie croy pouvoir mettre en une fort petite lettre tout ce que i'y pourray remarquer ». Le commentaire fut envoyé à Mersenne le 11 octobre 1638.

15. René Descartes à Marin Mersenne, 11 octobre 1638, dans AT, II, p. 393.

16. Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, cit., VIII, p. 313.

17. René Descartes à Marin Mersenne, 11 juin 1640, dans AT, III, p. 81.

18. Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, cit., VIII, p. 313.

19. Sur la datation de l'ouvrage, cf. l'essai de Romano Gatto dans Galileo Galilei, *Le mecaniche*, edizione critica e saggio introduttivo di Romano Gatto, Firenze, Olschki, 2002, p. LVII et sq. Il y a deux versions, une longue et une plus courte, du traité ; la section sur la force de la percussion ne présente pas des différences importantes entre les deux textes mais dans la version courte les exemples sont peut-être plus clairs.

ment spécifique du coin, qui est le contexte habituel pour l'examen du problème, le chapitre final « Della forza della percossa » donne une explication de l'efficacité des instruments dont on fait usage pour planter un clou dans un morceau de bois ou un pieu dans le sol²⁰. Nous sommes donc dans le cadre du deuxième problème pseudo-aristotélécien cité plus haut, bien connu par Galilée, qui concerne l'explication de la grande force exercée par les corps frappants, capables de pénétrer même les matériaux les plus solides, par rapport à la force exercée par la simple pression. Le phénomène, écrit Galilée, est merveilleux et très difficile à expliquer, comme le montre le fait qu'aucune explication n'a encore rendu raison de la multiplication de puissance causée par l'impulsion. Le jeune savant se montre déjà critique de la position traditionnelle : ceux qui comptent expliquer l'efficacité d'un marteau en l'attribuant à la longueur du manche, et ainsi mettant en jeu le rôle du levier, ne tiennent pas en compte que le même effet se produit aussi bien lorsque la percussion est faite avec un instrument sans manche qui tombe d'en haut, par exemple avec ces grandes pierres que l'on emploie pour planter les pieux dans les champs :

Perché ad Aristotile o ad altri che volessero la cagione di questo mirabile effetto ridurre alla lieva o lunghezza del manubrio o manico del martello, parmi che, senza altro lungo discorso, si possa scoprire l'infermità de' lor pensieri dall'effetto di quei strumenti, che non avendo manico, percotono o col cadere da alto a basso, o coll'esser spinti con velocità per traverso.²¹

Galilée compte résoudre la difficulté grâce à un principe très simple, le même qui explique le fonctionnement des autres machines simples :

La forza, la resistenza ed il spazio, per lo quale si fa il moto, si vanno alternamente con tal proporzione seguendo, e con legge tale rispondendo, che resistenza eguale alla forza sarà da essa forza mossa per equal spazio e con equal velocità di quella che si muova. Parimenti, forza che sia la metà meno di una resistenza potrà muoverla, purché si muova essa con doppia velocità, o, vogliam dire, per distanza il doppio maggiore di quella che passerà la resistenza mossa.²²

20. Dans la version courte du traité les instruments simples sont ainsi nommés : « La lieva, l'argano, la taglia, la vite, ed il conio, o la forza della percossa » (Galileo Galilei, *Le mecaniche*, cit., p. 5).

21. *Ibid.*, p. 76. Il faut rappeler qu'au temps de Galilée les *Questions mécaniques* étaient attribuées à Aristote

