

**Du rajeunissement de la mécanique chez
Ernst Mach**
**Présentation de la traduction de deux articles de
1867/68**

*Jacques Lambert
Alexandre Métraux*

C'est en 1867 qu'Ernst Mach soumet le très court article « sur la définition de la masse » aux revues scientifiques avec des succès divers. Lorsqu'il rédige ce texte, il vit à Prague depuis quelques mois seulement où il enseigne comme professeur de physique expérimentale à l'Université de cette ville, après avoir été en charge de l'enseignement des mathématiques à l'Université de Graz depuis 1864. Dans un fragment inédit à caractère autobiographique, Mach écrira en 1913 que les années passées à Prague lui permirent de travailler très librement (et enfin sans soucis financiers) en dépit de troubles politiques et sociaux qui ne manquèrent pas d'affecter la vie universitaire.¹⁸

L'article sur la notion de masse intéresse l'historien-philosophe des sciences à plus d'un titre. Son premier mérite est de faire resurgir des problèmes encore préoccupants et spécialement aigus autour des années 1860... Mais l'intérêt va au-delà par le traitement qu'en donne son auteur, faisant aisément passer des problèmes spécifiques d'une discipline au statut toujours particulier à des questions d'ordre plus épistémologique. Et au-delà encore, à des prises de position proprement philosophiques qui

Philosophia Scientiæ, 7 (2), 2003, 93–103.

18. Cf. l'article de Herneck [1991] qui présente une analyse succincte de ce fragment autobiographique et en communique plusieurs extraits.

engagent des opinions ou convictions métaphysiques. Ce dernier point est d'autant plus précieux que lorsqu'il rédige ces cinq pages, Mach a manifestement abandonné la philosophie mécaniste qui inspirait encore son œuvre la plus importante publiée jusqu'alors, le *Compendium der Physik für Mediciner* [cf. Mach 1863]. Il est facile de voir dans certaines attitudes du savant au moins autant que dans les énoncés des définitions et dans les propositions expérimentales présentées par lui ici, une certaine anticipation de la méthode et des formules qui seront exposées quinze années plus tard dans la *Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* [cf. Mach 1883] — et cela d'autant plus qu'il réutilise ce texte en l'intégrant, sans y apporter de modification, dans l'ouvrage sur le principe de la conservation du travail (c'est-à-dire de l'énergie) [cf. Mach 1872] et, avec plusieurs amendements, dans la volumineuse monographie consacrée à la mécanique.

La grande idée de ce texte, la question de la définition de la masse, va immédiatement faire apparaître à la fois la question du statut même d'une science mécanique parfois expérimentale, parfois formelle, et, derrière elle, celui de la réalité physique et de son possible ou nécessaire traitement scientifique. Ce dernier point transparait sous la forme de la nature et des fonctions des hypothèses et dans la nécessité d'une distinction nette entre ce qui relève de l'hypothèse, ce qui est tiré de l'expérience, et ce qui se présente comme une condition *a priori*.

Il ne fait aucun doute que la conception ici visée est celle de la masse telle qu'elle est admise ou justifiée dans la tradition newtonienne. Celle-ci y est en effet envisagée et définie comme une *quantitas materiae*. C'est d'ailleurs de cette expression ainsi que de celle de corps (*corpus*) qu'use le plus souvent Newton lui-même plutôt que du mot « masse ». La définition de la quantité de matière (« *Quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex densitate et magnitudine conjunctim* » [Newton 1687, 1]¹) montre la primordialité qui était reconnue à ce concept, puisque c'est elle qui ouvrait la série des définitions et des principes du fameux livre premier des *Principia*. Si la prudence « prépositiviste » de Newton apparaît bien dans la définition d'une entité physique en termes de « mesures sensibles », il est néanmoins évident que cette notion de quantité de matière, déjà bien présente chez Boyle, engage la mécanique dans une voie généralement suivie jusqu'au XIX^e siècle. En proposant un ensemble organique de *Définitions* et d'*Énoncés expérimentaux* (ce qu'on retrouvera sous forme modifiée dans la *Mécanique*), Mach semble s'attaquer frontalement à cette tradition. Nous n'avons plus affaire à des principes

