

PHILOSOPHIA SCIENTIÆ

JAN SEBESTIK

**Mach et Duhem : épistémologie et
histoire des sciences**

Philosophia Scientiæ, tome 3, n° 2 (1998-1999), p. 121-140

http://www.numdam.org/item?id=PHSC_1998-1999__3_2_121_0

© Éditions Kimé, 1998-1999, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Philosophia Scientiæ* » (<http://poincare.univ-nancy2.fr/PhilosophiaScientiæ/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

Mach et Duhem : épistémologie et histoire des sciences

Jan Sebestik

Institut d'Histoire des Sciences, Université Paris I

Résumé. : La comparaison entre Mach et Duhem revèlent bon nombre de thèses communes. Les deux confinent la physique aux phénomènes ; les deux la séparent rigoureusement de la métaphysique ; les deux refusent de faire appel aux atomes et autres entités inobservables et rejettent la « mythologie mécaniste » ; l'un et l'autre insistent enfin sur la nécessité des études historiques pour atteindre une connaissance complète des notions et des lois physiques et pour ébranler le dogmatisme aprioriste et métaphysique. De plus, Duhem a fait sienne l'idée de la science comme économie de pensée. Cependant, si Mach rejette toute métaphysique, Duhem admet sa légitimité.

Abstract. : The comparison between Mach and Duhem reveals important common ideas. Both confined physics to the realms of phenomena. Both separated it from metaphysics. Both refused non-observable entities and the "mechanist mythology". Both insisted on the necessity of a historical study of science which alone yields the understanding of physical notions and laws and prevents dogmatism. Moreover, Duhem adopted Mach's idea of science as economy of thought. They differ in their conception of metaphysics : while Mach rejected it in the name of phenomenism, Duhem considered it as a discipline in its full rights.

1. De Prague à Vienne

Tant que je ne fournisse pas des preuves de mes paroles, ajouta mon ami, on peut douter de tout ce que j'ai dit. Pour l'instant, chacun doit admettre qu'au cas où quelqu'un puisse faire le voyage d'environ cinq billions milles d'une étoile de douzième grandeur jusqu'à notre Terre avec une acuité visuelle artificiellement augmentée, il pourrait dans un court laps de temps voir les événements de toute l'histoire de l'humanité en commençant par le premier homme [...] Aucun des événements survenus sur notre Terre n'a disparu, chacun se reflète dans l'infinité de l'univers. [...]

Le premier événement que nous devons voir est arrivé il y a cent dix-neuf jours. Si donc nous voulons revoir cette image comme elle se reflète dans l'infinité de l'univers, nous devons d'abord refaire le trajet parcouru par la lumière cent dix-neuf jours durant ; c'est seulement après que nous nous trouverons au point d'où il est possible de regarder cette image – pour un instant.

Si nous voulons observer cet événement plus longtemps, nous devons voler plus loin avec la vitesse de la lumière. Dans quelques secondes, je vais régler l'appareil de sorte que nous nous trouverons soudainement quelques 431 851 millions de milles de la Terre. [...]

Je demande à mon ami : «Comment cela se fait que je ne vois plus rien ?»

Nous sommes arrivés à la distance de la Terre où la lumière est parvenue en 119 jours. De la distance 431 851 millions de milles, tu vois maintenant le paysage dans lequel s'est déroulé cet événement il y a 119 jours, et c'était la nuit. [...]

L'image devient progressivement claire. Je vois des ombres obscures non seulement sur les routes, mais encore dans les champs et les prés. Dans quelques secondes, je reconnais l'image, comme si je contemplais un paysage du soir – je vois le champ de bataille après la bataille. Le spectacle change, comme si je regardais le panorama d'une bataille ; mais non depuis le début, à partir du moment où la bataille commence, mais au contraire de la fin des combats jusqu'à leur commencement.

«Je maintiens que je viens de voir l'image de la bataille près de Königsgrätz». – « Tu as deviné », telle est sa réponse.

«Plus loin !» m'écriai-je, et d'un coup d'œil, la situation changea. J'ai vu de nouveau des images de guerre, celles de la révolution polonaise et de la guerre de Schleswig-Hollstein. Suivaient la bataille terrible près de Puebla et les images de l'invasion française au Mexique et toute une série de batailles de la guerre civile nord-américaine. [...]

« A quelle distance de la terre sommes-nous ? » – « A peu près 46 billions de milles », répond mon ami. Immédiatement après, j'ai vu les images de la révolution de juillet à Paris, la conquête d'Erevan par Paskévitch et la bataille sanglante de Missolunghi. [...] Suivaient des images terribles de la Grande révolution française, de la rébellion de Varsovie et du soulèvement de Cracovie. Ensuite, des images de la guerre de Trente ans, puis l'exécution des patriotes tchèques à la place de la Vieille-Ville et enfin la bataille de la Montagne blanche. De nouveau, j'ai aperçu toute une série d'événements terrifiants, sanglants : le massacre des huguenots, des images des guerres de religion en France, la bataille fratricide de Lipany, des images de meurtres au Pérou, au Mexique et dans d'autres contrées de l'Amérique où le cupidité des Européens a apporté la destruction. J'ai vu une série des batailles des Hussites conduits par Zizka [...] et après un court intervalle, j'ai vu l'image terrible de Hus en train d'être brûlé à Constance.

Jakub Arbes, le grand classique tchèque de la science-fiction, a commencé à rédiger le récit *Le cerveau de Newton* dont sont extraites les citations précédentes en 1867, l'année même de l'arrivée de Mach à Prague (le récit fut publié en 1877). Comme on le voit, le terrain pragois fut favorable aux recherches et aux spéculations de toute sorte. Après les études à Vienne et un premier poste de professeur à Graz, Mach arrive dans une ville d'anciennes et riches traditions culturelles et scientifiques.