22. *Ibid.* Nous présentons ici la version de ce passage donnée par Mersenne : « Cet effect vient de la mesme source que les autres effets Mechaniques, à sçavoir que la force, la resistance, & l'espace par lesquels se font les mouvemens ont une telle correspondance & proportion entr'eux que la force respond seulement à une resistance qui luy est égale, & qu'elle la meut seulement par un espace égal, ou d'une égale vistesse, dont elle se meut elle mesme. Semblablement quand la force est moindre de moitié que la resistance, elle la peut mouvoir, si elle mesme se meut d'une double impetuositè, & si elle fait deux fois autant de chemin » (*Les Mechaniques de Galilée, Mathématicien et Ingenieur du Duc de Florence. Avec plusieurs additions rares, & nouvelles, utiles aux Architectes, Ingenieurs, Fonteniers, Philosophes, & Artisans*, traduites de l'italien par L. P. M. M. À Paris, chez Henry Guenon, 1634, p. 70). En effet, précise Bernard Rochot, l'édition eut lieu en 1635 ; et il ne s'agit pas d'une traduction littérale (cf. Bernard Rochot, « Introduction », dans *Les Mechaniques de Galilée, mathématicien & ingénieur de Duc de Florence. Avec plusieurs additions rares, & nouvelles, utiles aux architectes, ingénieurs, fonteniers, philosophes & artisans*, traduites de l'italien par le P. Marin Mersenne, édition critique présentée par Bernard Rochot, Paris, PUF, 1966, p. 5). Mais les erreurs d'interprétation de Mersenne sont nombreuses.

Pour une meilleure compréhension, Galilée ajoute un exemple :

Un martello, il quale, avendo quattro di resistenza, viene mosso da forza tale, che, liberandosi da essa in quel termine dove fa la percossa, anderia lontano, non trovando l'intoppo, dieci passi ; e viene in detto termine opposto un gran trave, la cui resistenza al moto è come quattromila, cioè mille volte maggiore di quella del martello (*ma non però è immobile, sì che senza proporzione superi la resistenza del martello*) : però fatto in esso la percossa, sarà ben spinto avanti, ma per la millesima parte delli dieci passi, ne i quali si saria mosso il martello.²³

Il faut avant tout noter que la « force » du corps frappant est mesurée par la distance que le corps franchirait en absence d'obstacles, multipliée par sa résistance. On peut donc ainsi formuler la loi proposée par Galilée : le produit de la résistance et de la distance que le corps frappant parcourrait s'il était libre est égal au produit de la résistance et de la distance parcourue par le corps frappé. S'il était légitime d'interpréter la résistance comme « masse » et la distance parcourue comme vitesse, la formulation serait exacte ; en effet, on aurait la conservation du produit *mv* : le marteau, avec une résistance de 4 et une vitesse de 10 aurait une quantité de mouvement égale à 40, la même de la poutre qui, avec 4 000 de masse, se mouvrait avec 0,01. Mais une telle traduction de la formule de Galilée ne peut être soutenue qu'en faisant violence au texte et aux intentions du savant, qui ne possède pas la clarté d'une théorie accomplie. Ce qui surprend, et qui suggère que Galilée a peut-être songé à attribuer à la résistance quelque chose qui a confusément affaire avec ce que nous appellerions « masse », est le fait que, si la résistance du marteau augmente, le mouvement imprimé à la poutre augmente aussi ! Il faut en plus noter que la formulation de Galilée implique qu'il n'y a pas de résistance finie qui puisse s'opposer à la percussion ; c'est Mersenne qui donne un bel exemple de cette conclusion tirée de Galilée (mais qui n'est pas insérée dans les *Mecanique*) :

La [...] percussion [...] est si admirable qu'il n'y a point de fardeau si lourd, que l'on ne puisse faire remuer & cheminer avec des coups de marteau, pour petits qu'ils puissent estre, ce que l'on tient que Galilée a expérimenté en frappant si souvent contre un grand coffre avec un marteau d'épinette, qu'il la fait changer de place & la fait avancer d'un pied : ce que plusieurs ne croyront nullement encore qu'ils ne prennent pas la peine d'en faire l'expérience laquelle est tres digne de consideration, car elle peut servir d'un principe pour entrer plus avant dans les secrets de la nature.²⁴

23. Galileo Galilei, *Le mecaniche*, cit., p. 77, mes italiques. Voici la version de Mersenne, très fautive : « En supposant que le marteau qui a 4. degrez de resistance soit poussé d'une telle force que ne trouvant nulle resistance qui l'arreste, il aille iusques à dix pas, & qu'à ce terme on luy oppose une poutre qui ayt 4 000. degrez de resistance & qui soit mille fois plus grande que la force du marteau, *de sorte qu'elle surpasse sans proportion ladite force*, si elle est frappée, elle ira seulement en avant la milliesme partie de dix pas, par lesquels l'on auroit poussé le marteau » (*Les Mechaniques de Galilée*, éd. 1634, p. 72). Le passage que j'ai mis en italiques est un vrai malentendu de Mersenne.

