

Quand les forces étaient indésirables : Ernst Mach et la Mécanique de Heinrich Hertz

Jacques Lambert

Université Pierre Mendès France (Grenoble 2) et IHPST, Paris

Résumé : Dans la troisième édition (1897) de sa *Mécanique*, E. Mach achève sa présentation historico-critique avec les *Prinzipien der Mechanik* de H. Hertz parus en 1894 après la mort de son auteur. Saluée par lui comme une oeuvre grandiose, cette reconstruction totale de la mécanique a surtout le mérite pour Mach d'aller dans la direction nouvellement donnée à cette science alors fondamentale : celle où le concept de force deviendrait superflu. En 1874, dans ses *Vorlesungen*, G. Kirchhoff avait en effet fixé un programme d'élimination de la force. Après un rappel des principaux traits de la Mécanique de Hertz, on verra apparaître, à travers les lignes que Mach lui consacre, un grand malentendu entre le courant positiviste et le réalisme transcendantal du physicien-philosophe du *tableau* qui devait inspirer le Wittgenstein du *Tractatus*. Paradoxalement, c'est Hertz qui a vraiment lutté pour la suppression d'un concept *illusoire* et pernicieux, alors que les positivistes pouvaient à la rigueur s'accommoder d'un concept *superflu*.

Abstract: In his third edition of *Mechanics* (1897) E Mach completes his historico-critical presentation with Hertz's *Prinzipien der Mechanik* published in 1894 after their author's death. Saluted by him as a grandiose work, that entire reconstruction of Mechanics has above all the benefit of going in the direction lately given to that fundamental science at that time, a direction in which the concept of force would be superfluous. In 1874 in his *Vorlesungen*, G. Kirchhoff had indeed set up a program of elimination of the idea of force. After recalling the major features of Hertz's Mechanics through the lines that Mach

devoted to him we shall see a great misunderstanding between the positivist trend and the transcendental realism of the physicist philosopher of the *picture* by which L. Wittgenstein was to be inspired. Paradoxically Hertz is the one who did fight to eliminate an *illusory* and pernicious concept whereas the Positivist could do with a *superfluous* concept.

E. Mach a consacré une section particulière (la neuvième) du second chapitre de sa *Mécanique* à l'examen des *Prinzipien der Mechanik* de H. Hertz. Il est superflu de dire qu'il la tenait pour une oeuvre fondamentale. Dans la liste des principaux fondateurs de la mécanique et de leurs écrits placée à la fin de son livre, c'est d'ailleurs Hertz et sa *Mécanique* qui terminent la liste ouverte avec Archimède (Mach, 1987, 496). Pour comprendre la place et le sens de l'examen de cette mécanique dans l'économie de l'ouvrage, il est nécessaire d'en rappeler d'abord le contexte. On s'attachera ensuite à présenter les aspects importants de l'épistémologie hertzienne de la mécanique afin d'apprécier finalement le jugement porté sur elle par Mach.

La présentation que donne Mach des *Prinzipien* ne fait pas partie d'une discussion générale sur les principes de la mécanique. Elle prend place dans des considérations relatives à son évolution. C'est essentiellement au titre d'une oeuvre ayant donné une nouvelle orientation à la science mécanique qu'elle est citée dans ce chapitre. Dans la perspective *historico-critique* qui est la sienne, Mach considère en effet que cette mécanique originale publiée en 1894 « réalise un progrès essentiel dans la direction ci-dessus indiquée » (Mach, 1987, 250) en fixant un nouveau programme à cette science. Or ce programme, tracé dans la section précédente, Mach estime l'avoir déjà lui-même défini en 1883. On pourrait le résumer en reprenant les propres termes de son auteur dans la conclusion de cette section : « Alors le concept de *force* sera devenu superflu » (Mach, 1987, 250). Une entreprise qui est plus inspirée pour Mach par un principe d'économie que par l'idéal d'une abolition. Derrière des similitudes apparentes et malgré des affinités certaines, les conceptions de Hertz et de Mach montrent en réalité un total désaccord, tout en s'intégrant dans une entreprise commune : celle d'une révision radicale du concept anthropomorphique de force.

Ce programme est un aboutissement paradoxal de la révolution newtonienne. On est en effet en droit de se demander comment la si difficile

mise en place du concept de force par Kepler, par Galilée, et par Newton a pu donner lieu à un renversement épistémologique et philosophique total. Si pour Newton la force est *naturellement* la *cause* du mouvement, pour Du Bois-Reymond, deux siècles plus tard, elle n'en est plus que la *mesure* (Du Bois-Reymond, 1848, Einleitung). On ne peut manquer d'être attentif à cette révolution positiviste qui fait passer un concept de l'idée d'une cause à celle d'une mesure. Mais ce n'est pas l'idée de mesure comme telle qui est à retenir comme essentielle pour notre propos dans cette révolution. La force newtonienne, après tout, inconnue dans sa nature, n'était déjà connaissable, quant à son existence, que par les *mesures sensibles* que le physicien pouvait en prendre. Les physiciens positivistes de la fin du XIX^e siècle sont allés beaucoup plus loin en refusant catégoriquement l'idée que la force soit la véritable cause du mouvement. En la considérant comme la fétichisation de simples relations et comme la projection dans le monde matériel de l'expérience subjective du mouvement volontaire. Cette position extrême et renversée par rapport à la conception newtonienne représente donc paradoxalement l'aboutissement d'un processus amorcé par Newton lui-même. La philosophie newtonienne en effet établissait une hiérarchie et même une coupure entre le plan des effets et celui des causes, entre l'ordre des agents véritables et invisibles et celui de leurs manifestations visibles et mesurables. Pénétrer dans le monde des forces, c'était alors s'élever vers le monde des causes et s'approcher du monde métaphysique. Le fameux *Pantocrator* du Scholie Général de la seconde édition des *Principia* avait dû se servir des forces pour l'animation de l'univers. Si la nature de ces agents, qu'elle soit matérielle ou spirituelle, demeurait inconnue, leur existence était manifeste dans leurs effets sous la forme des mesures sensibles. Tel est le sens des définitions des concepts fondamentaux placées par l'auteur en tête de son oeuvre ; celles-ci sont toutes présentées en termes de mesures sensibles. Pour éviter tout malentendu et afin d'écartier toute obscurité, inévitablement attachés aux représentations sensibles et anthropomorphiques de la force, les physiciens des Lumières avaient naturellement cultivé une forme d'*agnosticisme épistémologique* qui les avait conduit d'abord à privilégier une représentation analytique, pour finalement ne plus accepter qu'elle. L'idéal formulaire, déjà bien présent dans l'oeuvre de D'Alembert, est parfaitement exprimé dans la *Mécanique analytique* de Lagrange et dans le *Mémoire sur l'électrodynamique* d'Ampère dans lequel l'équation est seule qualifiée de « représentation exacte des faits » (Ampère, 1826, 4). Cet idéal trouve une parfaite expression dans la célèbre formule de H. Hertz précisément : « A la question : « Qu'est-ce que la théorie de Maxwell ? », je ne saurais donner de réponse à la fois plus

nette et plus courte que celle-ci : La théorie de Maxwell, c'est le système des équations de Maxwell (Hertz, 1892, 23) ». Or plusieurs raisons ont poussé certains physiciens de la seconde moitié du XIX^e siècle à considérer cette situation plus confortable que rationnelle, et plus commode que philosophiquement fondée. C'est dans le contexte général d'un réexamen parfois radical des contenus matériels des concepts et des principes de la mécanique, que Mach et Hertz ont proposé leurs programmes.

