



Dictionnaire des Philosophes

Encyclopædia
Universalis

Albin Michel

1998

Préface d'André Comte-Sponville

MACH ERNST (1838-1916)

Physicien préoccupé en même temps de la critique historique des concepts physiques et des phénomènes de psychophysio-physiologie des sensations, Mach a fourni une œuvre scientifique importante à la jonction de plusieurs disciplines, mais souvent mal perçue de ses contemporains en raison de sa diversité. Il a, suivant l'expression d'Einstein, « ébranlé la foi dogmatique » dans le mécanisme, ouvrant la voie aux révolutions de la physique du xx^e siècle. Ce « promeneur sans préjugés, muni d'idées originales dans plusieurs champs de la connaissance », ainsi qu'il se définissait lui-même, ne se voulait pas philosophe. Il a pourtant développé une philosophie de la connaissance empiriste critique et positiviste, proposant une réduction phénoménaliste aux éléments de sensation – seule réalité à ses yeux –, prônant l'exigence d'unité de la science et

le rejet de toute métaphysique dans les énoncés de celle-ci. Celui qu'Einstein qualifia de « déplorable philosophe », tout en appréciant « la grandeur de son scepticisme et de son indépendance incorruptibles », eut une influence considérable, notamment sur le cercle de Vienne et sur l'école de Copenhague de la mécanique quantique.



Un Herr Professor dans l'Empire des Habsbourg

Ernst Mach est né le 18 février 1838 à Chirlitz-Turas, près de Brno, en Moravie, dans une famille cultivée, ouverte à l'éveil des nationalités. Il sera lui-même d'idées libérales, adhérant au groupe socialiste viennois de la Fabian Society (le *Wiener Fabier Gesellschaft*). Son père, Johann, installé en 1840 dans une ferme près de Vienne, s'occupa personnellement de son éducation jusqu'à sa quatorzième année. Enfant sensible, le jeune Ernst ne supportait pas la manière autoritaire d'enseigner certaines disciplines à l'école où il fit, à l'âge de dix ans, une expérience manquée : on le disait peu doué pour les études. En 1853, à 15 ans, il entra au *gymnasium* (lycée), et deux ans plus tard à l'université de Vienne, où il étudia les mathématiques, la physique et la philosophie, et soutint une thèse de doctorat en 1860 sur les phénomènes électriques de décharges et d'induction. *Privatdozent*, il effectua ensuite des recherches sur la mécanique des systèmes vibrants et sur les propriétés des fluides, tout en enseignant la physique aux étudiants de médecine et en donnant des conférences. Il partageait alors sans réserve les conceptions mécanistes (atomisme et théorie cinétique des gaz) dont il

devait peu après s'écarter jusqu'à les rejeter. Il s'intéressait de plus en plus à la physiologie et à la psychologie des sensations ainsi qu'à la psychophysique (étude des phénomènes relatifs à la vue, à l'audition, à la pression du sang). Il poursuivit ses recherches dans cette direction à l'université de Graz, où il fut nommé professeur en 1864, puis à Prague, où il demeura de 1867 à 1895.

Sa production scientifique, durant cette période, est partagée entre les recherches expérimentales en psychophysologie des sensations et en physique (optique, propagation des ondes), et les problèmes théoriques de la mécanique et de la thermodynamique, notamment en ce qui concerne la critique de leurs concepts. Celle-ci le conduisit à effectuer des études historiques sur la conservation de l'énergie, sur la mécanique et la thermodynamique ; il développa une épistémologie psychophysique et une philosophie de la connaissance de type positiviste, fondée sur l'observation, qu'il développa dans plusieurs ouvrages. Il publia également des manuels de physique, très utilisés en leur temps, et des conférences scientifiques populaires.