1. « La quantité de matière se mesure par la densité et le volume pris ensemble. » [Newton 1759, 1]

premiers dans lesquels figurent des notions primitives préalablement définies. Tout au contraire, les définitions suivent des énoncés expérimentaux et cette dérivation leur confère deux caractères entièrement nouveaux, celui de la conventionalité et celui de la révisabilité.

Ainsi, pour s'en tenir pour l'instant à la critique de la tradition newtonienne, il y aurait lieu de noter trois aspects de la question : le choix de la masse comme concept premier ; la définition de la masse comme un simple coefficient numérique ; l'origine exclusivement expérimentale de nos connaissances.

La masse, concept premier

Toute l'histoire de la mécanique montre la tendance à réduire à un minimum le nombre des « notions primitives » à partir desquelles on pourrait dériver les autres. Il en va de même en ce qui concerne les principes. Il apparaît que le principe de l'inertie ne peut suffire et les théoriciens de la mécanique ont proposé tour à tour des combinaisons de trois ou quatre principes premiers ou axiomes dans lesquels figuraient les concepts premiers. Si la masse occupe une place de choix dès la mise en place de la mécanique classique, il est aussi vrai que, les concepts se définissant les uns par rapport aux autres, il est toujours possible de modifier l'ordre de leur dérivation. Avant même les critiques des adversaires de la force ou celles des énergétistes, qui allaient opposer les écoles de mécanique, quelques années après la publication de cet article, la question de savoir quels concepts et quels principes sont « réellement » premiers, sans être aiguë, n'était pas moins posée. Bien sûr, l'essentiel de la réponse de Mach est qu'il n'y a aucun sens à se demander ce qui est « réellement » premier. Ce qui est premier n'est pas un concept ni un principe, mais l'expérience. Néanmoins le concept de masse tient la place (*Vertretung*), pourrait-on dire, d'un concept premier. Plusieurs raisons conduisent Mach à faire ce choix. Déjà avant le programme exposé par Gustav Robert Kirchhoff dans ses cours de mécanique [cf. Kirchhoff 1876] et surtout avant la parution de l'ouvrage de Heinrich Hertz sur les principes de la mécanique [cf. Hertz 1894], la primordialité du concept de force était contestée par des physiciens. Des motifs d'ordre philosophique largement développés par la suite par le physicien viennois sont sans doute déjà bien présents en 1867. Le positiviste a plusieurs raisons de refuser à la force la première place. Elle apparaît comme une projection anthropomorphique dans le monde extérieur de l'expérience intime du mouvement volontaire. Elle est immédiatement associée à la notion de cause (du mouvement) que Mach entend précisément combattre. Dans

la *Mécanique* l'aspect économique apparaîtra sans doute plus clairement qu'ici, mais il s'agit bien par des considérations expérimentales sur les masses de dériver des définitions fonctionnelles et de trouver une base à des principes fondamentaux (comme l'inertie) tout en faisant l'économie d'autres comme celui d'action-réaction. Ce dernier ne ferait que redire ce qui est déjà compris dans la nouvelle définition de la masse.