La critique de la notion de force s'appuie principalement sur trois arguments souvent conjoints. Premièrement, la force est un être obscur, confus, dont il importe de limiter ou d'éviter l'emploi. Ensuite, la force est un concept inutile dont il serait souhaitable d'éviter l'usage. Enfin le concept de force doit être radicalement critiqué dans la mesure où il s'identifie avec celui, lui-même irrecevable, de cause. Si les deux derniers arguments sont évidemment à l'opposé de la doctrine newtonienne, le premier s'y trouve et c'est sans doute lui qui fut à l'origine des difficultés survenues dans ses développements successifs. Nous avons vu qu'inconnue dans sa nature, la force n'est connue que par les mesures sensibles que nous en prenons. Ajoutons que cette séparation, garante de la métaphysique chez Newton, est intimement mêlée à l'idéal formulaire puisque F représente dans les équations non pas la force mais sa grandeur mathématique. Distinction essentielle et malheureusement négligée par bien des commentateurs ! On ne reviendra pas sur la critique de l'idée de la cause *produisant* un effet. Quant au caractère oiseux de la force, élément fondamental de la mécanique hertziennne, il apparaît déjà très nettement, associé aux deux autres arguments, dans les *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement* de Lazare Carnot. Dans la Préface de cet ouvrage de 1803, le savant considère deux approches de la mécanique. Pour l'une, les forces sont comprises comme les causes des mouvements ; pour l'autre, le mouvement est considéré en lui-même sans qu'il y ait besoin de recourir à des considérations sur sa cause. Si la première démarche est la plus commune et adoptée par l'ensemble des physiciens, c'est pour des raisons d'ordre didactique et parce qu'elle paraît plus simple. « Mais elle a le désavantage d'être fondée sur une notion métaphysique et obscure qui est celle des forces. Car quelle idée nette peut présenter à l'esprit en pareille matière la notion de cause ? Il y a tant d'espèces de cause ! Et que peut-on entendre dans le langage précis des mathématiques par une force, c'est-à-dire par une cause double ou triple d'une autre ? » (Carnot, 1803, Préface). Dans cette perspective, la force justifie alors son utilité comme élément de calcul. Ce point de vue a été nettement exposé par Barré de Saint-Venant, auteur en 1851, de *Principes de mécanique fondés sur la cinématique* : « Dans le fait, quel que soit un problème

de Mécanique terrestre ou céleste proposé, les forces n'entrent jamais ni dans les données, qui sont toujours des choses sensibles, ni dans le résultat cherché de la solution. On les fait intervenir pour résoudre, et on les élimine ensuite afin de n'avoir finalement que des temps et des distances ou des vitesses comme en commençant » Et encore : « On conçoit très bien qu'un jour, à la place de ces sortes d'intermédiaires d'une nature occulte et métaphysique, on puisse n'introduire et n'invoquer, pour la solution de divers problèmes de l'ordre physique, que des lois avérées des vitesses et de leurs changements suivant les circonstances » (Barré de Saint-Venant, 1865).

Ces données essentielles étant rappelées, on comprendra aisément le sens général du programme, plus développé et actualisé à la fin du siècle, par rapport auquel Hertz et Mach ont eu à se déterminer.

En 1874, soit neuf ans avant la Mécanique de Mach et vingt ans avant celle de Hertz, Gustav Kirchhoff (1824-1887) publiait ses *Vorlesungen über mathematische Physik*. Le tome premier, consacré à la mécanique, contenait un véritable programme qu'on peut résumer en deux tâches : celle d'une mécanique dans laquelle la force n'est plus un concept fondamental ; celle d'une théorie qui ne doit être qu'une pure description. « La Mécanique est la science du mouvement ; sa tâche se définit comme suit : décrire complètement et de la manière la plus simple les mouvements qui ont lieu dans la nature » (Kirchhoff, 1874, I, §1, 1). L'idéal d'une description pure et simple substitué à celui d'une explication, corollaire lui-même d'une physique traitant des causes, accompagne celui de l'élimination de la force identifiée avec la cause. On notera que Mach revendique le fait d'avoir, avant Kirchhoff, proposé l'idéal épistémologique d'une pure et complète description (Mach, 1922, III, 2, 49). Pour Kirchhoff, le concept de force a sans doute été utile mais la représentation de cause qui lui est attachée, et avec elle celle d'un effort (*Streben*) sont dangereuses. Kirchhoff rencontre d'autre part l'un des grands problèmes de la Mécanique, celui de ses principes. Dans l'idéal d'une science rigoureuse présentée formellement, la mécanique a toujours cherché quels étaient ses concepts fondamentaux et ses principes fondamentaux en réduisant les uns et les autres à un nombre minimum. Dans la mécanique, la question est d'autant plus délicate qu'on peut adopter à la base des éléments faisant appel à l'intuition intellectuelle ou considérés comme des données de l'observation. Pour Kirchhoff, la force n'est pas un concept fondamental mais un concept dérivé à partir de celui de masse et de celui d'accélération, lui-même dérivé de ceux de temps et d'espace et de celui de vitesse. On a donc trois concepts fondamentaux : ceux de masse, de temps et d'espace. Quant à la *définition* de la force, elle est

totale donnée dans l'équation $F = M \cdot a$. Ce qui signifie encore que la force est essentiellement, comme pour Barré de Saint-Venant, un être mathématique. La réciproque veut que tout énoncé de la Mécanique dans lequel on parle de force puisse être traduit (*übersetzt*) en équations mathématiques.

Vingt ans après les *Vorlesungen* de Gustav Kirchhoff, Heinrich Hertz réaffirme en 1894 la nécessité d'une distinction entre concepts premiers et concepts dérivés. Dans la guerre que se livraient alors mécanistes et énergétistes, la question de la primauté et de la hiérarchie à établir dans les concepts et dans les principes, question qui a toujours préoccupé les mécaniciens, était devenue particulièrement aiguë et avait pris un tour philosophique. Elle ne pouvait guère avoir de sens pour le relativisme de Mach, sinon celui d'une préférence commandée par une certaine efficacité touchant des structures dont le statut n'est jamais définitif. Elle avait au contraire toute sa raison d'être et même une grande importance dans la philosophie réaliste de Hertz. En quel sens ?