24. Marin Mersenne à Henri de Reffuge, juin 1634, dans *Les Mechaniques de Galilée*, éd. 1634, p. *4-
*5. La lettre se trouve aussi en *Correspondance du P. Marin Mersenne Religieux Minimie*, éd. Cornelis de Waard, Paris, PUF, 1945-..., IV, p. 207-211.

À mon avis, il y a donc déjà dans les *Mecaniche* l'intuition de la nature « infinie » de la force de la percussion²⁵ mais l'évaluation de cette force comme produit de la résistance et de la distance que le marteau franchirait s'il était libre est évidemment erronée ; elle inclut déjà en soi une grandeur, la résistance, qui devrait être exprimée en termes plus simples. Elle ne correspond ni au poids ni à la masse ; et la distance franchie ne correspond pas à la vitesse. Lorsque Galilée juge donc que les « difficoltà ed istanze »²⁶ qui pourraient naître à la fin de son discours seront aisément résolues, il se trompe sans doute.

Les conclusions des *Mecaniche* n'avaient pas satisfait Galilée²⁷, qui continua longtemps à s'occuper de la percussion et parvint enfin à des considérations définitives entre 1638 et 1639. En effet, encore en 1604 il compte pouvoir mesurer le « momento della percossa »²⁸ : il croit évidemment que cette quantité est comparable au poids, comme montré par l'expérience qu'il présente dans la journée « Della forza della percossa ». Mais une lettre de 1634 montre qu'à cette date il a déjà confié aux amis qu'il croit désormais, quoique sans donner la démonstration²⁹, que la force de la percussion est infinie³⁰ ; il s'agit d'une idée nouvelle, qui, en France, n'était peut-être encore arrivée à personne, comme il semblerait en lisant la lettre de Mersenne du 1^{er} mai 1640 :

Denique, cum plumbeum globulum, qualis est pila mosqueti, unico ictu mallei ferrei, in incudem impacti, reducamus ad formam unius denarii aut aurei nummi, quaero quanti ponderis debeat esse malleus alter, ut, simpliciter superpositus absque motu et ictu, eundem globum plumbeum in eandem aurei formam reducat. Quae hactenus, donec aureum illum tractatum in lucem emisericis de vi percussionis, quae a te tandiu expectamus.³¹

L'expérience avec laquelle Galilée entend mesurer la force de la percussion est un développement de celle que Beeckman avait peut-être essayé le premier (quoiqu'il

25. Cf. surtout le passage que j'ai mis en italiques dans la n. 23.

26. Galileo Galilei, *Le mecaniche*, cit., p. 76.

27. Cf. Galileo Galilei à Giovanni Battista Baliani, 1^{er} septembre 1639, dans *Opere di Galileo Galilei*, Edizione Nazionale, XVIII, p. 95.

28. Cf. Galileo Galilei à Guidobaldo Del Monte, 29 novembre 1602, dans *Opere di Galileo Galilei*, Edizione Nazionale, X, p. 100.

29. Galilée parle toujours de sa *presque* entière satisfaction à propos de cette question : cf. Dino Peri à Galileo Galilei, 21 avril 1638, dans *Opere di Galileo Galilei*, Edizione Nazionale, XVII, p. 328.

30. « La proposta di V. S. Ecc.^{mo} circa la percossa è veramente ammirabilissima, e quando sia dimostrata porta seco conseguenze non meno ammirande, tra le quali una pare a me che sarà questa : che qualunque anco lieve percossa haverà forza infinita, perché, proposto qualsivoglia grandissimo peso potremo trovare un tal resistente nel quale una leggier percossa opererà non meno che la premente gravezza del proposto grandissimo peso » (Niccolò Aggiunti à Galileo Galilei, 1^{er} février 1634, dans *Opere di Galileo Galilei*, Edizione Nazionale, XVI, p. 31).