De 1882 à 1884, il fut recteur de l'académie de Prague, et en 1895 fut nommé professeur de philosophie, à la chaire d'« histoire et de théorie des sciences inductives », à l'université de Vienne. Une attaque, en 1897, le laissa quelque temps paralysé du côté droit ; il prit sa retraite en 1901 et fut nommé la même année à la Haute Chambre du parlement autrichien. Il ne cessa pas pour autant de travailler, écrivant d'importants ouvrages, dont *Erkenntnis und Irrtum* (1905) et ses *Principien der Physikalischen Optik* qui ne devaient être édités qu'après sa mort, le 19 février 1916.

Contributions en physiologie et psychologie des sensations

Expérimentateur de talent, finançant parfois lui-même ses propres recherches, Mach s'intéressa très tôt à la psychophysologie des sensations, sans doute sous l'influence des physiologistes réputés qui se trouvaient à Vienne vers les années 1860 ; son adhésion au courant antivitaliste, qui favorisait le développement de la biophysique, lui fit considérer que la physique et la physiologie sont sur un même plan.

Parmi les travaux de Mach sur les sensations, il convient de mentionner tout d'abord, outre des recherches sur la physiologie de l'ouïe, sa découverte du rôle des canaux semi-circulaires du labyrinthe de l'oreille interne dans la perception du mouvement. Utilisant un dispositif de chaises en rotation, il montra que nous ne percevons que l'accélération et la décélération, et non les vitesses stationnaires ou l'état de repos ; il attribua cette sensation au mouvement dû à l'inertie du liquide contenu dans les canaux semi-circulaires. Cette explication, proposée indépendamment par deux autres chercheurs, constitue la théorie de Mach-Breuer-Brown, et est encore considérée de nos jours comme correcte dans son principe.

Étudiant la perception visuelle par ses propres observations oculaires, il mit en évidence le phénomène des *bandes de Mach*, concernant l'augmentation sensorielle des effets de contraste aux régions frontières entre des zones d'inégal éclairage par rapport à la distribution physique de luminosité. Cette augmentation apparente résulte d'une interdépendance des cônes et bâtonnets du réseau sensoriel rétinien. L'importance de cette découverte ne fut reconnue qu'en 1928 ; depuis 1950,

les bandes de Mach ont fait l'objet d'études systématiques.

Il faut encore citer l'étude de la différence entre l'espace de la perception et l'espace géométrique. Le second se rapporte aux positions relatives des objets alors que le premier, de nature biologique, concerne la localisation des objets par rapport à notre propre corps et n'est pas métrique : d'où les apparentes anomalies du premier par rapport au second, ou les diversités dans la manière dont on perçoit les symétries (par exemple, l'appareil de vision étant symétrique verticalement, nous avons une perception plus exacte de la symétrie verticale que dans d'autres directions).

Ces travaux, et les conceptions plus générales que Mach en tira dans *L'Analyse des sensations*, préparent, par la mise en œuvre d'une conception organique ou « holiste » de l'organisation des systèmes sensoriels, certains aspects de la *Gestalttheorie* en psychologie, dont Mach apparaît comme un des précurseurs.

Expériences en optique et sur la propagation des ondes

Les recherches de Mach sur la propagation des ondes et sur la dynamique des gaz ont un lien avec ses travaux de psychophysologie : il les aborda comme portant sur des faits perceptibles à l'œil humain, et il s'efforça, pour visualiser les phénomènes aérodynamiques, de dépasser l'emploi de plaques enduites de suie en mettant au point une technique expérimentale raffinée (interféromètre de Mach-Zehnder élaboré avec son fils Ludwig).