Heinrich Hertz (1857-1894) après des études d'ingénieur, s'est consacré à la recherche à Berlin auprès de Helmholtz et de Kirchhoff avant d'occuper des postes à Karlsruhe puis à Bonn où il a succédé à Clausius. Atteint par une très grave maladie qui le condamnait à une fin prochaine, celui qui fut pour le monde savant dans son entier un prestigieux expérimentateur, se consacra, durant ses derniers mois, à la tâche théorique d'une reformulation de la mécanique dans son ensemble. Il ne faudrait pas pour autant, comme on l'a semble-t-il trop fait, conclure hâtivement de ces circonstances que les *Prinzipien der Mechanik*, parus après la mort de leur auteur, sont une oeuvre de diversion ou de reconversion. Le contraste n'est qu'apparent entre les fameuses expérimentations sur les ondes et l'effet photo-électrique d'une part, et les considérations théoriques développées pour proposer une mécanique nouvelle, fondée sur des liaisons rigides d'autre part. Nous préférons voir dans cette dernière l'ultime message qui, par son abstraction et sa généralité, parachève une oeuvre, lui confère son unité, sa cohérence et sa sublimité. En premier lieu parce que les préoccupations et les modèles mécaniques sont omniprésents dans les travaux antérieurs de Hertz. Helmholtz, dans sa préface à l'édition des *Prinzipien*, a justement rappelé l'influence exercée sur eux par les travaux d'électrodynamique, notamment par l'idée de la transmission d'une action électrodynamique. C'est évidemment ici le mot *transmission* qui est primordial. Qu'on se rappelle aussi le prestige dont jouissait alors la « physique britannique » vouée aux modèles mécaniques ! Les noms diversement célèbres aujourd'hui d'Andrade, de

Maxwell et surtout de Lord Kelvin, illustraient cette école que L. Boltzmann tenait à faire découvrir à la physique continentale.

Une autre raison incite à voir dans la *Mécanique* un aboutissement des travaux précédents. C'est que cette mécanique dont l'abstraction a été saluée par tous les savants, de Mach à Poincaré en passant par Boltzmann, apparaissait aux yeux de son auteur comme la théorie philosophique et formalisée des relations les plus générales dont les divers domaines de la physique n'étaient que des manifestations particulières. La structure du traité reproduit d'ailleurs dans ses formes didactique et épistémologique cette partition philosophique. Le livre se compose en effet de deux parties nettement séparées, l'une mathématique, l'autre, physique. La première traite des formes mathématiques dans lesquelles *pourront* prendre place les valeurs et les grandeurs physiques. La seconde partie propose *ensuite* un système de grandeurs physiques. Cette présentation est en conformité avec le titre du livre et plus fondamentalement avec le sens de l'entreprise de Hertz. Celui-ci, face aux idées dominantes des énergétistes (Ostwald, Helm) rétablit la mécanique dans son statut de science fondamentale pour l'ensemble de la physique. Il considère d'autre part ses principes, à savoir les masses et les mouvements, du double point de vue de l'existence et de la connaissance. La réalité physique est fondamentalement composée de masses et de mouvements qui sont aussi les principes fondamentaux d'explication de cette réalité. La mécanique au sens de Hertz doit être cette science générale, nécessairement abstraite, des principes fondamentaux de la réalité.

Mais surtout, Hertz fait précéder son livre d'une *Einleitung* dont la lecture est essentielle à plus d'un titre. On sait que le *Tractatus logico-philosophicus* de L. Wittgenstein, dans lequel Hertz est cité au moins deux fois, en 4.04 et en 6.361 (Wittgenstein, 1921, 37,108), lui doit sa théorie du tableau (*Bild*), élément central de la première philosophie du philosophe, principalement exposée en 3.31 et suivants (Wittgenstein, 1921, 24-25). La théorie du tableau vaut évidemment en premier lieu pour éclairer les conceptions de H. Hertz lui-même.

Selon Hertz, la tâche (*Aufgabe*) du savant, dans sa recherche d'une connaissance consciente de la nature, revient à former des images (*Bilder*) de manière à anticiper les expériences futures à partir de ses expériences passées :

Nous nous formons des images ou des symboles (*Scheinbilder oder Symbole*) des objets extérieurs, de telle sorte que les conséquences nécessaires des images de la pensée sont toujours les images des conséquences nécessaires dans la nature des objets représentés. Pour que cette exigence puisse être satisfaite, il doit y avoir certaines conformités entre la nature et notre

pensée. L'expérience nous enseigne que cette exigence peut être satisfaite et que par conséquent de telles conformités existent dans les faits. (*also solche Uebereinstimmungen in der That bestehen*). (Hertz, 1894, Einleitung, 1)

Ce passage met en pleine lumière le concept fondamental de *conformité* (*Uebereinstimmung*). C'est cette notion qui constitue le vrai motif de la discussion. Elle met en jeu une participation à une même forme ou une même catégorie rendant possibles pour l'une, les occurrences dans l'ordre de la nature, pour l'autre, les occurrences dans le tableau de la pensée. Les représentations ou images, toujours schématiques et relationnelles, assurent le passage entre les deux ordres de réalité. On saisit là le fait premier, le fait dominant de cette épistémologie, à savoir son aspect *transcendantal*. On comprend aussi en conséquence le rôle primordial que joue l'image ou la représentation dans une philosophie prenant acte dès le départ de deux ordres placés si l'on peut dire l'un en face de l'autre. L'exigence (*Forderung*) d'une conformité des conséquences des images avec les images des conséquences réclame trois conditions nettement formulées suivant trois ordres hiérarchiquement donnés.

Les images (ou tableaux) doivent d'abord être admissibles ; elles doivent ensuite être correctes ; elles doivent enfin être appropriées. A la base des exigences, l'admissibilité (*Zulässigkeit*) se rapporte à la nature même de l'esprit. Les principes logiques, comme celui de non contradiction, jouent un rôle déterminant pour bannir les opérations et les représentations qui seraient contraires aux lois mêmes de la pensée. Cette condition de la possibilité *logique* sera bien présentée par Wittgenstein dans le *Tractatus* en 3.02 et suivants, spécialement 3.0321 (Wittgenstein, 1921, 19-20) (La multiplicité de la forme logique met en jeu cette exigence : le langage par exemple permet de dire que Louvain est au nord et au sud de Paris, mais le graphique l'interdit). Avant toute référence à la réalité, certains énoncés sont donc inadmissibles dans une mécanique en raison de leur nature illogique (On entrevoit les apories posées par la mécanique quantique en appréciant du même coup son aspect philosophique fondamental).