31. Marin Mersenne à Galileo Galilei, 1^{er} mai 1640, dans *Opere di Galileo Galilei*, Edizione Nazionale, XVIII, p. 187. Il est curieux de voir que Descartes doit écrire à Mersenne que son idée que « la vitesse d'un coup de marteau surprend la Nature, en sorte qu'elle n'a pas le loisir de joindre ses forces pour résister, est entièrement contre [son] opinion ; car elle n'a point des forces à joindre, ny besoin de temps pour cela, mais elle agit en tout Mathématiquement » (René Descartes à Marin Mersenne, 11 mars 1640, dans AT, III, p. 37).

soit très peu probable que Galilée en eût connaissance) : le savant hollandais avait proposé en 1618 le cas d'une balance sur laquelle tombent des poids :

Id quod dixi de bilance ad punctum inveniendum, a quo res deorsum cadens, aequaliter perget moveri, non incommodè poterit adhiberi ad aestimandum rei cadentis impetum : tantus enim est, quantum ponderis elevat cadendo supra id quod quiescendo elevat.³²

L'expérience, bien plus compliquée, avec laquelle Galilée entend mesurer la force de la percussion³³ a été soigneusement analysée par Mach, auquel je renvoie le lecteur. L'échec de cette expérience, qui ne permet aucunement d'évaluer le « poids » qui s'ajouterait à une balance lors de la percussion d'un objet sur un de ses plateaux, met en évidence la difficulté du tentatif de soumettre le choc aux mêmes principes qui gouvernent les machines simples. Dans la journée « Della forza della percossa » Galilée oscille entre deux positions : d'un côté, il introduit plusieurs corrections aux lois de la statique afin d'inclure la percussion dans leur domaine³⁴. La proposition avec laquelle il compte couronner toute la matière, en effet, présuppose l'homogénéité entre la force de la percussion et le « poids mort »³⁵. De l'autre côté, il exprime le doute que l'entreprise entière soit impossible, du moment que l'action de la percussion et celle de la pression sont « non proporzionabili »³⁶ ; et c'est en cette direction que vont aussi les expériences du « grand vieux » rapportées par Torricelli dans ses « Lezioni accademiche », où l'on montre qu'un poids mort produit son effet sur un objet sous-jacent une seule fois, tandis que des percussions réitérées, effectuées avec le même instrument et la même vitesse, produisent des nouveaux effets, quoique toujours plus faibles, à l'infini³⁷. Mais cette conclusion négative est suivie par des intéressantes intuitions (qui seront développées par le même Torricelli) sur le rôle joué dans le choc par le temps :

Il cedere di una materia percossa da un grave mosso con qualsivoglia velocità, non si può fare in uno instante, perché altrimenti si darebbe il moto instantaneo per uno spazio quanto, il che si prova impossibile. Se dunque si fa in tempo la cedenza nel luogo della percossa, in tempo ancora si farà l'applicazione di quei momenti acquistati nel moto dal percuziente ; il qual tempo è bastante ad estinguere ed a smorzare in parte quell'aggregato de' sopraddetti momenti.³⁸

32. *Journal tenu par Isaac Beeckman de 1604 à 1634*, publié avec une introduction et des notes par Cornelis de Waard, Martinus Nijhoff, La Haye, 1939-1953, I, p. 268.

33. Cf. Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, cit., VIII, p. 323-325.

34. *Ibid.*, p. 329.

35. *Ibid.*, p. 340.

36. *Ibid.*, p. 343.

37. Cf. *ibid.*, VIII, p. 325-328, et l'extrait de Torricelli, *ibid.*, II, p. 191.

38. Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, cit., VIII, p. 344-345.