Si c'est à Vienne que s'est formée la nouvelle philosophie des sciences, ce n'est pas à Vienne qu'elle fut conçue. Avant Vienne, il y a Prague, siège d'une première université en Europe Centrale, fondée au XIV^e siècle. Après Copernic, le pas décisif vers la nouvelle astronomie fut accompli à Prague : Tycho Brahe y a travaillé pendant les deux dernières années de sa vie et Kepler, invité par Tycho, y a découvert les deux premières lois du mouvement des planètes. Quelques années avant Descartes, Marcus Marci a énoncé les lois du choc, comme le rappelle d'ailleurs Mach. C'est aussi à Prague, bien avant Vienne, que commença à se développer la vie scientifique en Europe Centrale à la fin du XVIII^e siècle, lorsqu'un groupe de nobles et de savants y ont fondé la Société Royale des Sciences de Bohême, alors que l'Académie des Sciences de Vienne vit le jour seulement plus de soixante-dix ans plus tard, en 1847. L'école médicale de Prague, comme celle de Vienne, était célèbre ; les travaux sur le rêve, sur le vertige et sur la physiologie des sens de Jan E. Purkyne (Purkinjé), dont certains ont été repris par Mach, ont une valeur permanente. Bohême était aussi le pays de prédilection de Goethe qui faisait de nombreux séjours dans des stations balnéaires comme Karlsbad ou Marienbad et qui suivait de près les efforts des savants et des écrivains de Bohême.

Le membre le plus illustre de la Société Royale de Prague fut le prêtre Bernard Bolzano, philosophe, mathématicien et initiateur de la logique moder-

ne et de la philosophie analytique d'inspiration scientifique en Europe centrale. La physique pragoise ne fut pas moins importante ; après Doppler, Ernst Mach a enseigné à Prague pendant ses années les plus fécondes, 28 ans au total. D'ailleurs, c'est à propos de l'interprétation de l'effet Doppler (changement de fréquence d'une propagation d'ondes constaté par un observateur en mouvement par rapport à la source de cette propagation), si important pour la cosmologie moderne, que Mach renoue avec Bolzano. En effet, Bolzano était à peu près le seul savant qui, dans un article de 1843, a non seulement défendu l'effet Doppler contre ses critiques, mais encore qui a montré qu'il s'agit d'un phénomène absolument général de la théorie des ondes et qu'il ne dépend pas de la nature des ondes (ondes transversales ou ondes longitudinales), et qui a indiqué que l'effet Doppler pourrait un jour être utilisé en cosmologie. La fin de son article mérite d'être cité à cause de son ton prophétique :

J'attends plein de confiance que ces théorèmes [concernant l'effet Doppler] seront de plus en plus corroborés et éprouvés, de sorte qu'on finira par s'en servir un jour pour répondre aux questions portant sur la direction et les vitesses des corps célestes à partir des modifications de la couleur de leur lumière – et pour répondre à bien d'autres questions encore. [Bolzano 1843]

18 ans plus tard, en 1861, Mach, répondant à un autre critique (Petzval), confirme que l'effet Doppler est un principe universel pour toute propagation par ondes et ajoute que sa validité pour la propagation de la lumière devrait se manifester par le déplacement des raies spectrales.

Une quinzaine d'années après Mach, un autre physicien illustre occupe la chaire de physique à l'Université de Prague : dans les années 1911 et 1912, Einstein a élaboré à Prague les idées essentielles de la théorie de la relativité générale.

2. Mach et Duhem

A première vue, tout a opposé Mach et Duhem. Le premier est un héritier de l'*Aufklärung*, un libéral (il n'a jamais compris comment les gens pouvaient accepter, «ne serait-ce qu'une seconde», l'autorité d'un roi), favorable à la social-démocratie, athée, adversaire de toute métaphysique, physicien qui s'est très vite imposé par sa critique des bases sur lesquelles repose la mécanique newtonienne. Philosophe, Mach est un empiriste pur : tous les concepts scientifiques, tous les principes physiques viennent de l'expérience. La preuve en est que nous pouvons concevoir que l'expérience fût autre qu'elle n'est ; nos principes physique pourraient donc être autres. – Les ouvrages de Mach sont vite traduits en anglais et en français. Il a fait une carrière brillante dans les universités les plus prestigieuses de l'ancien Empire autrichien, carrière qui s'est

terminée à Vienne, la capitale, dont il fut un des personnages mythiques durant cette période exceptionnelle de fin de siècle, consacré le philosophe de l'impressionnisme, vénéré dans les lettres et les arts viennois et le jeune Robert Musil lui a consacré une thèse.

Le second, Duhem, plus de vingt ans son cadet, est un catholique fervent et militant, royaliste et anti-dreyfusard. Même en philosophie, il veut rester fidèle à l'enseignement de l'Eglise, en l'occurrence à la version thomiste de la métaphysique aristotélicienne. Elève brillant de l'Ecole normale, il eut le tort de s'attaquer dans sa première thèse, refusée à la soutenance, à la théorie de Marcelin Berthelot, chimiste et homme politique influent, sénateur puis ministre, l'un des maîtres du positivisme scientiste en France. Toute la carrière de Duhem fut marquée par ces mot de Berthelot transmis au Ministère de l'Instruction publique : «Ce jeune homme n'arrivera jamais à Paris». Après un début prometteur à l'université de Lille et un passage par Rennes, Duhem, promoteur de la chimie physique et de la thermodynamique, a dû passer le reste de son activité à l'Université de Bordeaux. En France, la reconnaissance fut tardive et mesurée (bon nombre de ses articles et de ses ouvrages, refusés en France, ont paru en Belgique), alors que Duhem fut honoré à l'étranger (le chimiste tchèque Frantisek Wald, ami de Mach et correspondant d'Ostwald, a échangé quelques lettres avec Duhem). Il a aussi été traduit et, comme l'*Evolution de la mécanique* de Mach, sa *Théorie physique*, son objet – *sa structure* de 1906 est l'un des ouvrages majeurs qui ont façonné la philosophie des sciences de notre temps.

Les deux physiciens-philosophes répondent cependant aux mêmes problèmes que pose la science et que les philosophes ne sont plus capables de maîtriser ni même toujours de comprendre. Si le divorce entre la science et la philosophie est consommé chez les post-kantiens, ce sont les savants eux-mêmes qui doivent forger leur propre philosophie. On le voit en Allemagne avec Helmholtz, Kirchhoff et Hertz. On le voit aussi en France, comme l'avait remarqué déjà Schelling lorsqu'il constatait que, au XIXe siècle, «les vrais promoteurs de la philosophie en France et en Angleterre sont leur grands savants», *ihre grossen Naturforscher*. Dans les dernières décennies du XIXe siècle et au début du XXe, Poincaré et Duhem instaureront une nouvelle philosophie des sciences en France. Même les préoccupations des philosophes «purs» (ceux qui ne sont pas savants par profession) comme Russell, Bergson et Husserl sont centrées sur la science. Quant à Mach et Duhem, malgré les différences profondes de leurs personnalités, de leurs philosophies et de leurs carrières respectives, bon nombre de thèses concernant les théories physiques vont dans le même sens. Duhem lui même a reconnu d'avoir émis des pensées qui avaient avec les celles de Mach plus d'une analogie. Les deux confinent la physique aux phénomènes ; les deux la séparent rigoureusement de la métaphy-

sique ; les deux refusent de faire appel aux atomes et autres entités inobservables et rejettent la « mythologie mécaniste » ; Duhem a fait sienne l'idée de la science comme économie de pensée ; l'un et l'autre insistent enfin sur la nécessité des études historiques pour atteindre une connaissance complète des notions et des lois physiques et pour ébranler le dogmatisme aprioriste et métaphysique.