Au plan suivant, l'exigence que les images soient correctes (*Richtigkeit*) prend en compte le rapport à la réalité, et donc la référence aux résultats de l'expérience qui permettent d'apprécier leur adéquation. Après la possibilité du tableau, sa réalité, après son essence, sa raison d'être : assurer la relation entre la pensée et le réel.

Enfin, la propriété des images d'être appropriées (*Zweckmässigkeit*) fait appel à des critères de choix divers mais précis comme ceux qui font préférer à une image celle qui représente un plus grand nombre de relations essentielles (la plus différenciée) ; ou, dans le cas d'un nombre

égal de relations, celle qui les présente le plus simplement. C'est ici la sphère des notations (*Bezeichnungen*), des définitions (*Definitionen*), et des abréviations (*Abkürzungen*).

A la question de savoir si une image est admissible ou non, nous pouvons répondre par oui ou par non sans la moindre ambiguïté, et notre décision restera toujours valable. Nous pouvons aussi décider sans ambiguïté si une image est correcte ; mais nous ne pouvons le faire qu'en fonction de l'état actuel de nos expériences et en réservant une place à des expériences ultérieures plus élaborées. Mais nous ne pouvons pas décider sans ambiguïté si une image est ou n'est pas appropriée. . . Une image peut être adaptée à un but, une autre à un autre but. Ce n'est qu'en mettant progressivement à l'épreuve de nombreuses images que nous pouvons parvenir à obtenir enfin la plus appropriée (Hertz, 1894, Einleitung, 3)

Cette théorie du tableau permet à Hertz d'apprécier au mieux les images que les tenants de la mécanique classique ont données ou donnent encore de la réalité. Les deux concepts fondamentaux classiquement proposés quant à la nature et quant à la cause du mouvement, à savoir celui de la force et celui de l'énergie, sont ainsi examinés avec le critère de la triple exigence. Un rapide examen des arguments invoqués par Hertz est indispensable pour aller au coeur de la philosophie scientifique hertzienne.

L'école de la force a joué un rôle primordial et évident dans les origines et le développement de la dynamique classique. Elle privilégie les concepts d'espace, de temps, de force et de masse. Elle a naturellement pour elle l'autorité de son histoire puisqu'elle s'identifie avec les débuts spectaculaires de la dynamique. C'est la voie royale ouverte par Galilée et par Newton. La force, identifiée avec la cause du mouvement, est le concept-clé. Sans doute apparaît-il défini d'une part au moyen de ses mesures mathématiques et d'autre part dans ses relations avec d'autres concepts comme ceux de masse et d'accélération, mais il se présente comme premier dans les principes et comme indépendant dans la représentation. Or un examen plus détaillé de cette représentation, moins claire qu'il n'y paraît, révèle des contradictions qui font obstacle à son admissibilité. Cet examen manifeste d'autre part une certaine confusion, due à l'enchevêtrement du concept avec celui de masse, qui doit conduire à revoir sa condition de correction. On interprète par exemple l'expérience de la fronde en faisant intervenir une force exerçant une « force » centrifuge (une pseudo-force !) quand on peut parler d'une masse agissant comme masse d'inertie sollicitant un effort de la main. On prend ainsi deux fois en compte l'effet de l'inertie : une fois comme masse et une fois comme force (Hertz, 1894, Einleitung, 7). Dans l'article qu'il a consacré à la mécanique de Hertz, Poincaré approuve la critique qui en

est faite de la notion de force, affirmant qu'avec le système classique, il est impossible de donner de la force et de la masse une idée satisfaisante. Or si Poincaré partage le point de vue de Hertz en ce qui concerne la critique de la notion de force, Hertz n'aurait pas partagé celui de Poincaré relativement à celle de la masse. Celle-ci, au contraire de la force, admet, pour Hertz, une définition précise et satisfaisante qui se trouve à la base de la mécanique et de notre compréhension de la réalité physique. Pour lui : « le nombre des particules matérielles dans un espace quelconque, comparé avec le nombre de particules matérielles dans un espace déterminé en un temps fixe est appelé la masse contenue dans le premier espace » (Hertz, 1894, I, 1, 53).

L'école énergétique, pour sa part, très en vogue au temps de Hertz, avec Ostwald et Helm, reconnaît dans l'énergie le concept premier. La force se trouve ainsi définie dans un second temps. Plus proche de l'expérience directe (positions, vitesses), la conception énergétique paraît plus appropriée à Hertz que la conception dynamique classique. Autre intérêt et autre avantage : elle assure plus aisément un passage de la mécanique à la physique. Son admissibilité pose cependant de graves problèmes. Le concept d'énergie fait appel à une représentation substantielle. Or que peut valoir la représentation d'une énergie potentielle ? Que vaudrait une énergie potentielle négative ? Poincaré note encore à propos du concept d'énergie que si on voit bien dans chaque cas particulier ce qu'est l'énergie, on peut au contraire difficilement s'en faire une représentation générale (Poincaré, 1991, 68). Pour Hertz, qui participe au courant positiviste d'une critique radicale de la force, il s'agit de construire ou, plus exactement, de montrer qu'on peut construire une mécanique sans le secours des concepts de force ou d'énergie, à partir de notions admissibles, n'enfermant dans leurs représentations aucune contradiction. Ces concepts premiers sont l'espace, le temps et la masse. On se représentera au besoin une masse cachée (*Verborgene Masse*) et donc aussi au besoin un mouvement caché (*Verborgene Bewegung*).

« Ce que nous avons l'habitude de désigner par force, écrit Hertz, aussi bien que par énergie, n'est rien d'autre en dernière analyse pour nous qu'un effet de masse et de mouvement (*Wirkung von Masse und Bewegung*), mais il n'est pas nécessaire qu'il s'agisse toujours d'une masse et d'un mouvement déterminables d'une manière grossièrement empirique ». (Hertz, 1894, 29). Cette citation appelle deux remarques. La première concerne la légitimité d'un recours à des réalités cachées. C'est la raison pour laquelle Hertz précise qu'« il y a en réalité plus de choses que celles qui peuvent tomber sous les sens » (Hertz, 1894, 31). En fait, aucun physicien ne peut se soustraire à cette nécessité et

les plus célèbres parmi les contemporains de Hertz avaient eu recours à des masses cachées (Maxwell), à des atomes-vortex (lord Kelvin), à des systèmes cycliques de mouvements cachés (Helmholtz). La deuxième remarque se présente plus encore sous la forme d'une objection : n'y a-t-il pas une contradiction à s'opposer à l'introduction des concepts de force et d'énergie alors qu'on fait appel à des masses et à des mouvements cachés ? La réponse est claire : il s'agit dans le cas de la force et dans celui de l'énergie de concepts dérivés dont la fonction est essentiellement mathématique. Dans une telle perspective, la fonction de la force est celle d'un coefficient. La question de savoir si un concept est premier ou dérivé est au coeur de la crise philosophique de la mécanique dont on peut dire que toute l'histoire a été traversée par cet épineux problème. Celui-ci concerne d'ailleurs de près ou de loin tous les systèmes formalisés et axiomatisés. Il pose la question du choix des termes premiers et des axiomes et, derrière elle, celle de la nécessité ou de la simple commodité des principes.