La masse entendue comme simple grandeur

La nouvelle définition de la masse tient pour l'essentiel dans le fait qu'elle ne fait plus appel à la représentation d'une entité isolée mais ne peut reposer que sur le phénomène fondamental de la dépendance réciproque. Cette manière nouvelle d'envisager contient en elle la négation de toute forme métaphysique de substance, de cause, d'absolu, autant que l'idée d'une mesurabilité de la masse par une approche expérimentale, que le remplacement du point de vue causal par un point de vue fonctionnel, que la définition enfin de la masse comme un coefficient numérique. Il est exact que tous les représentants de la tradition newtonienne ne cherchaient pas à légitimer la primauté de la masse entendue comme une quantité de matière donnée. Dans son projet d'édifier une grande Mécanique rationnelle et formalisée, Lénard Euler par exemple, tout en acceptant à la base la *vis inertiae* newtonienne, tendait à faire de la masse un coefficient numérique, expression du rapport entre la force et l'accélération. C'est dans le fond cette idée radicalisée qui guide Mach dans l'argumentation de cet article. On notera les expressions dont il se sert — il n'est question que de « valeurs » et de « mesure » de la masse. Le « prépositivisme », dont il était question plus haut avec les « mesures sensibles » de Newton, fait place à présent au rejet de la masse comme entité physique, c'est-à-dire comme une réalité matérielle et « indépendante » qui aurait de la sorte quelque chose d'absolu. Elle ne peut figurer dans les définitions d'une exposition scientifique de la mécanique qu'à titre de coefficient numérique. La raison de cette distinction radicale opérée au sein d'un même concept tient au fait que dans l'exposition scientifique, c'est-à-dire, formalisée, abstraite et quantifiée, ne peuvent figurer que des relations et des systèmes de relations. En cela Mach est le continuateur d'Adhémar-Jean-Claude Barré de Saint-Venant qui avait développé, une quinzaine d'années plus tôt, des idées assez semblables dans ses *Principes de mécanique fondés sur la cinématique* [Barré de Saint-Venant 1851]. Ce dernier proposait une définition *cinématique* de la masse comme l'expression du rapport de deux nombres exprimant eux-mêmes combien de fois un corps et un autre corps choisi arbitrai-

rement et constamment le même, contiennent de parties qui, séparées et heurtées deux à deux l'une contre l'autre, se communiquent, par le choc, des vitesses opposées égales. Cela signifie que si deux corps qui se heurtent avec des vitesses égales s'éloignent l'un de l'autre avec des vitesses égales, ils ont alors des masses égales. En fait, c'est la prise en considération des vitesses respectives avant et après le choc qui permet de dire que deux masses sont égales lorsque les accroissements de leurs vitesses sont égaux. On a :

$$m_2 : m_1 = dv_1 : dv_2 \quad \text{puisque} \quad m_1 dv_1 = m_2 dv_2.$$

En proposant une définition « cinématique » de la masse, Mach imagine deux masses qui interagissent mais qui ne sont soumises à aucune autre action. Les lecteurs de la *Mécanique* auront présent à l'esprit le texte de l'*Appendice* dans lequel le physicien revient sur cette abstraction en insistant sur la différence entre la mécanique et la physique : Il n'existe pas de phénomène purement mécanique. La conception mécanique est une abstraction qui présente l'avantage d'une plus grande facilité d'examen. L'opinion selon laquelle elle constituerait la base de tout l'édifice de la physique n'est plus qu'un préjugé. Le texte de 1867 n'énonce pas les choses aussi abruptement et Mach n'entrevoit pas encore que les analogies qu'il note entre différentes sphères de phénomènes comme la mécanique et l'électricité devraient permettre la constitution de ce qu'il nommera une « physique comparée » appelée à faire l'économie de la théorie des atomes. Mais le raisonnement « cinématique » qui est à la base du texte est bien présent avec le « problème de la transitivité » et l'abstraction extraordinaire de toute considération d'ordre physique (magnétique, électrique, thermique) dans l'examen des masses interagissantes deux à deux. Ce problème peut s'énoncer de la façon suivante : deux masses *A* et *B* sont-elles égales si chacune d'elles est égale séparément à une troisième *C* ? Naturellement la réponse affirmative ne pourra être apportée que par la démonstration de l'impossibilité de la négative. C'est le tribut que doit payer toute philosophie de l'expérience. Toujours est-il que la masse, définie d'abord comme un rapport, à l'opposé de la présentation newtonienne, n'est plus définie comme une entité physique indépendante, substantielle, mais comme un simple coefficient numérique. Paradoxalement, cette thèse est le résultat d'une démarche strictement expérimentale.² L'attitude de Mach a été parfaitement résumée par lui-même par la suite dans un passage que nous reproduisons :