La force de la percussion, qui se révèle vraiment « infinie », c'est-à-dire incommensurable au poids, opère donc avec une intensité finie en raison du fait qu'elle produit ses effets dans le temps, étant ainsi consommée par la résistance de l'objet frappé.

3. LA RÉACTION DE DESCARTES

Malgré ses recherches avec Beeckman, Descartes ne s'occupe beaucoup du problème du choc avant la parution des *Discorsi e dimostrazioni* ; dans une lettre de l'été 1632 il communique à Mersenne une expérience qu'il croit très certaine, et sur laquelle il reviendra plusieurs fois :

Un marteau frappant une bale de plomb qui est mise sur une enclume ne l'appatira tant que si elle est mise sur un oreiller.³⁹

La raison, qu'il expliquera plus avant, en est que la force doit durer quelque temps, pour causer un effet plus grand⁴⁰ ; une considération semblable se trouve à la fin de la journée « Della forza della percossa », où Galilée écrit :

L'arco dolce, ma grande, d'una balestra, farà talvolta maggior passata d'un altro assai più duro, ma di minor tratta, poiché quello, accompagnando per più tempo la palla, gli va continuamente imprimendo la forza, e questo tosto l'abbandona.⁴¹

Dans la lettre où il demande à Descartes de lui faire l'honneur d'un petit ouvrage consacré aux fondements de la mécanique, Constantijn Huygens exprime son insatisfaction face aux essais de Guidobaldo Del Monte et de Galilée⁴². En effet, l'ouvrage de jeunesse de Galilée ne fournit aucune fondation nouvelle de la statique et de la mécanique, en se bornant à expliquer une par une les machines les plus communes et en donnant des réponses somme toutes vagues aux questions fondatives

39. René Descartes à Marin Mersenne, été 1632, dans AT, I, p. 259.

40. « Je m'étonne de ce que vous n'aviez pas encore ouy qu'on peut mieux applatir une bale de plomb avec un marteau, sur un Coussin ou sur une Enclume suspenduë & qui peut ceder au coup, que sur une Enclume ferme & immobile ; car c'est une experience fort vulgaire. Et il y en a une infinité de semblables, dans les Mechaniques, qui dépendent toutes du mesme fondement : à sçavoir, ce n'est pas assez, pour platir une bale de plomb, que de la fraper avec beaucoup de force, mais il faut aussi que cette force dure quelque temps, afin que les parties de cette bale ayent loisir cependant de changer de situation. Or quand cette bale est sur une enclume ferme, le marteau rajallit en haut, quasi au mesme instant qu'il l'a frappée, & ainsi n'a pas le loisir de l'aplatir tant que si l'enclume ou autre cors qui soutient cette bale, cedant au coup, fait que le marteau demeure plus long-temps appuyé de contre » (René Descartes à Marin Mersenne, 29 janvier 1640, dans AT, III, p. 9-10).

41. Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, cit., VIII, p. 346.

42. Cf. Constantijn Huygens à René Descartes, 8 septembre 1637, dans AT, I, p. 397.

de ces sciences. Le jugement de Descartes sur les *Mécanique* sera moins tranchant mais non moins sévère :

Pour ce qu'a écrit Galilée touchant la balance & le levier, il explique fort bien *quod ita sit*, mais non pas *cur ita sit*, comme ie fais par mon Principe.⁴³

La référence de Descartes à « son Principe » renvoie à son *Explication des engins* (le petit traité qu'il envoie à Constantijn Huygens avec la lettre du 5 octobre 1637) ou, plus probablement, à l'*Examen de la question sçavoir si un corps pese plus ou moins, estant proche du centre de la Terre qu'en estant esloigné* (connu aussi comme *Examen de la question géostatique*, envoyé à Mersenne avec la lettre du 13 juillet 1638) ; dans ces essais Descartes compte fonder la science de la statique sur le seul principe que

la mesme force qui peut lever un poids, par exemple, de cent livres a la hauteur de deux pieds, en peut aussy lever un de 200 livres, a la hauteur d'un pied, ou un de 400 a la hauteur d'un demi pied, & ainsy des autres, si tant qu'elle luy soit appliquée.⁴⁴