S'intéressant aux effets mécaniques des étincelles dans une décharge électrique, il mit en évidence des phénomènes d'onde de choc, qu'il étudia ensuite dans le cas de projectiles et de jets de gaz à haute

pression. L'onde de choc correspond à un changement brusque des paramètres physiques – densité, pression, température... – sur le front de la perturbation. Au contraire de l'onde acoustique, c'est une onde non linéaire, et Mach étudia, par visualisation, sa figure de réflexion irrégulière (effet Mach ou réflexion de Mach). Il réalisa ces travaux de 1873 à 1893. À partir de 1886, il effectua des recherches en balistique, au cours desquelles il découvrit les phénomènes supersoniques, interprétant comme des effets d'onde de choc les résultats d'expériences effectuées sur sa suggestion par Salcher à Fiume (l'actuelle Rijeka). Il montra l'importance du rapport ω/v (dénommé en 1929 *nombre de Mach*) de la vitesse ω du projectile à celle, v , du son, et détermina l'angle α entre l'enveloppe du cône gazeux et la direction de propagation en fonction du rapport v/ω : $\sin \alpha = v/\omega$, si $\omega > v$. Les découvertes de Mach dans le domaine de l'aérodynamique supersonique se sont avérées extrêmement fécondes ultérieurement, et les aérodynamiciens utilisent encore des appareils optiques basés sur ceux mis au point par Mach.

Critique des concepts physiques et philosophie de la connaissance

La critique des concepts physiques

Dès son premier livre sur l'histoire du principe de la conservation de l'énergie, Mach critiqua la notion d'atomes dans laquelle il refusa toujours de voir autre chose qu'une hypothèse auxiliaire, même après leur mise en évidence expérimentale. Ce refus est lié à sa conception de la science – un empirisme critique, qui ne reconnaît que les notions reliées directement à l'observation et aux expériences des sens et rejette toute absolutisation de concepts, entachée à ses yeux de dogma-

tisme et relevant de la métaphysique. À la différence des énergétistes comme Wilhelm Ostwald, il considérait que l'énergie elle-même n'est qu'un concept comme les autres, quoique puissant. Il refusa les conceptions de Boltzmann ramenant les lois de la thermodynamique à une mécanique statistique des atomes et des molécules, et en particulier la traduction de l'entropie en termes mécaniques : les racines du deuxième principe étaient plus profondes à ses yeux.

Sa critique des concepts physiques fut plus féconde dans le domaine de la mécanique. L'ouvrage qui porte ce titre, souvent réédité, propose une réflexion critique acérée des concepts et des fondements historiques de cette science qui paraissait si bien ancrée dans la raison même, depuis Newton et Kant, qu'elle était généralement considérée comme devant être la base des autres. Il « secoua cette foi dogmatique », selon le témoignage d'Einstein, sur qui l'ouvrage exerça une grande influence à l'époque où il était étudiant (« ce livre me fit une impression profonde et durable dans la mesure où il était orienté vers les lois et les concepts fondamentaux », lettre à Carl Seelig, 8 avril 1952). Mach effectuait, en effet, une critique vigoureuse des conceptions absolues de la mécanique newtonienne (temps, espace, mouvement) en les rapportant à la possibilité d'une observation expérimentale. « Pour moi, écrivait-il, il n'y a que des mouvements relatifs. » Il fit aussi une critique de la définition newtonienne de la masse comme quantité de matière, et proposa d'en donner une définition de convention, celle d'une constante proportionnelle à l'accélération.

Inatisfait de la définition classique des systèmes d'inertie, basée sur des propriétés absolues de l'espace et du temps, il proposa

que les propriétés d'inertie des corps résultent de leur interaction avec les objets environnants, et notamment avec les très grandes masses réparties dans l'Univers à de grandes distances (étoiles fixes). (Il en résulterait, en particulier, l'absence d'inertie dans un Univers vide.) Einstein dénommera cette proposition « principe de Mach » : utile dans la conceptualisation initiale de la relativité générale, puisqu'il conduisit Einstein à s'interroger sur le principe d'équivalence (des masses inertielle et gravitationnelle), il ne semble pas réellement compatible avec cette théorie, et le concept même de champ apparaît contraire à la réalisation du programme de Mach. Le principe de Mach a donné lieu, en tout cas, à une littérature abondante : selon certains, notamment John A. Wheeler, il serait possible de le retenir comme une condition aux limites des équations du champ de gravitation.