La grande idée de Hertz consiste à se représenter toutes les masses d'un système libre comme liées. Ces liaisons s'expriment dans des équations différentielles du premier ordre, linéaires et homogènes par rapport aux coordonnées. Rejetant la dynamique du point matériel, Hertz pense que c'est toujours un corps qui est donné et le déplacement physique d'un corps. « En vertu de ses liaisons, le mouvement d'un système libre est tel que le déplacement physique soit aussi droit que possible ». Tout système libre persiste dans son état de repos ou de mouvement uniforme le long d'une trajectoire de moindre courbure ou la plus droite. Les équations de Lagrange et de Hamilton sont déduites de ce principe et les forces qui y figurent deviennent de simples *multiplicateurs*. Ce principe fondamental de la mécanique appelé principe de la trajectoire de moindre courbure, est tiré par Hertz de la synthèse du principe d'inertie et du principe de moindre contrainte de Gauss. Toute déviation s'explique par des liaisons rigides avec d'autres masses, manifestes ou cachées.

Dans le passage consacré à la mécanique de Hertz (*La mécanique*, II, 9, §§ 1-5), E.Mach prend soin de rappeler que son propos n'est pas de faire une critique ni même de se livrer à un examen tant soit peu détaillé. La rapide exposition qui est faite des *Prinzipien* doit simplement montrer, en 1897, un aboutissement récent et très original de la mécanique « présentée dans son développement historique-critique ». Les cinq paragraphes qui lui sont consacrés demandent donc que le lecteur fasse un effort pour percevoir les critiques derrière les lignes et développe par lui-même les arguments dans le sens de l'épistémologie et de la philosophie de Mach. Il doit le faire à partir d'affirmations rapides, de jugements

pour la plupart à peine esquissés, parfois sous-entendus.

On rappellera d'abord qu'au moment de cette publication la mécanique était encore considérée le plus souvent comme la reine des sciences. A ce titre, elle constituait la base de toute la physique et ses principes devaient être considérés comme les principes de l'ensemble de la philosophie de la nature. Plus encore : elle apparaissait comme le modèle de toute rationalité vers lequel devaient tendre toutes les sciences. Les discussions touchant ses principes vont donc bien au delà de ce que pourraient représenter aujourd'hui de simples problèmes méthodologiques ou épistémologiques. On le voit immédiatement en considérant la thèse de Mach sur les principes de la mécanique. Dans le conflit philosophique qui oppose radicalement mécanistes et énergétistes, Mach condamne toute prétention à fonder un savoir certain sur quoi que ce soit de permanent et de définitif. Bref, fidèle au programme positiviste, il refuse catégoriquement toute idée d'absolu. Cette critique le rapproche naturellement des énergétistes dans la mesure où ces derniers font des théories de simples instruments. Mais s'il partage le point de vue énergétiste qui refuse de privilégier la mécanique comme une science fondamentale, l'énergie mécanique n'étant qu'une des formes de l'énergie, il n'est pas prêt pour autant à déclarer avec Ostwald que « c'est dans l'énergie que s'incarne le réel » (Ostwald, 1910, V). Dans la condamnation de la thèse qui voit dans les atomes les éléments permanents et fondamentaux de la réalité, ce n'est pas l'idée des atomes en tant que tels qui est condamnée, mais celle qu'ils puissent constituer une assise absolue, c'est-à-dire indépendante et non révisable. Nous rencontrons en fait sur la question de la mécanique ce qui pour nous constitue le coeur de la pensée de Mach : *une philosophie de l'expédient*. Il en va de même lorsqu'il est question des théories et des modèles. Entre l'emploi d'images reconnu inévitable et même encouragé par Ludwig Boltzmann et le « nous n'avons besoin d'aucune image » d'Ostwald, Mach défend, peut-on dire, le point de vue du meilleur expédient : si les images permettent de mieux rendre compte, de mieux prévoir, de mieux économiser, pourquoi ne pas les maintenir, à condition qu'elles soient prises pour ce qu'elles sont, c'est-à-dire des instruments commodes ne prétendant à aucune description de ce qui serait la réalité fondamentale ?

Quand il critique la présentation faite par Hertz de la mécanique classique, Mach signale des considérations qu'il juge intéressantes même si son point de vue est différent. Ainsi la rapide allusion à son désaccord sur le kantisme et l'atomisme inhérents à la mécanique hertziennne s'explique par le propos du livre qui n'est pas d'entrer dans une discussion approfondie sur le rapport entre la théorie et la réalité. Elle révèle

néanmoins une opposition totale sur une question de fond. L'allusion au kantisme tout d'abord vise l'aspect transcendantal inévitablement attaché à l'idée d'une conformité entre le monde de la pensée et celui de la réalité, d'un accord supposé entre les lois mêmes de la pensée et la structure de la réalité. Pour Mach, partisan d'un empirisme intégral, il ne peut s'agir que d'un faux problème que peut facilement mettre à jour la méthode génétique. En fait, pour reprendre une formule chère au physicien viennois, nous avons l'habitude d'appeler métaphysiques ces concepts dont nous avons oublié comment nous sommes parvenus à eux. Comme dans le mythe d'Antée qui retrouvait sa force en touchant le sol, il faut pour chaque concept refaire sa genèse et remonter au sol des besoins qui en ont motivé l'apparition et l'admission pour en suivre ensuite les successives adaptations. Créé par le besoin et la commodité pour l'adaptation, résultat de la seule expérience, le concept révélera de lui-même sa pertinence ou au contraire son inutile maintien. La conception d'une conformité ajoute à l'illusion d'un faux problème la pensée d'un absolu que l'empirisme radical rejette comme inadmissible. C'est la même raison qui pousse Mach à refuser l'atomisme. Aucune entité ne peut prétendre au titre d'une réalité absolue, c'est-à-dire indépendante, définitive et permanente. L'expérience ne saurait nous livrer autre chose que du relatif, du fonctionnel et du provisoire. C'est cette philosophie de l'expédient qui lui faisait déjà écrire en 1872, dans son travail sur l'histoire et l'origine du principe de conservation du travail, que nous devons nous convaincre que la mécanique « ne tient plus » derrière les phénomènes.