Mach et Duhem se sont appréciés. Ils ont échangé quelques lettres et chacun a écrit plusieurs pages sur l'autre. Mach a complété sa *Mécanique* par un résumé de *L'origine de la statique* de Duhem et a préfacé la traduction allemande de sa *Théorie physique*. Duhem mentionne Mach dans *La théorie physique* et a rédigé un compte rendu très complet de la *Mécanique* de Mach (publiée par Anastasios Brenner dans [Duhem 1992]).

Mach rappelle qu'il ressort des recherches de Duhem sur les origines de la statique que «la culture scientifique moderne entretient des liens beaucoup plus intimes avec la science de l'Antiquité qu'on ne l'admet habituellement» et que la pensée scientifique de la Renaissance a été préparé par une évolution lente, progressive qui remonte à l'école péripatéticienne et à celle d'Alexandrie. Il rappelle aussi les mérites d'un écrivain savant du XII^e siècle découvert par Duhem, Jordanus de Nemore et, bien entendu, les passages consacrés à Léonard de Vinci. Cependant, par rapport à Duhem, Mach évalue «un peu différemment» la relation entre la science de l'Antiquité et la science moderne. Selon Mach, Le progrès scientifique se déroule à son avis en deux étapes :

1) par la «reconstruction des faits dans la pensée» ; celle-ci finit cependant par manifester certaines imperfections qui doivent être

2) rectifiées pour assurer la cohérence de la théorie et son accord avec les faits. La construction d'une théorie consiste donc dans une adaptation perpétuelle des pensées aux faits.

Mach souligne dans ce contexte l'importance de la culture matérielle, l'étude des machines et des outils dont nous avons des témoignages : en observant et analysant ces machines, nous pouvons mieux comprendre comment les savants de l'Antiquité sont parvenus à leurs théories. C'est grâce à l'expérience lors de la construction des machines et grâce à leur usage outils que les techniciens et physiciens de l'Antiquité ont dû acquérir, sous forme de «connaissances instinctives», des principes élémentaires de la mécanique comme celui qui énonce l'impossibilité du mouvement perpétuel, même si aucun texte ne l'atteste. D'autre part, quant à Galilée qui serait d'après Duhem resté trop longtemps sous l'influence de l'école péripatéticienne, il semble à Mach que, dans sa piété à l'égard d'Aristote, Duhem serait allé «un peu trop loin». «Lorsqu'on estime l'importance d'un savant, il est essentiel de voir quel

usage *nouveau* il a fait des idées anciennes et contre quelle *opposition* de la part de ses contemporains et successeurs ses idées sont parvenues à être reconnues». [Mach 1883/1933, 81]

Le compte rendu de la *Mécanique* de Mach par Duhem met en relief les idées maîtresses de la philosophie de Mach. Nous venons de voir que Duhem a adopté la conception de la science de Mach comme économie de pensée : «tenir le plus de réalité possible en une forme réduite le plus possible». En fin de compte, comme le dit Mach, «la science elle-même peut être considérée comme un problème de minimum, qui consiste à exposer les faits aussi parfaitement que possible avec la moindre dépense intellectuelle» [Mach 1883/1933, 446]. De même, Duhem accepte les formulations et ses commentaires sur la causalité de Mach : «la nature n'est présente qu'une fois», alors que notre concept de causalité couvre la répétition de nombreux cas semblables. La reproduction ou copie mentale d'un fait résume par abstraction les caractères communs à un grand nombre de faits.

Duhem est également d'accord avec la tendance anti-métaphysique de l'ouvrage, à savoir la séparation rigoureuse de la physique de tout système métaphysique et a fortiori théologique ; il reproche cependant à Mach d'avoir négligé les liens extrêmement complexes entre la physique et la métaphysique dans le passé.

3. La théorie physique

Tout d'abord, pour les deux, la physique est une science des *phénomènes*, de la manière dont le monde réel nous *apparaît*. Elle n'a pas à s'occuper de causes ou de mécanismes essentiellement inobservables, impossible à mettre en évidence et qui seraient derrière les phénomènes et qui les produiraient. Pour Mach, toute explication physique n'est qu'une description des conditions sous lesquels se produisent les phénomènes, description des relations réglées ou lois qui fixent leur dépendance mutuelle. Duhem relègue l'explication véritable en métaphysique dont le physicien n'a pas à s'occuper. La notion même de théorie subit ainsi un bouleversement profond : tout accès aux réalités « en soi » lui est ou bien interdit (Duhem), ou bien une telle réalité est une notion métaphysique, dépourvue de sens (Mach). Une théorie physique ne fournit donc pas une image fidèle de la réalité telle qu'elle est « en elle-même » ; elle n'en fournit qu'une représentation abstraite, nous dirions un modèle.

Pour Mach, une théorie est une «adaptation des pensées aux faits et des unes aux autres» ou encore une «reproduction des faits dans la pensée», étant entendu qu'un fait scientifique n'est pas simplement donné, mais qu'il est acquis au terme d'un travail conceptuel. Pour Duhem, une théorie n'est rien

d'autre qu'une construction schématique ou symbolique qui contient des principes permettant de déduire les lois expérimentales ou relations entre certaines grandeurs, exprimée en langage mathématique. Mach et Duhem mettent chacun l'accent sur les différents aspects des théories physiques. Alors que Mach, tout en reconnaissant la nécessité de l'approche logique, considère que l'essentiel de ses grands ouvrages critiques consiste dans le contenu proprement *physique* (*das naturwissenschaftliche Inhalt*), la partie mathématique étant «tout à fait accessoire» [Mach 1883/1933, 1], Duhem met l'accent sur le formalisme mathématique. D'où également la différence dans le traitement de l'histoire de la physique.

Considérons d'abord comment se forme une théorie physique. Mach trouve ses origines dans des connaissances instinctives acquises par l'expérience avec les phénomènes du monde réel ou avec des outils et les premières machines.

