

L'aube de la physique de l'énergie
par Jacqueline Lubet et Bernard Pourprix

sur cette page : | [sommaire](#) | [introduction](#) | [public concerné](#) |

Sommaire

Introduction

- *Encart : La conservation de la force vive*

Le contexte, l'origine et la structure du *Mémoire*

1. Le modèle de science en Allemagne dans les années 1840

La philosophie dynamique de Kant et la physique des essences - *Encart : Dynamisme, dynamique* - *Encart : La Naturphilosophie* - Lerenouvellement de la physique et de la physiologie à partir des années 1820 - *Encart : La physique théorique d'Ohm* - *Encart : La philosophie mécanique de Laplace* - *Encart : La physique mathématique de Fourier* - L'introduction du travail de laboratoire dans la formation des physiciens

2. La formation d'Helmholtz

La richesse culturelle des années de jeunesse - Les études de médecine et la rencontre avec Johannes Müller - *Encart : Müller et ses élèves* - Les liens avec Magnus. La Société de physique de Berlin. La formation du groupe des biophysiciens - *Encart : Du Bois-Reymond et l'électricité animale*

3. L'origine du mémoire *Sur la Conservation de la Force*

La question de la force vitale - *Encart : Le mouvement perpétuel* - Les travaux d'Helmholtz sur l'action musculaire et la chaleur animale - *Encart : L'équivalent mécanique de la chaleur au sens de Joule*

4. La structure du mémoire

Les conceptions du monde et de la science d'Helmholtz

1. L'utilité pratique et sociale de la connaissance de la nature - *Encart : Goethe, un Naturphilosoph*

2. Une forme de réductionnisme physicaliste - *Encart : Physique et mécanique kantienne*

3. Une introduction d'inspiration kantienne

4. L'unité fondamentale des forces de la nature

5. Physique des forces centrales et physique de

l'énergie

La conceptualisation de la force

1. Les concepts métaphysiques : matière et force

2. Les concepts scientifiques

Le point matériel et les forces centrales - La force vive et le travail - La force de tension, ébauche de l'énergie potentielle - La chaleur - *Encart : Les conceptions statiques de la physique laplacienne*

La mathématisation de la conservation de la force

1. La mathématisation, c'est-à-dire la mécanisation - *Encart : Seguin et les machines thermiques*

2. Le réductionnisme au sens d'Helmholtz

3. Autres modes de mathématisation. Le contenu physique des constructions mathématiques

Helmholtz vs Lagrange : Lagrange a-t-il établi le principe de la conservation de l'énergie ? - Helmholtz vs Clausius : la théorie mécanique de la chaleur de Clausius - *Encart : Clausius et la théorie mécanique de la chaleur*

4. Une erreur de calcul féconde

La place et la fonction de l'expérience

1. La physiologie du muscle comme banc d'essai d'un programme physicaliste - *Encart : La thermoélectricité*

2. Le principe de conservation de la force comme généralisation des lois de l'expérience

La réception du mémoire

1. La réception du mémoire immédiatement après 1847

La réception en Allemagne : un mémoire bien déconcertant - *Encart : Stahl, le vitalisme et le phlogistique* - *Encart : Fick, un kantien tardif* - La réception en Grande-Bretagne. L'énergie au sens de Thomson - *Encart : Le Traité de philosophie naturelle de Thomson et Tait*

2. Les controverses

Les querelles de priorité - *Encart : Rankine, la thermodynamique et l'énergétique* - La controverse avec Rudolf Clausius - Le potentiel - La réduction de toutes les actions à des forces centrales - La controverse avec Wilhelm Weber - *Encart : La théorie électrodynamique de Weber* - *Encart : La théorie électromagnétique de Maxwell*

L'évolution des idées d'Helmholtz sur la force

1. Les comptes rendus d'Helmholtz dans les *Fortschritte der Physik*, signes et facteurs de son évolution - *Encart : L'énergétique à la fin du XIX^e siècle*
2. La loi de la conservation de la force dans les conférences d'Helmholtz
3. Helmholtz et l'énergie vers 1870 - *Encart : Helmholtz et le principe de moindre action* - *Encart : L'œuvre d'Helmholtz*

Les figures d'Helmholtz

1. Helmholtz kantien

Le kantisme comme racine du renouvellement de la physique au cours du XIX^e siècle (I. Prigogine et I. Stengers) - Les fondements métaphysiques du mémoire d'Helmholtz (P. M. Heimann) - Un physicien philosophe qui reste fidèle à Kant (C. Chevalley)

2. Helmholtz chercheur scientifique

Helmholtz physicien théoricien (F. Bevilacqua) - L' " helmholtzianisme ", une manière de faire de la physique (J. Z. Buchwald) - L'alliance entre une pratique scientifique et une philosophie idéaliste (M. Heidelberger)