2. Nous communiquons l'expérience de pensée homologue telle que Mach l'a présentée dans la *Mécanique* : « L'hypothèse que l'ordre dans lequel les corps ont été rangés pour la détermination des valeurs de leurs masses a une influence sur ces valeurs est, comme nous allons le voir, en contradiction avec l'expérience. Considérons par

Quand je m'efforce d'éliminer tous les éléments métaphysiques dans les exposés relatifs aux sciences de la nature, je ne veux pas dire par là que toutes les représentations sous forme d'images doivent disparaître, à partir du moment où elles sont utiles et dans la mesure où elles sont perçues comme de simples images. La critique métaphysique est encore moins dirigée contre les fondements qui se sont révélés précieux. On peut par exemple exprimer de sérieux doutes sur la notion métaphysique de < matière > sans avoir besoin pour autant d'éliminer le concept utile de < masse >. Au contraire, on peut la définir un peu à la manière que j'ai employée dans la *Mécanique*, d'autant plus qu'on a compris qu'elle ne signifie que le résultat d'une équation. [Mach 1900, 363]

L'origine strictement expérimentale des concepts

Nous avons noté le renversement total opéré par Mach dans la présentation des principes de la mécanique. Ils sont devenus des *Propositions expérimentales* ou des *Énoncés expérimentaux* précédant toute définition et montrant ainsi l'origine expérimentale des principes mêmes, c'est-à-dire de toute la connaissance. Il est inutile d'insister sur deux points qu'on se bornera à rappeler. On pense bien que la thèse de l'origine empirique de toute la connaissance n'était pas admise par tout le monde en 1867!³ Mais l'autre fait est peut-être plus important. C'est que le principal avantage des principes tient à ce qu'on les admet pour ne plus avoir en s'en occuper. La mécanique après tout avait nécessairement recours à des énoncés dépassant l'expérience, et toute tentative pour les justifier et les fonder avait souvent passé pour une tentative oiseuse, soyons méchants : philosophique, qui ne permettrait pas de faire avancer la science mais, au contraire, ne pouvait que l'égarer. On trouve naturellement dans l'histoire de la mécanique des discussions parfois vives et

exemple trois corps élastiques A , B , C , mobiles sur un anneau fixe parfaitement poli. Supposons que A et B se comportent mutuellement comme étant de même masse, de même que B et C . Nous devons admettre sous peine de contradiction avec l'expérience que A et C aussi se comportent mutuellement comme ayant des masses égales. Si l'on communique à A une vitesse quelconque, il la transmet par le choc à B et celui-ci la transmet à C . Si C se comportait envers A comme une masse plus grande, A prendrait par le choc une vitesse plus grande que sa vitesse première, tandis que C conserverait un restant de vitesse. Chaque tour effectué dans le sens des aiguilles d'une montre augmenterait la force vive du système. Si C se comportait envers A comme une masse moindre, il suffirait de changer le sens du mouvement pour arriver au même résultat. Or un tel accroissement de force vive est en complète contradiction avec nos expériences. » [Mach 1987, 214]