De telles connaissances instinctives sont par exemple la première hypothèse d'Archimède énonçant l'équilibre des poids égaux appliqués à des distances égales d'un levier ou l'impossibilité du mouvement d'une chaîne fermée suspendue sur un prisme triangulaire, énoncée par Stevin. «Le procédé de Stevin et d'Archimède apparaît ainsi comme une *hypothèse* dont l'abandon mettrait immédiatement en contradiction logique les faits isolés fournis par l'expérience». [Mach 1883/1933, 37]

L'autorité de telles connaissances qui, en tant que principes, guident notre recherche, vient du sentiment qu'elles s'imposent à nous sans notre participation volontaire et qu'elles permettent d'unifier de nombreux faits en les déduisant du même principe. Mais les connaissances instinctives présentent un danger :

elle jouissent d'une confiance toute particulière. Ne sachant plus comment nous les avons acquises, nous n'en pouvons plus critiquer le mode d'acquisition. Nous n'avons en rien contribué à leur formation. Elles se présentent à nous avec une puissance que ne possèdent jamais les résultats de nos expériences réfléchies, volontaires, dans lesquels nous sentons toujours notre intervention. [...] C'est à cause de cela que l'on attribue parfois aux connaissances de cet ordre une origine entièrement différente et qu'on les considère comme existant en nous absolument *a priori*, antérieurement à toute expérience. [...] Cette opinion n'est pas soutenable. [Mach 1883/1933, 4]

Sans nier l'utilité de l'induction, Mach conteste que ce procédé épuiserait l'activité du physicien : celui-ci «doit avant tout *trouver* les *caractères* qui entrent en ligne de compte ainsi que leur *connexion*, ce qui est une tâche beaucoup plus difficile que de classer ce qui est déjà

connu. C'est pourquoi la désignation de l'ensemble des sciences de la nature comme "sciences inductives" n'est pas justifiée» [Mach 1905, 312].

Comment reconnaître ces caractères ou facteurs déterminants ? Ils jouent un rôle analogue à ceux des termes primitifs dans une théorie axiomatisée : ils figurent dans les principes des théories physiques, en d'autres termes, les principes énoncent des relations qui ont lieu entre les caractères déterminants d'une théorie.

Duhem met l'accent sur le caractère symbolique d'une théorie qui a pour tâche de classer, de coordonner, de relier les lois expérimentales. Loin de tracer l'origine des théories scientifiques dans les connaissances instinctives, Duhem examine leur construction et leur structure.

Une théorie physique suppose quatre opérations :

1) la définition des concepts physiques, à savoir la coordination des notions du sens commun comme celui de chaud aux grandeurs susceptibles d'être mesurées et manipulées algébriquement, en l'occurrence le concept de température. On établit ainsi le vocabulaire de la théorie, vocabulaire pour la confection duquel le physicien est entièrement libre même s'il est suggéré par l'expérience. Les définitions des grandeurs physiques sont donc des conventions arbitraires.

2) Le choix des hypothèses. Les hypothèses établissent des relations entre les grandeurs physiques et conduisent aux conséquences qui peuvent tantôt être vérifiées expérimentalement (et nous avons alors affaire à des lois expérimentales), tantôt contredire les lois expérimentales. Or, comme pour les définitions, le choix des hypothèses est absolument libre, même si des critères comme l'étendue du champ, le nombre et la nature des hypothèses peuvent faire pencher la balance dans un sens ou dans l'autre. Une théorie physique est donc un ensemble de conventions régissant l'organisation des lois expérimentales. Mais même si logiquement, le choix de hypothèses est libre, psychologiquement et historiquement, elles résultent d'une lente évolution : elles «germent en nous», comme si les hypothèses choisissaient un physicien pour s'y implanter plutôt que l'inverse.

3) Le développement mathématique des théories. Les théories doivent se souder aux observations aussi bien au départ qu'à l'arrivée, ce qui suppose un dictionnaire permettant de traduire le langage de l'observation (de l'à-peu-près) dans le langage des nombres (rigoureux).

4) La comparaison de la théorie avec l'expérience. Toute expérience est observation et interprétation, et il est impossible de dissocier les deux (d'où l'impossibilité de l'expérience cruciale). L'expérience, seule matière première

de la physique, tout en contribuant à l'établissement des lois expérimentales, intervient dans une théorie au dernier stade, celui de la vérification.

4. Physique et métaphysique

Les attitudes de Mach et de Duhem à l'égard de la métaphysique diffèrent quant à son acceptation ou son rejet, mais coïncident quant à son élimination des théories physiques. Que faut-il entendre par métaphysique ? Si pour Duhem, la métaphysique est une recherche qui explique les phénomènes par leurs cause véritables, pour Mach, elle consiste dans des assertions invérifiables concernant la nature des choses, qu'elle soit de nature animiste, spiritualiste ou matérialiste. On sait que Mach est un phénoméniste radical voulant expliquer le réel, y compris le moi, par des complexes d'éléments de nature sensorielle plus ou moins stables : des sensations, des couleurs, des sons, des sensations de douleurs et de plaisir, mais aussi des temps et des espaces élémentaires, des pressions. Pour son compte, Mach refuse d'être considéré comme philosophe : «Le pays du transcendantal est complètement fermé pour moi» [Mach 1905, VIII]¹.

Quant à Duhem, il a tiré son idée de la séparation entre la physique et la métaphysique de la réflexion sur l'astronomie grecque, seule science mathématisée en dehors de quelques fragments d'optique et de statique, et sur la physique d'Aristote qui fait en réalité partie de ce que nous appelons la métaphysique. Il fut frappé par les discussion des astronomes grecs sur le caractère purement instrumental de leurs constructions. Leur but n'est pas d'expliquer les mouvements célestes par leurs vraies causes, inconnues (le modèle ptoléméen ne s'accorde pas avec la physique d'Aristote) ; ils abandonnent de tels explications aux philosophes et se contentent plus modestement de «sauver les phénomènes». Cependant, on peut adapter plusieurs théories, plusieurs modèles géométriques aux mêmes observations ; l'astronome n'est plus alors en mesure de décider lequel représente les «vraies» mouvements. Pour Ptolémée aussi bien que pour Archimède, la tâche de la physique consiste à constater les faits, à découvrir les lois et à construire des théories à partir de principes posés à titre de postulats ou hypothèses. Il incombe alors à la métaphysique de rechercher la véritable nature ou essence des choses, d'expliquer les phénomènes par les causes derrière les phénomènes (c'est cette causalité métaphysique «verticale» que Mach a remplacée par les relations de dépendance «horizontales» entre les phénomènes ou éléments).