Mach se désolidarisa en 1913 (préface aux *Principes de l'Optique*, publiée seulement en 1921) de la relativité, sous sa forme restreinte ainsi que de la première approche sous sa forme générale, qui lui paraissait de caractère dogmatique.

Dans ses investigations critiques, Mach a trouvé et exprimé la nécessité de recourir à l'étude historique des sciences retournant aux travaux originaux, pour renverser les préjugés ou les dogmes en quoi se cristallisent les découvertes et propositions scientifiques, qui sont en réalité dans une grande mesure conventionnelles et accidentelles, et par là toujours susceptibles d'être révisées.

L'univers des sensations comme seule réalité

Les travaux de Mach en physiologie et psychologie des sensations ont orienté de façon décisive ses conceptions épistémolo-

logiques, en le conduisant à privilégier, dans le processus de connaissance scientifique, le rôle de l'observation et des sensations. Dans *L'Analyse des sensations*, il exprime l'exigence d'abolir toute séparation entre le physique et le mental, l'objet et le sujet, fondée à ses yeux sur un dualisme cartésien qu'il critique, en proposant un monisme psychophysique. Aucune science – et la physique n'a pas de rôle privilégié – ne peut servir de fondations pour les autres ; l'observation psychologique et l'observation physique, chacune de son côté, dans l'étude de la physiologie des sensations, pourront se développer jusqu'à entrer en contact ; il en résultera « une science qui, embrassant à la fois l'organique et l'inorganique, interprétera les faits communs à ces deux disciplines ». Toutes les propositions empiriques se ramènent à des propositions sur les sensations : c'est donc à ces dernières seules que la science doit se rapporter. « Les sensations, écrit Mach dans *La Connaissance et l'erreur*, étant à la fois physiques et mentales, elles constituent la base de toute expérience mentale. » « C'est des sensations et de leurs connexions que naissent les concepts, dont le but est de nous mener, par la voie la plus courte et la plus facile, à des idées sensibles qui s'accordent au mieux avec des sensations. L'intellection part ainsi toujours des perceptions sensibles et y retourne. » Contre Kant, Mach pensait que « c'est seulement l'analyse psychophysique positive qui peut déterminer ce qui est inné », et il refusait de même de parler de « chose en soi ». Ce n'est pas ce que nous appelons « les choses (les objets, les corps), mais bien les couleurs, les tons, les pressions, les espaces, les durées (ce que nous appelons d'habitude les sensations), qui sont les véritables éléments du monde »

(*La Mécanique*). S'il y a une réalité, pour Mach, elle réside dans de tels éléments (terme qu'il préférerait, pour sa neutralité, à *sensations*). L'idée même de la réalité du monde extérieur se dissout, puisqu'il n'y a plus, dans les éléments, de distinction nette entre intérieur et extérieur. C'est pour des raisons corrélatives qu'il refusait la causalité, qui lui paraissait purement subjective, pour lui substituer les idées de fonction et d'organicité des phénomènes.

La philosophie de la connaissance de Mach

Mach écrivait, dans la préface à *L'Analyse des sensations* : « La même considération sous-tend mes écrits d'épistémologie de la physique et mes recherches en physiologie des sensations, celle que l'on doit éliminer tout élément métaphysique comme superflu et contraire à l'économie de la science. »

C'est autour de cette exigence centrale que Mach a développé une philosophie de la connaissance. S'il a néanmoins répété ne pas revendiquer le titre de philosophe, c'est précisément en réaction contre la philosophie spéculative allemande, car, disait-il, « le pays du transcendantal m'est fermé » (*La Connaissance et l'erreur*). Mais il savait bien que la science et la philosophie ne sont pas étrangères l'une à l'autre, et qu'elles poursuivent un même but ; leurs frontières se déplacent, et c'est précisément sur cette ligne que Mach se tient ; il est philosophe des sciences au même titre que Duhem et Poincaré, ses contemporains, avec lesquels il se retrouvait d'ailleurs souvent en accord bien qu'il fût avant tout héritier de la tradition empiriste de Berkeley, Hume et Mill. « Je n'ai pas voulu introduire une nouvelle philosophie dans la science, mais la libérer d'une philosophie vieille et dépassée » (*ibid.*). Il

voyait son entreprise comme celle d'une « clarification philosophique de la méthodologie scientifique ».