Jean-Pierre Sérís a justement souligné la simplicité de la solution cartésienne, qui fonde toute la science des poids sur un seul principe et exclut toute considération anthropomorphique de la force⁴⁵ ; mais cela ne semble lui donner aucune nouvelle perspective sur la force de la percussion. À propos de l'analyse cartésienne des mécaniques, Baillet nous raconte que Mersenne

en fut si content qu'il luy en récrivit le premier jour d'Août, pour luy dire qu'à son sens il s'étoit surpassé luy-même, et que ce petit traité renfermoit toutes les mécaniques, *excepté la seule force de la percussion*.⁴⁶

Pour comprendre la raison du silence de Descartes il faut rappeler ce qu'il écrit à propos de la notion de force qu'il emploie dans ces petits traités :

J'ay parlé de la force qui sert pour lever un poids à quelque hauteur, *laquelle force a toujours deux dimensions*, & non de celle qui sert en chaque point pour le soutenir, laquelle n'a iamais qu'une dimension, en sorte que ces deux forces different autant l'une de l'autre *qu'une superficie differe d'une ligne*.⁴⁷

En effet, Descartes exclut la vitesse de sa considération de la force dans la statique ; elle comporterait l'introduction d'une troisième dimension et la définition du contexte réel dans lequel son effet se manifeste :

Si j'avois voulu joindre la consideration de la vitesse avec celle de l'espace, il m'eust esté necessaire d'attribuer trois dimensions a la force, au lieu que ie luy en ay

43. René Descartes à Marin Mersenne, 15 novembre 1638, dans AT, II, p. 433.

44. René Descartes, *Explication des engins par l'aide desquels on peut avec une petite force lever un fardeau fort pesant*, dans AT, I, p. 435-436.

45. Jean-Pierre Sérís, *Machine et communication. Du théâtre des machines à la mécanique industrielle*, Paris, Vrin, 1987, p. 211 et sq.

46. Cf. AT, II, p. 287-288 ; mes italiques.

47. René Descartes à Marin Mersenne, 12 septembre 1638, dans AT, II, p. 352-353.

attribué seulement deux, affin de l'exclure [...]. Car il est impossible de rien dire de bon & de solide touchant la vitesse, sans avoir expliqué au vray ce que c'est que la pesanteur, & ensemble tout le systeme du monde.⁴⁸

Quoique donc Descartes exprime avec précision la formule mv au moins dès 1639⁴⁹, il ne l'emploie pas dans l'évaluation de la force de la percussion ; comme cela a déjà été plusieurs fois souligné⁵⁰ il n'y a pas, chez Descartes, cette identification de la quantité de mouvement et de la force, dont Leibniz lui fera le reproche. La percussion, phénomène dynamique où on ne peut évidemment pas se passer de la considération de la vitesse, n'est donc pas susceptible d'une évaluation exacte :

Je ne puis dire combien il faut de pesanteur pour égaler la force d'un coup de marteau ; car c'est une question de fait, où le raisonnement ne sert de rien sans l'expérience.⁵¹

Descartes distingue donc entre une question de fait, qu'il a raison de définir comme trop compliquée pour être soumise à un traitement mathématique, et une question abstraite, sur laquelle sa réponse aux observations de Christophe de Villiers peut nous éclairer. Dans une lettre à Mersenne, le médecin de Sens avait soutenu l'impossibilité d'obtenir avec un poids le même effet causé par la force de percussion. Parmi les raisons qu'il apportait, il y avait la perspicace considération qu'un marteau tombant sur un objet lui imprime une force percussive,

ce que ne peut faire le poids f mis sur d , ce poids estant toujours au commencement de son mouvement ou descente, auquel temps de commencement tous les poids tombans ne font tant d'efect, fussent ils de millions de fois plus pesants que le marteau poussé ou le belier tombant, estant vray ce que vous dites que, tant plus grande est la vitesse de la main qui frape, et plus grand en est l'effect.⁵²