¹ Pour une présentation plus complète de l'ontologie et de l'épistémologie de Mach, voir aussi mon "Bolzano and Mach : logical and phenomenist theories of representation", à paraître dans *Axiomathes*.

Cependant, lorsque Duhem opère la séparation rigoureuse entre la science et la métaphysique, ne suit-il pas davantage les traces de Kant et des positivistes que l'enseignement d'Aristote et de Saint Thomas ? Toujours est-il que pour Duhem, cette distinction relève non pas de la nature des choses, mais de la faiblesse de notre intelligence discursive. Une intelligence angélique «connaîtrait simultanément la substance et ses modifications», la cause intelligible et l'effet sensible, phénoménal.

La métaphysique n'a donc aucune place dans la recherche d'enchaînement des phénomènes, dans l'établissement des lois de leur dépendance. D'ailleurs, si elle précède la physique dans l'ordre d'excellence, elle la suit lorsqu'elle se propose d'établir la nature véritable des choses dont par le physicien, de sorte que c'est «une certaine connaissance de la physique [qui] a permis les premières recherches métaphysiques». Pour Duhem, les constructions de la métaphysique se déroulent dans un plan fondamental, sous-jacente au plan des phénomènes, et qui doit les expliquer. Une telle construction reste par définition hypothétique, puisque plusieurs explications peuvent rendre compte des mêmes phénomènes. La métaphysique, peut-elle fournir les premiers principes de la physique ? Les vérités métaphysiques sont trop peu déterminées pour fournir un point de départ pour déduire les lois qui régissent les phénomènes. Or, la voie déductive qui conduit des principes métaphysiques aux vérités physiques «paraît très difficile et pleine de dangers» aussi pour une autre raison.

Cette raison, c'est le procédé d'inférence inductive qui remonte des phénomènes aux causes : même si nous avons eu la connaissance complète des phénomènes, nous aurions acquis seulement une connaissance incomplète et hypothétique de leurs causes. La métaphysique au sens de Duhem est une discipline inductive, hypothétique, conjecturale ; elle

procède plutôt par négations que par affirmations ; plutôt par exclusion de certaines hypothèses qui pourraient être faites sur la nature des choses que par renseignements positifs sur cette nature ; c'est seulement dans quelques cas rares que, par exclusion de toutes les hypothèses possibles sauf une, nous parvenons à acquérir un document positif sur l'essence des choses matérielles. [Duhem 1987, 89]

La métaphysique au sens de Duhem ne peut donc être qu'une discipline *négative*. De plus, Duhem distingue soigneusement entre les *vérités* métaphysiques et les *systèmes métaphysiques*. Seules les premières, «peu nombreuses et, pour la plupart, de forme négative» jouissent d'une certaine évidence ; un système métaphysique, qui est «un ensemble de jugements positifs, mais hypothétiques» est acceptable seulement lorsque «aucune des hypothèses dont il se compose ne heurte une vérité métaphysique établie ; mais il demeure toujours problématique». [*ibid.*]

La certitude de la physique lui vient de l'emploi de la méthode expérimentale. Cette méthode «repose sur des principes évidents par soi et en dehors de toute métaphysique». Comme Pascal dont il se réclame contre l'esprit déductiviste des savants allemands dans *La science allemande*, Duhem fait appel à l'évidence des principes et des concepts de la physique. Les notions de phénomène physique, de loi, de corps, d'étendue, de temps, de mouvement sont suffisamment distinctes et suffisamment certaines pour qu'on puisse en faire l'usage dans toutes les disciplines de la physique. – Or, pour Mach, ce sont également les premières notions de la physique, ceux d'espace, de temps, de mouvement, de masse et de force, qui contiennent des ingrédients métaphysiques et qu'il faut reconstruire à partir d'éléments sensoriels. – Pour Duhem, cette clarté des notions physique ne nous interdit pas de nous livrer à des recherches métaphysiques pour en pénétrer l'essence et les fondements, mais une telle recherche est «sans contre-coup sur la méthode expérimentale». Si la métaphysique doit «rendre compte des fondements, évidents par eux-mêmes, sur lesquels repose la physique», «cette étude n'ajoute rien à leur certitude et à leur évidence dans le domaine de la physique». [*ibid.*, 93]. Le domaine de la physique et celui de la métaphysique étant nettement séparés, les deux disciplines sont indépendantes l'une de l'autre.

Cette séparation est si rigoureuse que, même si la métaphysique nous fournissait une connaissance détaillée de l'essence des choses matérielles, qui permettrait à la théorie physique d'établir une classification adéquate des lois physiques selon l'ordre métaphysique, le physicien serait encore libre d'en adopter une autre. En le faisant, il pécherait contre la loi du meilleur, celle qui propose de choisir ce qui excelle, mais il ne pécherait pas contre la logique. On ne saurait mieux exclure toute intrusion de la métaphysique dans la science.

Avec cette séparation, Duhem rejoint les sceptiques, Kant (dont il ne parle pas) et les positivistes, s'opposant à l'enseignement des grands métaphysiciens du passé. Pour lui, le grand responsable de l'intrusion de la métaphysique en physique sont les auteurs de la révolution scientifique du XVII^e siècle, Galilée et Kepler, mais surtout Descartes. Cependant, Duhem aurait pu également citer Aristote dont les écrits sur la physique traitent et des fondements métaphysiques de la physique et des problèmes concrets de la physique. Restons en, cependant, à Descartes. La révolution scientifique consiste dans le reversement complet de la perspective : là où les aristotéliens tiennent les systèmes astronomiques (les modèles géométriques de l'univers) non pas pour expression de la réalité des choses, mais pour de simples auxiliaires de calcul en vue des prévisions des positions des corps célestes, les modernes, et Descartes le premier, considèrent que, la matière étant identifiée à l'étendue, c'est la structure géométrique qui constitue la vraie réalité, le monde sensible qui relève du sentiment et de l'imagination étant relégué au second plan. Or, si nous

connaissions la nature de la matière, nous pouvons en déduire toutes ses propriétés. La physique dépend donc essentiellement de la métaphysique qui lui fournit ses fondements.