Sur la question des images ou du tableau, Mach admet les exigences logiques comme les seules véritablement nécessaires. Cette nécessité n'a évidemment, pour un positiviste, rien de métaphysique ni de transcendantal. Les lois de la pensée n'appartiennent pas au ciel pur de la pensée. Tout au plus s'agit-il d'un fait universel dont rendraient sans doute compte l'organisation physiologique humaine et son évolution. Partageant les mêmes structures, soumis aux mêmes lois physiologiques, et ayant hérité d'une même histoire dans leurs relations avec un même milieu, les hommes présentent nécessairement une certaine universalité dans leur comportement.

Quant à l'exactitude ou au caractère correct (*Richtigkeit*), il s'explique aussi naturellement comme le résultat de processus d'adaptation. Mach précise que « nos concepts se sont en fait *créés eux mêmes*, mais cette création n'est pas pour cela tout à fait arbitraire; elle a sa racine dans une lutte pour l'adaptation à l'entourage sensible » (Mach, 1987, 251). Aucune construction par ailleurs ne peut prétendre à un état

définitif. Toute l'évolution de la connaissance est en effet marquée par l'amélioration de nos prévisions à partir des leçons de l'expérience en vue d'une plus grande maîtrise du milieu. La concordance ne repose donc sur rien d'*a priori*. L'expérience qui, seule, la fonde, peut aussi bien l'infirmier. L'exigence de la commodité semble pouvoir être expliquée par le principe d'économie cher à notre auteur. On remarquera toutefois que le principe d'économie déborde largement le seul caractère approprié tel qu'il est envisagé par Hertz puisqu'il règle l'ensemble du savoir et n'est pas réservé aux formes conventionnelles des abréviations et des définitions. L'ensemble de la connaissance, pour Mach, est soumis au régime de l'économie de la pensée et l'on sait les critiques, parfois ironiques, que Max Planck a formulées contre cette généralisation.

Le reproche de manque de clarté que Hertz adresse aux systèmes d'explication reposant sur la notion de force paraît injustifié aux yeux de Mach. Il juge que les obscurités ont été exagérées et qu'elles tiennent le plus souvent à des maladresses rencontrées dans des expositions qui appartiennent au passé. On ne saurait donc imputer à l'ensemble d'un système des défauts inhérents à certaines présentations obsolètes. Dans tous les cas passés en revue par Mach après Hertz, il semble toujours préférable de proposer des modèles ou des explications en se référant à des forces plutôt qu'à des masses cachées ou à des mouvements cachés. Pour prendre un exemple très simple, lorsqu'un morceau de fer est posé sur une table, on peut très bien parler de deux forces en équilibre, celle qui est attachée au poids du fer et celle que présente l'élasticité de la table, étant entendu par ailleurs que toutes deux sont parfaitement vérifiables. La critique de l'école énergétiste est également exagérée et Mach réagit nettement contre l'objection d'un point de vue finaliste au sujet des principes de minimalité. On pense bien qu'il n'est pas question pour lui de souscrire à une telle interprétation métaphysique.

Pourtant, si la critique paraît sévère, certaines idées contenues dans le livre de Hertz représentent « un très grand progrès » aux yeux de Mach. Trois éléments essentiels semblent forcer l'admiration. Ne figurent, d'abord, dans les formules que des grandeurs qui peuvent être effectivement observées. Ensuite, tout le système repose sur trois concepts, ceux de temps, d'espace et de masse. Enfin, un seul principe, combinaison de celui de l'inertie et du principe de Gauss de moindre contrainte, permet de rendre compte de tous les mouvements. La référence expresse aux données de l'expérience et une telle démonstration d'un idéal d'économie ne peuvent que séduire le maître de l'empirio-criticisme qui applique la méthode génétique pour comprendre comment Hertz en est arrivé à ses conclusions. Fort logiquement il remonte à Galilée pour saisir le

moment décisif pendant lequel apparaît précisément la notion de force pour traduire une liaison associée à l'origine du mouvement. On peut en somme procéder de deux manières : soit en remplaçant toute liaison par des forces, soit, au contraire, en se représentant tout ce qui apparaît comme une force comme étant le simple effet d'une liaison. Ce judicieux rappel permet de comprendre la légitimité de deux points de vue tout en montrant les raisons historiques de certains choix pour des raisons de commodité. Il conduit surtout le lecteur à ce fait essentiel, à savoir l'idée fondamentale d'une dépendance réciproque des mouvements des masses. Tel est en effet le fait premier. Ajoutons que ce fait est parfaitement décrit, ou représenté au sens ampérien, par des équations différentielles linéaires entre les coordonnées des masses. Dès lors, on peut dire que ce sont ces équations qui représentent la description exacte des phénomènes, qu'on prenne en considération des liaisons ou qu'on ait recours à des forces. Le point de vue de Mach consiste donc à justifier l'une et l'autre de ces théories mais aussi du même coup à ne guère voir d'intérêt et même de sens à privilégier telle ou telle interprétation en voulant décider de la vérité de l'une ou de l'autre. Nous sommes là au coeur du problème. Au coeur également de la philosophie de la connaissance du physicien viennois. Avant de conclure, Mach salue encore « l'admirable construction idéale de la mécanique que Hertz a développée » (Mach, 1987, 254-255) et dans laquelle le résidu physique est à peine identifiable. En notant son caractère abstrait et formel, il ne manque pas de comparer l'entreprise de Hertz avec celle de Descartes qui refusait d'attribuer à la matière d'autres propriétés que l'étendue et le mouvement. Un tel rapprochement n'est sans doute pas seulement commandé par la seule identification d'une cinématique généralisée ; il permet habilement de montrer par analogie les présupposés métaphysiques d'une mécanique pourtant guidée par le rejet d'entités obscures et fictives. Exactement comme la géométrie du mouvement de Descartes avait pu se croire débarrassée de tout présupposé par le rejet des qualités occultes de la scolastique.