3. Qu'on songe à l'approche teintée de kantisme (ou de néo-kantisme) de Helmholtz...

toujours passionnantes sur la nécessité ou la contingence des principes, sur la clarté ou l'obscurité de certaines notions ou représentations (par exemple les critiques adressées par Poincaré à Lagrange et sa mécanique analytique). Mais la méthode de Mach, car il s'agit bien d'une méthode à présent, renverse ici encore la tradition. La méthode expérimentale exige en effet que l'on soumette tout au critère de l'expérience. Tous les principes doivent pouvoir être fondés sur l'expérience. C'est le sens des démonstrations expérimentales développées ici. Les principes les plus fondamentaux, comme le principe d'inertie, sont en effet « inclus » dans les propositions expérimentales. Bien évidemment la question se pose pour le principe de raison suffisante ou principe de causalité qui présente un caractère d'*a priori* ou de conditionnalité qui va bien en deçà des principes de la mécanique puisqu'il concerne la possibilité même de penser l'expérience. C'est pourquoi Mach insiste sur le caractère plausible de ce principe dont il démontre l'importance par celle de ses résultats les plus spectaculaires et les plus récents. En bon empiriste, au lieu d'admettre une quelconque et obscure nécessité métaphysique, il insiste sur le rôle suffisant de l'habitude. Quant au scénario expérimental des trois corps sur l'anneau rigide, qui sera repris dans la 5^e section du chapitre II de la *Mécanique*, il démontre *a contrario* par la contradiction flagrante de ses conséquences avec l'expérience le *fait* que le rapport des masses est le rapport inverse des accélérations pris avec le signe moins. Comme le soulignera Mach, il ne se trouve ainsi dans le concept de masse aucune théorie et la « quantité de matière » est totalement inutile. L'accroissement supposé et conséquent de la force vive dans cette expérience n'est pas en contradiction avec un principe, mais avec nos « expériences ». Tel apparaît le renversement qui justifiera celui qu'offre la nouvelle présentation, rigoureusement scientifique, du concept de masse.

Ce renversement, on le voit, va bien au delà d'une présentation formelle plus satisfaisante d'un concept fondamental de la mécanique. Il est l'application d'une méthode qui soumet tout au critère de l'expérience et dont les principales conséquences ou les principaux corollaires sont les suivants : le refus de tout *a priori* qui, loin de simplifier et d'éclaircir, complique inutilement et obscurcit en donnant de mauvaises habitudes à l'esprit ; la substitution avantageuse et plus conforme à l'enseignement de l'expérience, d'une conception fonctionnelle à la vieille et néfaste conception causale ; la nature révisable de toutes nos connaissances excepté les « habitudes » bien établies dont on conçoit difficilement l'avantage qu'apporterait leur abandon ou leur contradiction ; l'idéal scientifique d'une pure et stricte *description* des *faits*.

On comprend que les néopositivistes viennois comme Rudolf Carnap

[1926] aient repris les analyses de Mach pour en donner un traitement formalisé en termes de relations logiques (transitivité, symétrie, asymétrie). N'y avait-il pas déjà dans ces analyses tous les ingrédients du positivisme développé par la suite ? Mach lui-même d'ailleurs ne s'y est pas trompé. Qu'on lise la Préface de 1903 à sa *Mechanik*. La froideur et même la fraîcheur manifestées par le monde savant à la parution problématique de cet article ne cédèrent à l'intérêt, et à une certaine reconnaissance pour certains, qu'après la publication des *Vorlesungen* de Kirchhoff six ou sept ans plus tard. L'autorité du physicien berlinois contribua sans aucun doute à mieux faire apprécier, et éventuellement accepter, la reprise, amplement développée il est vrai, de ces thèses dans la *Mechanik* de 1883. Mais le dépit du viennois pouvait en être plus grand. Non seulement l'idéal, présenté dès la première page du tome premier des *Vorlesungen* et consacré à la mécanique, d'une pure *Beschreibung* avait déjà été clairement exposé par Mach, mais la méthode historique-critique était autrement plus radicale.

C'est qu'il y avait aussi, *derrière* (un mot que Mach n'apprécierait pas !) ou plutôt *à la racine* de cette exposition critique, une idée donnée comme un fait d'expérience, qui prend toute sa valeur dans une philosophie moniste : celle d'une *dépendance réciproque* comme un fait *primitif*.