Duhem combat Descartes au nom de la tradition aristotélicienne et thomiste. Qu'en est-il des sceptiques et des positivistes ? Contre le scepticisme, Duhem préconise la détermination des limites de l'usage exact des outils conceptuels. C'est précisément la démarcation précise du champ de chaque science qui permet de combattre le scepticisme, favorisé par la confusion des domaines des sciences. Quant au positivisme, Duhem sent bien sa proximité avec ses idées et, sur le plan de la science, s'en sépare uniquement par le refus de l'exclusivité des méthodes scientifiques :

En niant à la métaphysique le droit de régenter les recherches physiques, en niant aux théories physiques le droit de s'ériger en explications métaphysiques, sommes-nous positiviste ? Nous soutenons que les sciences positives doivent être traitées par des méthodes propres aux sciences positives [...] indépendamment de toute recherche métaphysique ; nous soutenons que ces méthodes [...] sont incapables de saisir les causes et d'atteindre les substances ; mais ce n'est pas là être positiviste. Être positiviste, c'est affirmer qu'il n'y a pas d'autre méthode de logique que la méthode des sciences positives ; que ce qui est inabordable à cette méthode, que ce qui est inconnaissable aux sciences positives, est en soi et absolument inconnaissable ; est-ce là ce que nous soutenons ? [Duhem 1987, 99]

La frontière qui sépare ce genre de positivisme borné et les thèses de Duhem en matière de méthodologie scientifique me paraît bien mince ; reste évidemment la différence fondamentale qui touche l'objet, le champ et la légitimité de la métaphysique.

5. Histoire des sciences selon Mach et selon Duhem.

Mach n'est pas à proprement parler un historien de la physique et Duhem se veut d'abord physicien théoricien et non pas historien, au point d'avoir refusé de poser sa candidature à la chaire d'histoire des sciences au Collège de France. La méthode et la valeur historique de leur travaux n'est pas la même. Les deux utilisent l'histoire à l'appui d'une certaine idée de la physique et y cherchent des arguments en faveur de leurs méthodologies. Duhem a littéralement découvert la physique médiévale grâce à une labeur d'archiviste infatigable, ce qui lui a permis de soutenir la thèse continuiste en matière de l'évolution de la physique (mais non par rapport au sens commun). En revanche, les compétences de Mach en tant qu'historien ont été mises en doute. Il partage avec Duhem la thèse continuiste en y ajoutant la continuité avec la connaissance commune. Sa mécanique n'est qu'un « roman de l'histoire de la

physique», estime l'historien américain de la mécanique Truesdell qui reproche à Mach de faire trop confiance à l'historique de Lagrange. L'introduction à la *Mécanique analytique* de Lagrange contient selon Truesdell «la première histoire des corps continus et plus généralement la première histoire de la mécanique qui inclut la plupart d'ouvrages de référence que Mach a consultés» ; Lagrange est ainsi devenu «la source ultime de la plupart des croyances historiques répandues aujourd'hui par l'enseignement de la mécanique» [Euler 1960, 409]. Et quant à Lagrange, toujours selon Truesdell, «en ce qui concerne notre sujet, ses historiques sont pires que s'il n'y en avait pas du tout» [*ibid.*, 411].

L'historien trouve en effet bien à redire des travaux historiques de Mach. On comprend que Mach passe presque entièrement sous silence la physique du Moyen Âge qui était seulement en train d'être découverte par Duhem. D'ailleurs, au cours des éditions successives de la *Mécanique*, Mach a constamment remanié, modifié et complété son texte, de sorte que la dernière édition parue du vivant de l'auteur, la 7^e de 1912, contient sept pages sur l'Origine de la statique de Duhem qui ne figurent naturellement pas dans la traduction française de 1904 faite sur la 4^e édition de 1901. On comprend moins bien que dans la *Mécanique* par exemple, les deux grandes figures du XVIII^e siècle, Jacques Bernoulli et Euler, sont traitées de manière plutôt marginale et que les posthumes *Principes de l'optique physique* de 1921 laissent de côté les grandes innovations de l'optique du XIX^e siècle (il est vrai que Mach projetait un deuxième volume de cet ouvrage). L'image de Galilée découvrant expérimentalement les lois de la chute des graves prête à controverses même si aujourd'hui, après le réexamen par Stillman Drake des manuscrits non publiés de Galilée, la part de l'expérimentation est attestée, contrairement à l'opinion qui prévalait il y a une trentaine d'années. Le chapitre sur les lois du choc ne contient pas un mot sur Descartes que Mach a certainement connu (il a sans doute voulu rendre justice à son compatriote Marcus Marci). La constitution de la physique mathématique au XIX^e siècle est à peine abordée, mais comme nous l'avons vu, Mach, piètre mathématicien, s'en est excusé au début de son ouvrage ²

Cependant, Mach n'a pas voulu faire œuvre d'historien pur. «Bien qu'on ait utilisé de nombreuses sources, écrit-il dans *Les principes de la théorie de la chaleur*, on ne doit pas trouver dans cet ouvrage un résultat de recherches d'archives ; il s'agit ici davantage de la *connexion* et de la *croissance des pensées* que de *curiosités intéressantes*» [Mach 1896, VIII]. Dans la *Mécanique*, son propos consiste dans «un travail d'explication critique animé d'un esprit *anti-métaphysique*», donc un travail d'analyse des principes de la

2 Cette histoire fait l'objet du beau livre *La conscience de rationalité* de Suzanne Bachelard (Paris, 1965).

mécanique et de reconstruction des arguments des physiciens du passé du point de vue du physicien de la fin du XIXe siècle. Il est vrai, comme le dit Duhem dans son compte rendu, que Mach «traite l'histoire en logicien» et que les

tableaux historiques tracés par M. E. Mach [sont] trop simples, trop clairs, trop parfaitement ordonnés ; l'évolution, telle que ces tableaux la retracent, tend trop constamment, trop sûrement au but qu'elle doit atteindre ; la marche de l'esprit humain a été, en réalité, plus hésitante, plus tâtonnante [...] [Duhem 1903/1994]

L'intention de Mach, c'est précisément de faire ressortir de ces tâtonnements une ligne claire qui parle au physicien d'aujourd'hui pour qu'il puisse y reconnaître les préoccupations qui peuvent encore être les siennes.