Outre le refus de la métaphysique, l'idée d'unité de la science est décisive dans ses choix : ce qu'il recherchait, dès *L'Analyse des sensations*, c'est un point de vue que l'on ne doit pas abandonner dès que l'on passe d'une science à une autre, « car toutes les sciences forment ultimement un tout ». La diversité des disciplines scientifiques est d'origine purement contingente et accidentelle. (C'est pourquoi, recherchant la seule base possible de la science, Mach la trouve dans les éléments des complexes de sensations. Par ailleurs, la réunification des sciences se fera sous le signe d'une phénoménologie mathématique, en raison du caractère exemplaire des mathématiques par rapport à l'économie de pensée.)

Les conceptions philosophiques de Mach, exposées de façon élaborée dans *La Connaissance et l'Erreur*, ont été développées en contrepoint à ses analyses épistémologiques. Celles-ci l'ont conduit à « écarter les faux problèmes qui entravent la recherche scientifique », en ne proposant à celle-ci qu'une règle négative. Le scientifique ne connaît en effet aucun principe intangible, il sait que même les conceptions qui lui paraissent les plus fondées et les plus sûres ne sont que provisoires et peuvent être modifiées si l'expérience l'exige.

La connaissance et l'erreur relèvent de processus mentaux identiques, et Mach avait bien conscience qu'il fallait quelque chose de plus que l'observation sensorielle pour choisir entre elles et poser des jugements scientifiques. Car il ne niait pas la nécessité de la théorie, même si celle-ci n'est que provisoire et si, de toute façon, selon lui, l'on doit n'y employer que des

propositions d'où l'on puisse déduire des énoncés sur des phénomènes observables. Certes, les concepts sont des entités mentales, ils n'existent pas comme tels, mais, contre le nominalisme, Mach affirmait qu'ils sont autre chose que des mots : ils sont stables et riches de contenu parce qu'ils sont chargés d'histoire et d'expérience. L'abstraction est décisive, dans la recherche, et procède d'une sorte d'intuition à partir des faits ; mais les concepts sont distincts des faits, et modifiables. C'est, par ailleurs, le concept qui fait la science dans sa spécificité, au contraire de l'art qui est essentiellement dirigé vers les sens (*La Connaissance et l'Erreur*). Quant aux lois scientifiques, elles sont purement descriptives (elles sont l'expression économique d'un ensemble de faits), faites à notre usage : « dans la nature il n'existe pas de loi de la réfraction, mais seulement de multiples cas de ce phénomène » (*La Mécanique*).

Dans son *Histoire du principe de la conservation de l'énergie*, Mach écrivait déjà : « l'objet de la science est la connexion des phénomènes ; mais les théories sont comme des feuilles mortes qui tombent quand elles ont cessé depuis longtemps d'être les poumons de l'arbre de la science ». Faute de tomber, elles se cristallisent en mythologies (telles les hypothèses atomiques) et ne font que succéder à ces autres « exubérances de l'imagination » qu'étaient les croyances animistes. Dans le cours du développement historique, des conceptions s'imposent, qui vont ensuite se voir affirmées philosophiquement, sur un mode dogmatique, alors qu'elles sont contingentes : la critique épistémologique doit les détruire alors impitoyablement.