Une mécanique sensible ?

Dans une certaine mesure, le brevissime texte sur la « sensibilisation » d'énoncés de la mécanique peut être lu et apprécié comme un post-scriptum à quelques réflexions développées dans l'article sur la définition de la notion de masse. En effet, ce post-scriptum entraîne le lecteur dans un espace où quelques uns des principes de la mécanique établis en toute rigueur sont soumis à une démonstration matérielle. On pourrait objecter qu'il n'y a là rien de bien extraordinaire. Tout titulaire d'une chaire de physique autour de 1870 se devait d'être maître dans l'art de la démonstration, quitte à charger un subalterne de la mise en scène « démonstrative » qui était censée apporter devant les auditeurs la preuve d'un théorème par l'exemple ou dont le but était de faciliter la compréhension d'un phénomène complexe.

Mais ce n'est pas ce souci didactique que Mach partage avec ses collègues qui retient l'attention ici. Le titre même — titre presque intraduisible vu qu'il comporte un néologisme — résume tout un programme. Le mot inventé (ou qui a l'air d'avoir été inventé) par Mach, *Versinnlichung*, dénote le processus par lequel une chose est rendue sensible, est

amenée à être reçue par les appareils sensoriels. Or, la chose ainsi aménagée afin qu'elle excite la surface réceptrice de l'organisme pensant (de l'auditeur, du témoin, etc.) n'est autre que telle ou telle proposition de la mécanique qui véhicule des notions abstraites et qui énonce des faits généraux. La *Versinnlichung* est donc conçue comme l'aboutissement de la recherche par la mise en évidence matérielle d'un *exemplum* : c'est par une « sensibilisation », par une démarche de matérialisation que le travail analytique et théorique du physicien retourne à son point de départ sensoriel.

Comme le montre le passage de la *Wärmelehre* cité plus haut, Mach n'a rien trouvé à redire contre l'utilisation d'images et, *a fortiori*, contre l'emploi de dispositifs expérimentaux « démonstratifs ». Le petit article paru en 1868 en fournit la double illustration. D'une part, les deux figures auxquelles renvoie la prose un peu rapide de Mach s'avèrent être un complément sémantique utile. C'est elles qui rendent compréhensible la description des appareils dont le physicien s'est servi pour se conformer à son propre impératif méthodologique selon lequel il n'y a que l'expérience qui puisse confirmer ou infirmer telle ou telle proposition.

D'autre part, chaque figure est le représentant iconique d'un appareil qui ne peut pas circuler à la façon de son image. C'est donc l'image qui permet de reproduire (à quelques détails près) l'espace dans lequel l'analyse du centre d'inertie et du principe de la conservation des surfaces prend naissance et auquel elle retourne en fin de parcours.

Un examen exhaustif du rôle de l'image dans l'oeuvre de Mach dépasserait de loin le cadre de cette présentation. Esquissons donc très brièvement une distinction importante qu'il est nécessaire d'introduire dans la masse de données iconiques chez Mach. Les images-illustrations (telles les figures reproduites dans les textes présentés ici) revêtent le rôle de compléments sémantiques (voir plus haut). Les images produites en laboratoire à l'aide d'appareils photographiques — ce qui a notamment été le cas dans les nombreuses recherches ballistiques du physicien —, par contre, ne sont pas des illustrations complétant un morceau de prose scientifique, mais des traces de processus qui, sous forme d'informations iconiques, rendent palpables et identifiables des phénomènes épistémiquement intéressants [cf. Hoffmann & Berz 2001 et Hoffmann 2002].

On peut en conclure que le champ perceptif primordial n'est plus, chez Mach, cantonné au seul organisme humain. Tout ce qui réagit « sensiblement » à un objet physique fait donc partie intégrante de l'*Erfahrung* dont il est question dans l'article sur la définition de la notion de masse.