Descartes, à qui Mersenne avait demandé un avis sur une opinion qui lui paraissait fausse, observe un peu trop hâtivement que

pour la force de la percussion, il est certain qu'elle peut estre égalée par la pesanteur [...] car il est certain qu'un corps, ainsi appuyé sur un autre, ne pese pas moins, pour estre appuyé sur luy. Et l'exemple que vous donnez, de la presse dont on marque les pistoles, est fort à propos : car on peut aisement calculer par son moyen, de combien de livre pesant devroit estre le poids qui, estant appuyé sur une pistole sans percussion, seroit suffisant pour la marquer, & ainsi égaler la force du coup de marteau qui la peut aussi marquer.⁵³

48. *Ibid.*, II, p. 354-355.

49. Cf. René Descartes à Florimond de Beaune, 30 avril 1639, dans AT, II, p. 543-544.

50. Je me limite à renvoyer à Michel Fichant, « Introduction », dans Gottfried W. Leibniz, *La réforme de la dynamique. Textes inédits*, cit., p. 16-19, et à la bibliographie là donnée.

51. René Descartes à Marin Mersenne, 11 mars 1640, dans AT, III, p. 34-35.

52. Christophe de Villiers à Marin Mersenne, 4 octobre 1640, dans AT, III, p. 218.

53. René Descartes à Marin Mersenne, 28 octobre 1640, dans AT, III, p. 212.

En effet, pour Descartes la question dépend de l'attribution aux corps pesants d'une vitesse initiale, qui leur vient de la vitesse de la matière subtile qui les pousse vers le centre de la Terre⁵⁴. Et c'est précisément de l'existence de cette vitesse, contestée par Villiers (et par Galilée), que dérive la possibilité de comparer l'effet du poids et celui de la percussion :

La force de la percussion ne dépend que de la vitesse du mouvement [...]. Car il faut sçavoir, quoy que Galilée & quelques autres dient au contraire, que les corps qui commencent à descendre ou à se mouvoir, en quelque façon que ce soit, ne passent point par tous les degrez de tardiveté, mais que dès le 1^{er} moment ilz ont certaine vitesse, qui s'augmente après de beaucoup ; & c'est de cette augmentation que vient la force de la percussion.⁵⁵

La force de la percussion, prise dans un contexte systémique, se révèle donc aux yeux de Descartes comme un cas particulier de mouvement accéléré comparable à celui de la chute, tandis que Galilée en fait une grandeur soumise à de règles propres, que pourtant il n'arrive pas à déterminer. Dans un cas comme dans l'autre, donc, l'énigme demeure irrésolue. Il fallait, pour en venir à bout, une distinction claire entre le poids et la masse, et la définition newtonienne de la force.

Gianfranco MORMINO,
Università degli Studi di Milano.

54. « Je viens de revoir mes Notes sur Galilée, où ie n'ay veritablement pas dit que les cors qui descendent ne passent par tous les degrez de tardiveté ; mais i'ay dit que cela ne se peut determiner sans sçavoir ce que c'est que la Pesanteur, ce qui signifie le mesme. Pour vostre instance du Plan Incliné, elle prouve bien que toute vitesse est divisible à l'infy, ce que i'accorde ; mais non pas que, lors qu'un cors commence à descendre, il passe par toutes ces divisions. Et quand on frappe une boule avec un mail, ie ne croy pas que vous pensiez que cette boule, au commencement qu'elle se meut, aille moins viste que le mail ; ny enfin que tous les cors qui sont poussez par d'autres, manquent à se mouvoir, dès le premier moment, d'une vitesse proportionnée à celle des cors qui les meuvent. Or est-il que, selon moy, la Pesanteur n'est autre chose sinon que les cors terrestres sont poussez reellement vers le Centre de la Terre par la Matière subtile, d'où vous voyez aisément la conclusion » (René Descartes à Marin Mersenne, 29 janvier 1640, dans AT, III, p. 9-10).

55. René Descartes à Marin Mersenne, 25 décembre 1639, dans AT, II, p. 630.