Si l'on se tourne à présent vers les sources psychologiques de cette mécanique, on les trouvera sans peine dans la marque des travaux antérieurs de Hertz en électricité et en magnétisme. C'était déjà l'idée avancée par Helmholtz dans sa Préface aux *Prinzipien*. Après avoir montré que les actions électriques et magnétiques à distance n'étaient dans les faits que les conséquences de mouvements de déplacement dans un milieu continu, il était assez naturel ou simplement tentant de ne pas faire d'exception pour les forces gravitationnelles. Cette remarque nous paraît doublement importante. D'abord parce que Mach la fait figurer dans un

paragraphe qu'il consacre à une considération psychologique et qu'elle semble révéler une certaine attitude intellectuelle face au problème du continu. On rappellera que la question des motifs psychologiques était alors très importante dans le débat sur la légitimité ou le refus du concept de force. Pour certains, en soutien de *l'école du fil*, nous apprécions avec un grand degré de clarté la traction et la tension d'un fil tendu (Reech, 1852). En 1895, soit un an après le livre de Hertz et deux ans avant le texte d'E. Mach, Clémentitch de Engelmeyer avait écrit, par exemple, dans la *Revue philosophique* que « notre expérience de chaque jour nous prépare mieux à comprendre la notion de force que celle de masse » (Clémentitch de Engelmeyer, 1895, 517) Ensuite, et c'est là peut-être la manifestation d'une attitude fondamentale, nous avons affaire à un raisonnement exemplaire par son caractère asymptotique. Il consiste à refuser les exceptions et les limites disciplinaires avec ce qu'elles comportent de conventionnel, d'arbitraire et de provisoire : avons-nous une raison irrécusable de penser qu'il n'en va pas dans le domaine de la dynamique comme dans les autres domaines de la physique ? On sent dans le même temps qu'une telle attitude n'est rendue possible que par la conviction de l'existence d'un système de principes très généraux. Or cette pensée est évidemment étrangère à Mach. Une autre raison d'ordre psychologique pousse l'esprit dans le sens d'une représentation hertzienne. En donnant d'un coup toutes les masses et tous les mouvements dans un milieu, elle montre sa supériorité incontestable sur toutes les autres représentations fragmentées dans lesquelles ne sont donnés isolément que des rapports d'accélération de masses. Enfin, comme nous l'avons signalé dès le début, il est indubitable pour Mach que la physique, dans sa phase actuelle, se développe dans la direction indiquée par Hertz. Pourtant, si cette théorie est formellement plus belle et plus unitaire que la théorie courante, elle doit céder en revanche à cette dernière dans le domaine des applications. Admettre l'hypothèse des masses et des mouvements cachés dans des cas simples revient à compliquer inutilement les choses, et non sans danger dès lors qu'il est question d'êtres fictifs. Face à cette hypothèse on préférera les accélérations, qui sont des données de fait. Mach s'était d'ailleurs déjà signalé dans le même sens bien que différemment, par un article capital intitulé *Ueber die Definition der Masse*. Ce travail, qui date de 1867, soit près de dix ans avant les leçons de Gustav Kirchhoff, fut refusé par Poggendorff (qui avait déjà refusé le fameux *Ueber die Erhaltung der Kraft* du tout jeune Helmholtz !) pour ses *Annalen*. Or dans les cinq petites pages qui devaient paraître l'année suivante dans le *Repertorium der Experimentalphysik*, Mach esquissait déjà son programme et l'essentiel de sa philosophie. On y trouve en effet déjà net-

tement affirmée la nature fonctionnelle de la science et plus généralement de la connaissance. Là se trouvent sans doute aussi bien l'originalité que la justification de l'attitude fondamentale de Mach face aux différents problèmes de la physique et de la philosophie. Il ne s'agit pas en effet d'un développement ou du simple aboutissement d'un courant de pensée amorcé dans la mécanique newtonienne. Ni d'une philosophie privilégiant un idéal formulaire afin d'éviter des représentations fallacieuses et des discussions stériles ou inconsistantes. La conception fonctionnelle et relationnelle de la connaissance, telle qu'elle est déjà affirmée dans cet article, engage une véritable révolution (Mach, 1868).

Quoi qu'il en soit, dans ce mouvement général de remise en question de l'emploi du concept de force, des différences parfois considérables apparaissent. Une chose est de penser qu'une notion est superflue ou, pour dire les choses autrement, qu'elle ne joue plus le rôle qui fut le sien dans le développement d'une science ; et autre chose est d'affirmer qu'elle est irrecevable parce qu'elle ne répond pas aux conditions d'admission dans un corps de concepts et de principes clairs et fondamentaux. Des nuances s'introduisent encore entre ces deux thèses. On peut, par exemple, dans le simple ordre des faits, et non dans celui du droit, penser qu'un concept comme celui de force, doit être éliminé parce qu'il ne peut plus jouer le rôle qui a été le sien historiquement. On ajoutera parfois que le fait de le maintenir n'est pas indifférent ni incommode mais pernicieux et qu'il fossilise la pensée dans des représentations qui ne sont pas seulement caduques mais devenues intenable et pernicieuses. On peut au contraire, par une analyse conceptuelle poussée et pour répondre à des exigences d'ordre philosophique, refuser toute légitimité à ce même concept tenu alors pour irrecevable comme un monstre conceptuel. C'est évidemment cette dernière position qui est celle de H. Hertz.

En conclusion, l'appréciation de la mécanique de Hertz par E. Mach place le lecteur devant une situation de malentendu et de paradoxe. Il y a déjà quelque paradoxe dans la déclaration, en 1897, que la mécanique hertzienne va dans la même direction que celle du programme de l'école positiviste, surtout de la part de l'un de ses plus prestigieux représentants. Pour ne retenir que deux aspects importants de la philosophie de Hertz, son aspect réaliste marqué et son aspect transcendantal, on notera qu'on est alors en pleine réaction contre le kantisme et contre toute idée transcendantale encore nettement affirmés par des néokantien comme Alois Riehl, et qu'on est surtout en pleine guerre énergétique antiréaliste. En 1895, année de la fameuse conférence de Lübeck, W. Ostwald publie en effet *Die Ueberwindung des wissenschaftlichen Materialismus*. Pourtant, la déclaration de Mach n'est pas vraiment paradoxale. Ce n'est pas