Esprit anti-métaphysique qui anime les ouvrages de Mach est aussi l'esprit de l'*Aufklärung*, l'esprit des lumières : il s'agit, pour Mach, de traquer les restes des notions 'métaphysiques', à savoir des entités hypothétiques inobservables, indétectables par essence, introduites pour expliquer les phénomènes observables. *C'est la critique historique qui dévoile l'origine empirique de tous nos concepts physiques et l'illégitimité des entités qui se dérobent à toute expérience possible.* L'analyse détaillée à laquelle Mach soumet les principes de la physique de Newton est encore aujourd'hui pleine d'enseignement. Les notions de temps, d'espace et de mouvement absolus ne sauraient être rattachées à aucune observation, aucune expérience ; d'ailleurs, Mach souligne que Newton, dans le corollaire V des *Principia*, considère non pas l'espace absolu, mais seulement «une partie de l'espace», à savoir le référentiel lié aux étoiles fixes. Analysant l'expérience newtonienne célèbre du vase tournant rempli d'eau qui devait mettre en évidence le mouvement absolu, Mach insiste qu'il faudrait refaire l'expérience avec des parois du vase immensément agrandis qui entreraient alors en interaction avec l'eau. On a, paraît-il, tenté ou calculé l'expérience sans pouvoir conclure. Selon Mach, les notions de temps et d'espace sont des abstractions formées par comparaison des événements ou des mouvements réels dont un est pris comme repère auquel on rapporte les autres (ceci pour le temps) ou par l'organisation progressive des mouvements musculaires (pour l'espace).

Ce travail de purification ne saurait être sous-estimé. Mach nous a délié de discussions véritablement métaphysiques au mauvais sens du terme comme celles qui portaient sur la mort thermique de l'univers ou sur les modèles mécaniques de l'atome en vogue chez les physiciens anglais de la fin du XIXe siècle. C'est aussi grâce à l'incessante critique de Mach que l'hypothèse atomique, dans les travaux d'Einstein sur le mouvement brownien, a pris une forme nouvelle qui lui a permis de fournir un point de départ pour la physique du XXe siècle.

Si l'histoire des sciences selon Mach est une histoire non pas des savants ou des institutions, mais une histoire des *problèmes*, donc une histoire conceptuelle, l'histoire au sens de Duhem est une histoire des *écoles*. Bien que Duhem, comme Mach, sépare rigoureusement la physique de la métaphysique, il caractérise les différentes écoles, l'école péripatéticienne, l'école cartésienne, l'école atomistique, l'école newtonienne etc. jusqu'au début du XXe siècle, par leurs hypothèses métaphysique ou tout au moins par leur attitude à l'égard de telles hypothèses.

L'œuvre historique de Duhem est immense, incommensurable : elle englobe toutes les époques depuis l'Antiquité jusqu'au début du XXe siècle, elle couvre la plupart des disciplines de la physique : la cosmologie, la mécanique, l'électricité, la thermodynamique, celles précisément qui, vers la fin du XIXe siècle, ont accumulé les problèmes appelant une reformulation des théories en vue de les unifier dans un système global. En dehors de *L'origine de la statique*, deux volumes sont consacrés à *Léonard de Vinci, ceux qu'il a lus – ceux qui l'ont lu*, un à l'histoire de la théorie physique de Platon à Galilée, un à l'histoire du mouvement relatif et du mouvement absolu. L'extraordinaire synthèse d'histoire de la cosmologie exposée dans les dix volumes du *Système du monde*, de l'Antiquité jusqu'au XIVe siècle, est probablement la plus vaste somme tentée par un historien des sciences. Enfin, cette œuvre dont une partie reste toujours manuscrite, contient des renseignements puisés aux meilleurs sources et souvent uniques. Il ne saurait être question ici ne serait-ce que de la parcourir ; contentons nous d'analyser quelques thèses que Duhem a dégagées de ses travaux d'histoire des sciences.

Pour Duhem, nous l'avons vu, une théorie physique est une théorie mathématisée. Or, de ce point de vue, dans l'Antiquité, seules l'astronomie et certaines parties de la statique et de l'optique géométrique pouvaient être considérées comme théories physiques au sens de Duhem. Quant à la physique péripatéticienne, celle-ci est essentiellement une cosmologie, à savoir une théorie hypothétique sur la constitution de l'univers et comme telle une partie de la métaphysique. Mais Duhem avance que la séparation nette entre la métaphysique et la physique (au sens moderne, duhémien) est supposé par le travail d'Archimède qui démontre des théorèmes sur les corps flottants sans faire appel à des hypothèse sur la constitution intime des liquides eux-mêmes. De plus, cette séparation est sous-jacente à la pensée d'Aristote et même à celle de Saint Thomas. Celui-ci soutient en effet, dans un commentaire du *De Caelo* d'Aristote, qu'il n'est pas nécessaire que les hypothèses des astronomes soient vraies ; il suffit qu'elles sauvent les phénomènes. Dans de tels passages – et on pourrait en citer d'autres, notamment celui où Ptolémée qualifie de conjecturale la partie théologique et la partie physique de la philosophie en contraste avec la partie mathématique, seule assurée – Duhem ne voit pas là la marque de

l'imperfection des théories physiques qui renoncent de pénétrer au delà des phénomènes, mais l'affirmation du statut permanent d'une théorie physique mathématisée confinée aux phénomènes observables. Plus encore, il invoque à l'appui de sa thèse la préface d'Ossiander aux *Révolutions des orbés célestes* de Copernic où Ossiander, de crainte que le système héliocentrique ne provoque la censure des théologiens, déclare qu'«il n'est pas nécessaire que ces hypothèses soient vraies ni même vraisemblables, mais cela seul suffit qu'elles donnent lieu à un calcul qui s'accorde avec les observations». Si Ossiander joue l'autorité suprême en matière de méthode expérimentale et de théorie physique auprès de Duhem, on ne saurait s'étonner que les représentants de «l'une des plus grandes révolutions qui aient bouleversé le monde de la pensée», à savoir Kepler et Galilée, soient pénétrés de «l'illusion que les théories physiques atteignent les véritables causes et la raison même des choses». Ainsi, la révolution scientifique inaugurée par Galilée et Kepler, continuée par Descartes et achevée par Newton s'engage dans des impasses métaphysiques qui aboutiront au modèle mécaniste de l'univers.

Si *La Mécanique* de Mach est construite autour des principes de la physique de Newton, le personnage qui sert de révélateur de la méthode duhemienne est Galilée. Pour Duhem, la première condamnation de Galilée par le Saint-Office en 1616

était la conséquence du choc qui s'était produit entre deux réalismes. Ce heurt violent eût pu être évité, le débat entre les Ptoléméens et les Coperniciens eût pu être maintenu sur le seul terrain de l'Astronomie, si l'on eût écouté de sages préceptes touchant la nature des théories scientifiques et des hypothèses sur lesquelles elles reposent», préceptes formulés par les anciens qu'une tradition ininterrompue «avait conduits jusqu'à Ossiander, à Reinhold, à Melanchthon» [Duhem 1906, 128].