Les deux articles que nous avons traduits pour ce numéro de *Philosophia Scientiae* ont paru dans le volume 4 de la revue *Repertorium für Experimental-Physik, für physikalische Technik, mathematische & astronomische Instrumentenkunde. Herausgegeben von Dr. Ph. Carl, Professor für Physik an den Kgl. Bayer. Militär-Bildungs-Anstalten und Inhaber einer physikalischen Anstalt in München* en 1868.

- (a) De la définition de la masse = Über die Definition der Masse, p. 355-359.
- (b) De la manière de rendre sensibles quelques énoncés de la mécanique = Über die Versinnlichung einiger Sätze der Mechanik, p. 359-361.

Les notes des traducteurs sont indiquées par des chiffres. Afin d'éviter certaines ambiguïtés, nous avons placé quelques termes de la publication originale ainsi que certains mots facilitant la lecture entre crochets []. La pagination originale est indiquée entre crochets [].

Les traducteurs ont profité de l'apport apprécié de plusieurs membres de l' « Académie Helmholtz » qui a analysé le texte sur la notion de masse à l'occasion de deux réunions de travail. Nos remerciements vont à Claude Debru, André Coret, Gerhard Heinzmann, Michel Meulders et Philippe Nabonnand. Il va de soi que nous demeurons les seuls responsables des défauts de la traduction.

Bibliographie

BARRÉ DE SAINT-VENANT, ADHÈMAR

1851 *Principes de mécanique fondés sur la cinématique*, Paris : Bachelier, 1851.

CARNAP, RUDOLF

1926 *Physikalische Begriffsbildung*, Karlsruhe : Braun, 1926. (= vol. 39 de la collection « Wissen und Wirken »).

HERNECK, FRIEDRICH

1991 Über eine unveröffentlichte Selbstbiographie Ernst Machs, in [Dieter Hoffmann & Hubert Laitko (dir.), 1991, *Ernst Mach. Studien und Dokumente zu Leben und Werk*, Berlin : Deutscher Verlag der Wissenschaften, 107-140.]

HERTZ, HEINRICH

1894 *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt*, avec une préface de Hermann v. Helmholtz, Leipzig : J. A. Barth, 1894.

HOFFMANN, CHRISTOPH

2002 Die Dauer eines Moments. Zu Ernst Machs und Peter Salchers ballistisch-fotografischen Versuchen von 1886/87, in [Peter Geimer (dir.), 2002, *Ordnungen der Sichtbarkeit. Fotografie in Wissenschaft, Kunst und Technologie*, Francfort : Suhrkamp, 342-377.]

HOFFMANN, CHRISTOPH & BERZ, PETER (DIR.)

2001 *Über Schall. Ernst Mach und Peter Salchers Geschloßfotografien. Dokumente und Kommentare*, Göttingen : Wallstein, 2001.

KIRCHHOFF, GUSTAV ROBERT

1876 *Vorlesungen über mathematische Physik*, vol. 1 : *Mechanik*, Leipzig : Teubner, 1876.

MACH, ERNST

1863 *Compendium der Physik für Mediciner*, Vienne : Braumüller, 1863.

1872 *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, Prag : Calve, 1872.

1883 *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig : Brockhaus, 1883.

1900 *Die Prinzipien der Wärmelehre historisch-kritisch entwickelt*, 2^e éd., Leipzig : J. A. Barth, 1900.

1987 [1904] *La Mécanique, exposé historique et critique de son développement*, ouvrage traduit, sur la 4^e édition allemande, par Émile Bertrand, avec une introduction d'Émile Picard, Sceaux : Editions Jacques Gabay [réimpression de l'édition de 1904, Paris : Librairie scientifique A. Hermann].

NEWTON, ISAAC

1687 *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres : Joseph Streater, 1687.

1759 *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, [traduits] par feu Madame la Marquise du Châtelet, t. 1^{er}, Paris : Desaint & Saillant / Lambert, 1759.