le kantisme en tant que tel ni même le transcendantal qui peuvent être visés mais simplement, nous l'avons vu, l'idée d'une mystérieuse conformité entre les lois de la pensée et les structures de la réalité physique. Cette thèse philosophique perd en fait tout sens dans la perspective positiviste et Mach peut glisser sur elle. Quant à l'élimination de la force, il est bon précisément de se référer à la conférence de Lübeck. En effet, pour répondre aux attaques dont il était l'objet, Ludwig Boltzmann devait publier l'année suivante un article intitulé *Ein Wort der Mathematik an die Energetik*, dans lequel il reprochait à Ostwald de s'en prendre à une conception mécaniste qui n'avait plus cours. Il précisait à ce sujet qu'« il n'y a pour ainsi dire plus personne qui tienne la force pour une réalité, ni pour penser que l'on puisse jamais administrer la preuve que l'ensemble des phénomènes naturels soit susceptible d'une explication mécanique. . . » (Dugas, 1959, 95). L'idée d'une certaine direction dans le sens d'un retrait de la force n'avait donc rien de vraiment paradoxal, comme on peut déjà s'en assurer avec ce seul mais précieux exemple. En fait, le véritable malentendu tient au mot *superflu*. Ce mot signifie au moins trois choses dans l'esprit de Mach. Il se rapporte d'abord à quelque chose dont on peut se passer ; ensuite à quelque chose dont le développement historique montre une tendance allant dans le même sens ; à quelque chose enfin dont on peut, symétriquement, s'accomoder. Sur le premier sens, Hertz, on l'a vu, ne partage pas l'idée de Mach. Pour lui, le concept de force n'est pas superflu mais bien illusoire. L'illusion a un sens dans une doctrine de la vérité, c'est-à-dire ici dans la conception réaliste des théories pour laquelle la tâche du physicien est de proposer un tableau en conformité avec la réalité. Conception qui n'a aucun sens pour Mach qui voit dans la connaissance un processus historique d'adaptation. On arrive ainsi au second sens. Le critère d'appréciation d'un progrès n'est pas pour un positiviste de l'ordre du droit mais de celui du fait. Le progrès signifie simplement une meilleure adaptation, une formule plus commode par conséquent pour une performance égale voire supérieure. En fait, ce que veut dire Mach en faisant allusion à un changement dans la philosophie de la force, c'est que sa représentation de plus en plus symbolique et abstraite permet d'en faire un simple coefficient mathématique. Ce point de vue n'est pas celui de Hertz qui pense que, grossièrement, depuis Galilée la force a sans aucun doute rendu des services et a été maintenue pour cette raison mais qu'elle doit disparaître avec la reconnaissance des seuls concepts véritablement premiers en conformité avec la réalité. Mais que veut dire la reconnaissance d'un élément véritablement premier ? Ici se situerait d'ailleurs une notable différence entre Mach et Kirchoff. Pour ce dernier la force n'est pas un

concept premier mais un concept dérivé. Un passage du texte des *Vorlesungen* définit d'ailleurs la force comme le *quatrième* concept, dérivé par conséquent des trois concepts fondamentaux d'espace, de temps et de masse. Pour Mach, qui a sans doute tiré la leçon la plus radicale de l'histoire des différents systèmes de mécanique dans laquelle on voit indifféremment concepts et principes être parfois premiers parfois dérivés les uns par rapport aux autres, nous n'avons aucune raison de privilégier les uns ou les autres sinon en raison de meilleures performances et/ou d'une plus grande commodité. L'opposition à Hertz est alors totale lorsqu'on aborde le troisième sens évoqué. En effet, il est impensable pour Hertz d'appliquer à la masse le traitement que Mach applique à la force. En revanche, il est impensable que nous puissions nous accommoder, faute de mieux, d'un concept illusoire, chimérique. Il n'est plus question en effet d'expédient mais d'imposture, d'une chose mise illégitimement à la place de la chose juste. Là apparaît un vrai paradoxe. On retient en effet et à juste titre du courant positiviste sa critique radicale des idées d'absolu, de cause, et donc de force comme étant les expressions d'une pensée métaphysique. Cette critique est réelle et importante mais elle n'est telle qu'en raison de la dimension historique ou historico-critique de la connaissance scientifique. Or c'est cette raison même qui nuance la sévérité du jugement. Ce dernier, qui porte sur des faits et non sur des droits, est le résultat d'un processus historique qui relativise non seulement le rôle joué dans le passé d'un savoir mais encore celui qui pourrait encore être le sien dans certaines conditions. Pour le dire autrement, un esprit attardé n'est pas un hérétique. L'erreur n'a pas le même sens lorsque la vérité est le résultat de nos besoins ou quand nos besoins doivent se conformer à la vérité. Peut-être alors faudrait-il explorer plus en amont dans les origines de la connaissance pour trouver un autre paradoxe. On ne trouvera pas chez Mach d'éléments premiers du monde si ce n'est le caractère double de la sensation. C'est pourquoi la petite publication sur le concept de masse nous paraît déjà remarquable. La masse en tant que telle n'existe pas. Ce qui existe nécessairement, c'est deux masses et celles-ci sont définies d'une manière doublement indirecte : par leur interaction et en rapport inverse de leurs accélérations. Il est remarquable en effet que pour un moniste, qui rejette « l'infâme deux » pour reprendre un aphorisme célèbre de Lichtenberg, au commencement il y ait l'interaction.

Bibliographie

AMPÈRE, ANDRÉ MARIE

1826 *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*, 2de édition, Paris, 1883

BARRÉ DE SAINT VENANT, ADHÉMAR

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

1865 *Notice sur la vie et les ouvrages de Pierre-Louis... comte du Buat...* Lille, Imprimerie de L. Danel

1885 Supplément à la Notice qui a été insérée en 1865... *Mémoires de la Société des sciences de l'agriculture et des arts de Lille*, XIV, 4, 337-353

CLÉMENTITCH DE ENGELMEYER

1895 « Sur l'origine sensorielle de notions mécaniques », *Revue Philosophique de la France et de l'Étranger*, Paris.

DU BOIS-REYMOND, EMIL

1848-1860 *Untersuchungen über thierische Elektrizität*, I, Einleitung, Berlin.

DUGAS, RENÉ

1959 *La théorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes*, Neuchâtel, Editions du Griffon.

HERTZ, HEINRICH

1892 *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*, Leipzig, J.A.Barth.

1894 *Die Prinzipien der Mechanik*, Leipzig, J.A.Barth.

KIRCHHOFF, GUSTAV

1876 *Vorlesungen über Mathematische Physik*, Leipzig, Teubner.

MACH, ERNST

1868 « Ueber die Definition der Masse » *Repertorium der Experimentalphysik*, 4, repris dans [Mach, 1872].

1872 *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, Prague.

1883 *Die Mechanik in ihrer Entwicklung...* Cité d'après *La Mécanique, exposé historique et critique de son développement*, traduction par Emile Picard (1904) sur la quatrième édition allemande (1897), Paris, Librairie scientifique A.Hermann, Reprint, 1987.

1922 *Analyse der Empfindungen*. Cité d'après *L'analyse des sensations*, traduction par F. Eggers et J.M. Monnoyer (1996), Nîmes, Chambon.

OSTWALD, WILHELM

1910 *L'Energie*, tr.fr., Paris, Alcan.

POINCARÉ, HENRI

1897 « Les idées de Hertz sur la mécanique », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 8, 734-743.

1991 *L'analyse et la recherche*, Choix de textes et introduction. de G.Ramunni, Paris, Hermann, 61-86.

REECH, FERDINAND

1852 *Cours de mécanique d'après la nature généralement flexible et élastique des corps*, Paris.

WITTGENSTEIN, LUDWIG

1921 *Tractatus logico-philosophicus, Logisch-philosophische Abhandlung*, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1980