On peut penser que les heurts entre Galilée et les tenants de l'aristotélisme auraient pu être évités. D'une part, Galilée n'avait que des arguments indirects en faveur de l'héliocentrisme. D'autre part, il connaît bien mieux que ses adversaires la relativité du mouvement comme l'atteste le passage du *Dialogue des deux grands systèmes du monde* où il explique que les expériences sur le mouvement se déroulent exactement de la même façon sur un navire à l'arrêt et sur un navire animé d'un mouvement rectiligne uniforme.

Quant à sa condamnation définitive suivie de son abjuration (1633-34), force est «de reconnaître et de déclarer aujourd'hui que la Logique était du parti d'Ossiander, de Bellarmin et d'Urbain VIII, et non pas du parti de Kepler et de Galilée ; que ceux-là avaient compris l'exacte portée de la méthode expérimentale et qu'à cet égard, ceux-ci s'étaient mépris» [*ibid.*, 136].

Duhem ne manque pas de s'apercevoir que, à ce compte-là, ce sont les noms d'Ossiander, de Bellarmin et d'Urbain VIII que devrait retenir l'histoire des sciences au lieu de ceux de Kepler et de Galilée, puisque les premiers étaient en possession et de la bonne logique et de la méthode expérimentale, alors que les seconds s'empêtraient dans «un réalisme illogique» ! Comment expliquer cet entêtement ? Les dernières pages de l'écrit de Duhem témoignent de l'embarras profond : le réalisme astronomique de Kepler et de Galilée étant «faux et nuisible» et de surcroît contraire à la logique, la grande vérité sentie par les coperniciens se cachaient

sous ce premier sens illogique, mais apparent et séduisant : [...] en exigeant que les hypothèses de l'Astronomie fussent d'accord avec les enseignements de la physique, on exigeait que la théorie des mouvements célestes reposât sur des bases capables de porter également la théorie des mouvements que nous observons ici-bas ; on exigeait que le cours des astres, le flux et le reflux de la mer, le mouvement des projectiles, la chute des graves fussent sauvés à l'aide d'un même ensemble de postulats formulés en la langue des Mathématiques. Or, ce sens là restait profondément caché ; ni Copernic, ni Kepler, ni Galilée ne l'apercevaient nettement ; il demeurait, cependant, dissimulé, mais fécond, au-dessus du sens clair, mais erronée et dangereux, que ces astronomes saisissaient seul. [*ibid.*, 140]

Cette dernière page de l'ouvrage mériterait d'être citée en entier ; citons seulement la conclusion :

En dépit de Kepler et de Galilée, nous croyons aujourd'hui, avec Ossiander et Bellarmin, que les hypothèses de la physique ne sont que des artifices mathématiques destinés à *sauver les phénomènes* ; mais grâce à Kepler et à Galilée, nous leur demandons de *sauver à la fois tous les phénomènes* de l'univers inanimé. [*ibid.*]

Pour ma part, je crois que le XXe siècle nous a malheureusement donné trop d'exemples d'intolérance et d'incursions arbitraires fatales du pouvoir politique dans les problèmes scientifiques pour que nous puissions absoudre les auteurs de ce genre de condamnations prononcées au nom de l'autorité idéologique quelle qu'elle soit sous prétexte de fidélité à la méthode scientifique canonisée. Si dans la science, il n'y avaient pas des visionnaires obstinés comme Kepler et Galilée qui osaient parier sur la fécondité future de l'héliocentrisme contre les évidences expérimentales, notre science serait probablement encore aristotélicienne, à condition toutefois qu'il fût permis à Aristote de rompre avec les méthodes des présocratiques et de Platon.

Bibliographie

Bolzano, Bernard

- 1843 Ein Paar Bemerkungen über die neue Theorie in Herrn Professor Chr. Doppler's Schrift : « Ueber das farbige Licht der Doppelsterne ... » *Annalen der Physik und der Chemie* 60, 83-88 ; *Gesamtausgabe* 1 18, 77-85.

Brenner, Anastasios

Duhem. *Science, réalité et apparence* (préf. de M. Boudot),

Duhem, Pierre

- 1902 *Le mixte et la combinaison chimique*, Paris ; Vrin, 2nd ed. 1994.
- 1903 *L'évolution de la mécanique*, Paris : Vrin, 2nd ed. (avant-propos de Paul Germain, introd. de A. Brenner) 1994.
- 1905-06 *Les origines de la statique*, I-II, Paris.
- 1906 *La théorie physique, son objet et sa structure*, Paris : Vrin, 2nd ed. (ed. P. Brouzeng), 1981.
- 1907 *Le mouvement absolu et le mouvement relatif*, Montligeon (= fragment du *Système du Monde*).
- 1908 *Σωζειν τα φαινόμενα. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paris : Vrin, 2nd ed. (introd. de P. Brouzeng) 1994.
- 1913-59 *Le système du monde*, Paris : Hermann.
- 1987 *Prémices philosophiques*, présent. et introd. S.J. Jaki, Leiden : E.J. Brill.
- 1997 *L'aube du savoir. Epitomé du Système du monde*, textes établis et présentés par A. Brenner, Paris : Hermann.

Euler, Leonhard

- 1960 *Opera omnia, ser. secunda*, XI, 2, ed. et introd. par C. Truesdell, Zürich : Orell Füssli.

Hiebert, Ervin N.

- 1970 Mach's use of the history of science, in *Historical and Philosophical Perspectives on Science*, ed. R. Stuewer, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, 5, 184-203.

Mach, Ernst

- 1872 *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes der Erhaltung der Arbeit*, Prag : Calve.
- 1883 *Die Mechanik in ihrer Entwicklung, historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig : 9th ed., 1933 (trad.fr. *La mécanique, exposé historique et critique de son développement*, par E. Bertrand, Paris : 1904).
- 1886 *Beiträge zur Analyse der Empfindungen*, Jena : Fischer.

- 1896 *Die Prinzipien der Wärmelehre, historisch-kritisch entwickelt*, Leipzig : 2nd. ed. 1900.
- 1896 *Populär-wissenschaftliche Vorlesungen*, Leipzig.
- 1905 *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, Leipzig : trad. fr. par M. Dufour, Paris : Flammarion, 1908.
- 1921 *Principien der physikalischen Optik. Historisch und erkenntnis-psychologisch entwickelt*, Leipzig.