Ce qui permet de départager la connaissance et l'erreur, c'est le processus de

sélection, d'essais par succès et échecs, de manière analogue à ce qui se passe, selon la théorie de l'évolution, pour les organismes vivants. (Formé déjà dans sa jeunesse aux idées de Lamarck, Mach a été très tôt influencé par les conceptions de Darwin.) « La connaissance, écrit-il, est invariablement une expérience de l'esprit qui nous est directement ou indirectement favorable. » L'observation et la théorie trouvent même leur expression en termes d'adaptation : la première est l'adaptation des pensées aux faits, la seconde l'adaptation mutuelle des pensées. Cette dernière opère par un processus d'épargne et d'économie qui, au-delà de la seule consistance logique, correspond à une nécessité biologique (*La Connaissance et l'erreur*). Et les lois de la nature ne sont dès lors pas autre chose que des restrictions sur nos prédictions, imposées par l'expérience : cette définition marque bien leur importance biologique.

L'idée d'« économie de pensée » (*Denk-kökonomie*) est fondamentale dans la pensée de Mach. « Un savoir digne de ce nom, écrivait-il dans *La Mécanique*, ne peut être acquis que par la plus grande économie mentale. » Il ajoutait : « La science elle-même peut donc être considérée comme un problème de minimum, qui consiste à exposer les faits aussi parfaitement que possible avec la moindre dépense intellectuelle. » C'est à ce titre que les mathématiques, qui sont une « économie des nombres », sont exemplaires. Notons ici que Mach admettait, contrairement à beaucoup de ses contemporains, l'intérêt des études sur les géométries d'espaces à dimensions multiples, les propriétés de l'espace n'étant pas établies a priori, mais étant seulement des objets d'expérience. Il précisait que ces conceptions « doivent rester étrangères à toute question de réalité actuelle » (*La Mécanique*).

Les conceptions épistémologiques et philosophiques de Mach eurent une grande influence dans des directions variées. Sur Hertz et sur Einstein, par sa critique de la mécanique, sur William James, dont il appréciait le pragmatisme, sur Russell, Moore, Pierce, mais également sur les empirio-criticistes qui se réclamaient de son programme de réduction aux éléments de sensation, et en particulier sur les marxistes autrichiens et russes qui, avec Friedrich Adler et Bogdanov voulaient mettre le marxisme à jour vis-à-vis des sciences contemporaines, et qui encoururent les sévères critiques de Lénine. La pensée psycho-physique de Mach, son refus de toute séparation entre le sujet et l'objet, et la référence première donnée à l'observation ont par ailleurs imprégné les conceptions des protagonistes de l'école de Copenhague dans le développement et l'interprétation de la mécanique quantique. Mais son influence la plus notable a sans doute été celle exercée sur les fondateurs du cercle de Vienne – d'ailleurs baptisé au début *Société Ernst Mach* –, Schlick, Neurath, Frank, Carnap : leur programme était explicitement de développer les effets que la pensée de Mach aurait dû avoir, notamment quant à l'unification de la science et à l'élimination de la métaphysique.

MICHEL PAÏD

Bibliographie

• Œuvres d'Ernst Mach

Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit, Prague, 1872, 2^e éd. 1909 (*History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*, trad. angl. P. E. B. Jourdain, Open Court Chicago, 1911) ; *Die Mechanik in ihrer Entwicklung Historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig, 1883, nombreuses rééd. de 1888 à 1933 (*La Mécanique, exposé historique et critique de son développement*, trad. de la 4^e éd. allem. É. Bertrand, Hermann, Paris, 1904 rééd. fac-sim., J. Gabay, Paris, 1987) ; *Beiträge zur*

Analyse der Empfindungen, Iéna, 1886, 2^e éd. rev. et augm. : *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, Iéna, 1900 (*Contributions to the Analysis of the Sensations*, trad. de la 1^{re} éd. C. M. Williams, Open Court, 1897 : *The Analysis of Sensations and the Relations of the Physical to the Psychological*, nouv. trad. C. M. Williams, rev. et augm., de la 5^e éd. S. Waterlow, Open Court, 1914, rééd. Dover, New York, 1959) : *Populärwissenschaftliche Vorlesungen*, Leipzig, 1896, rééd. augm. jusqu'à 1923 (*Popular Scientific Lectures*, trad. I. J. McCormack, Open Court, 1895, rééd. augm. jusqu'à 1898, nouv. éd. 1985) : *Die Principien der Wärmelehre. Historisch-kritisch entwickelt*, Leipzig, 1896, rééd. 1923 (*Principles of the Theory of Heat, Historically and Critically Elucidated*, B. McGuinness éd., Reidel, Dordrecht, 1987) : *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, Barth, Leipzig, 1905, rééd. jusqu'en 1926 (*La Connaissance et l'Erreur*, trad. M. Dufour, Flammarion, Paris, 1908, *Knowledge and Error, Sketches on the Psychology of Enquiry*, trad. de la 5^e éd. allem. P. Foulkes et I. J. McCormack, Reidel, 1976) : *Space and Geometry in the Light of Physiological, Psychological and Physical Enquiry*, repr. d'après *The Monist*, Open Court, 1906, rééd. 1960 ; *Kultur und Mechanik*, Stuttgart, 1915 ; *Die Principien der physikalischen Optik, historisch und erkenntnis-psychologisch entwickelt*, Leipzig, 1921 (*The Principles of Physical Optics. An Historical and Philosophical Treatment*, trad. J. S. Anderson et A. F. A. Young, Methuen, Londres, 1926, Dover, New York, 1953).

• Études

J. J. BLACKMORE, *Ernst Mach, His Work, Life and Influence*, Univ. Calif. Press, Berkeley, 1972 / J. J. BLACKMORE dir., *Ernst Mach. A Deeper Look : Documents and New Perspectives*, Kluwer, Dordrecht, 1992 / R. BOUVIER, *La Pensée d'Ernst Mach*, Société générale d'imprimerie, Paris, 1923 / J. BRADY, *Mach's Philosophy of Science*, Londres, 1971 / F. VON BRENTANO, *Bemerkungen zu Ernst Mach « Erkenntnis und Irrtum »*, *Studien zur Österreichischen Philosophie*, vol. VI, Amsterdam, 1970 / R. S. COHEN & R. J. SEEGER dir., *Ernst Mach Physicist and Philosopher*, Kluwer, 1975 / R. HALLER & I. STADLER dir., *Ernst Mach : Werk und Wirkung*, Holder-Pilcher-Tempsky, Vienne, 1988 / D. HOFFMANN & H. LAITKO dir., *Ernst Mach : Studien und Dokumente zu Leben und Werk*, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1991 / L. KOLAKOVSKI, *The Alienation of Reason. A History of Positivist Thought*, trad. du polonais N. Guterman, Doubleday, New York, 1968 / V. I. LÉNINE, *Matérialisme et empiriocriticisme* (1909), trad. du russe, éd. en langues étrangères, Pékin, 1975 / R. VON MISES,

Positivism. A Study in Human Understanding, trad. de l'alle. J. Bernstein et R. G. Newton, Harvard Univ. Press, Cambridge (Mass.), 1951, rééd. Dover, New York, 1968 / R. MUSH, *Beitrag zur Beurteilung der Lehren Machs und Studien zur Technik und Psychotechnik* (dissertation inaugurale en philosophie, Berlin, 1908), rééd. Rowohlt, Reinbeck bei Hamburg, 1980 / V. PROSSER & J. FOLTA dir., *Ernst Mach and the Development of Physics*, Universitas Carolina Pragensis, Prague, 1991 / J. THIELE, « Ernst Mach Bibliographie », in *Centaurus*, n° 8, pp. 139-237, 1963 / C. B. WEINBERG, *Mach's Empirio-pragmatism in Physical Science*, New York, 1937 / G. WOLTERS, *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie*, de Gruyter, Berlin, 1987.