3. Helmholtz scientifique engagé (E. Jurkowitz)

Conclusion

Annexes :

- Traduction de l'introduction du mémoire d'Helmholtz *Sur la Conservation de la Force*
- Index des noms de personnes
- Source illustrations

Le public concerné

Les questions de physique traitées dans cet ouvrage correspondent aux programmes enseignés au lycée et à l'université. Le formalisme mathématique est réduit à sa plus simple expression. La réflexion épistémologique utilise un langage simple. L'ouvrage s'adresse d'abord aux enseignants, et notamment ceux de sciences physiques (intéressés par l'histoire de leur discipline), ceux de mathématiques (intéressés par les liens entre mathématiques et sciences physiques, par exemple les animateurs des IREM), ceux de philosophie (intéressés par une réflexion sur des cas concrets). Bien entendu les enseignants en formation sont concernés. L'histoire des sciences commence d'être enseignée dans les IUFM. La formation des futurs enseignants doit passer par une démythification du " savoir scientifique ", et une meilleure compréhension des modes de construction de ce savoir. Cet ouvrage peut y contribuer. L'ouvrage s'adresse aussi aux étudiants de 2^{ème} et 3^{ème} cycles, car l'histoire des sciences est maintenant enseignée dans de nombreuses universités scientifiques. Enfin les historiens des sciences trouveront dans cet ouvrage une synthèse des nombreuses analyses du mémoire d'Helmholtz *Sur la Conservation de la Force*, et peut-être un nouvel éclairage sur une œuvre considérée aujourd'hui comme une étape majeure dans la découverte du principe de la conservation de l'énergie.

Introduction

La dynamique moderne prend naissance au début du XVII^e siècle. Chacun de nous a entendu parler des contributions de Galilée à la science du mouvement, et notamment de ses études sur l'inertie et sur la chute des corps. En fait, les recherches de Galilée orientent le développement de la dynamique dans deux directions différentes. Avant d'admettre que la vitesse acquise par un corps en chute libre dépend directement de la durée de la chute, Galilée avait supposé que cette vitesse est proportionnelle à la distance parcourue. Cette supposition est erronée. Pour s'en persuader, il suffit de faire le raisonnement suivant : la vitesse acquise sur un trajet double étant elle-même double, la durée de ce trajet double est la même que celle du trajet simple ; et, comme ce dernier est nécessairement parcouru tout d'abord, puisqu'il est la première moitié du trajet double, la seconde moitié doit être parcourue dans une durée nulle, ce qui veut dire que la chute des corps doit être instantanée... Se rendant compte de son erreur, Galilée décide de fonder

son étude du mouvement de chute sur l'hypothèse de proportionnalité entre la vitesse acquise par le corps et la durée de la chute (d'où il déduit mathématiquement la " loi de la chute des corps ", selon laquelle la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps de chute). C'est dans cette voie que s'engageront aussi Descartes, l'inventeur de notre concept de quantité de mouvement, puis Newton, l'inventeur de notre concept de force.

Pourtant l'idée de relier la vitesse acquise et la distance parcourue n'est pas fautive en soi. En effet, il est également correct de supposer que la vitesse v acquise par un corps de masse m est déterminée par la durée t de la chute ou par la hauteur h de cette chute. Autrement dit, on peut prendre pour point de départ de l'étude de la chute des corps, ou bien la relation entre l'impulsion pt du poids p du corps et sa quantité de mouvement mv , ou bien la relation entre le travail ph du poids p du corps et sa force vive mv^2 : les deux manières de faire sont également correctes. Galilée, s'appuyant sur l'expérience du pendule, avait déjà constaté que, par la vitesse acquise, un corps peut remonter à la hauteur d'où il est tombé. À la fin du XVII^e siècle, Huygens et Leibniz approfondissent cette question et posent les fondements de ce qui sera appelé plus tard le principe de l'équivalence du travail et de la force vive. Ainsi, dans l'étude d'un problème dynamique quelconque, deux voies peuvent être empruntées : soit on considère la quantité de mouvement comme déterminée par la force, et l'on suit alors la tradition de Galilée-Newton, soit on regarde la force vive comme déterminée par le travail, et l'on suit alors la tradition de Galilée-Huygens-Leibniz.

Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, ces deux dynamiques sont en contraste, et jusqu'à un certain point, en conflit. Un débat, vif et prolongé, est resté célèbre sous le nom de " querelle des forces vives ", ou encore " controverse sur la mesure de la force des corps en mouvement ". Il oppose d'abord Leibniz aux cartésiens, puis les leibniziens aux newtoniens. On se dispute pour savoir quelle est la mesure de la force conservée au cours d'un processus dynamique, par exemple un choc : est-ce la quantité de mouvement, ou bien la force vive ? Il faut bien saisir que cette question est d'une importance majeure. Ce n'est pas seulement de mécanique au sens étroit du terme qu'il s'agit. Depuis le milieu du XVII^e siècle, la mécanique sert de cadre interprétatif pour l'ensemble des phénomènes de la nature. La plupart des savants ont une vision mécanique du monde. Aussi la querelle déborde-t-elle largement le domaine de la mécanique ordinaire, elle pénètre dans celui de la philosophie naturelle. Le monde des newtoniens, comme celui des cartésiens, possède une réserve inaltérable de quantité de mouvement, alors que celui des leibniziens est pourvu d'une quantité constante de force vive. Ces deux dynamiques vont longtemps coexister, plus ou moins pacifiquement, la France et la Grande-Bretagne donnant la préférence à la première, les pays germaniques plutôt à la seconde.

À vrai dire, tout le long du XVIII^e siècle, la voie newtonienne est généralement préférée à la voie leibnizienne, car les concepts et les principes de la première semblent plus simples et plus évidents que ceux de la seconde. Quand débute le XVIII^e siècle, l'influence de Newton est immense, notamment en France, où domine la grande figure de Laplace. Ce qui fait la force du newtonianisme, au moins dans sa version laplacienne, c'est qu'il constitue à la fois une mécanique, une physique et un système du monde. On est convaincu que tous les phénomènes de la nature sont réductibles à des actions mécaniques conçues sur le modèle de l'attraction entre les astres, c'est-à-dire des forces centrales, et que la considération de ces actions doit servir de base à la mathématisation. La physique laplacienne occupe une position dominante, hégémonique, entre 1800 et 1815 environ. Ses succès sont considérables. Les laplaciens (Pierre-Simon de Laplace, Jean-Baptiste Biot, Siméon-Denis Poisson, Augustin-Louis Cauchy, etc.) donnent une impulsion décisive à la mathématisation dans toutes les branches de la physique. À l'étranger, on commence de les imiter.

Pourtant il arrive un moment où cette " vision astronomique " des phénomènes naturels est battue en brèche. Deux faits, parmi d'autres, contribuent grandement à la décomposition du newtonianisme. En 1820, Oersted découvre qu'un courant électrique change l'orientation d'une aiguille aimantée, la fait tourner. Malgré les dénégations des laplaciens, on commence alors à douter de la généralité de la notion de force centrale. Par ailleurs, l'idée se fait jour que les phénomènes de la chaleur ne doivent pas être attribués à une substance spécifique, le calorique, mais à des mouvements de la matière ordinaire, ce que confirme la découverte de l'équivalent mécanique de la chaleur, dans les années 1840. Si cette découverte entraîne la disparition du calorique matériel, la reconnaissance de son caractère fictif, elle fait aussi apparaître au grand jour les failles d'une mécanique qui ne permet pas de répondre à certaines questions simples, et notamment celles-ci : que devient le mouvement lorsqu'il paraît s'annihiler lors d'un choc ? comment expliquer l'échauffement des corps qui sont entrés en collision ? De toute évidence, avec cette mécanique, on ne maîtrise pas les lois du choc des corps. Et l'on est prêt à reconnaître que la dynamique newtonienne n'offre rien de comparable à ce qu'elle a apporté dans l'explication des mouvements célestes.

C'est dans la perspective ouverte par ce vide théorique qu'apparaissent l'originalité et l'intérêt des premières recherches d'Helmholtz. Celui qui n'est encore qu'un jeune physiologiste réussit à jeter un pont entre les deux voies de la dynamique. En puisant à la fois dans les traditions newtonienne et leibnizienne, il pose les bases d'une dynamique nouvelle. Il publie son travail en 1847 sous le titre *Über die Erhaltung der Kraft* (Sur la Conservation de la Force). Ce mémoire est considéré aujourd'hui comme une étape importante dans la découverte du principe de la conservation de l'énergie. C'est pourquoi nous avons décidé d'en faire une étude détaillée, puis de rédiger ce livre, qui prend appui sur notre étude. Helmholtz donne, pour la première fois, une démonstration mathématique du nouveau principe de conservation, le confronte aux lois empiriques connues en physique et, en posant fermement son caractère universel, en déduit un programme de recherche pour la science. Helmholtz n'a alors que vingt-six ans...

Le principe de la conservation de l'énergie, exprimé sous une forme ou sous une autre, est un des piliers de la physique. Il n'a pas été découvert, un beau jour, par un savant génial déchirant le voile qui cachait une vérité que

personne n'avait entrevue avant lui. Mais il a lentement émergé au travers de multiples travaux dans des domaines divers, menés par des chercheurs de cultures et de traditions différentes, qui souvent ne percevaient pas de liens entre leurs recherches respectives.

En effet, entre 1790 et 1840, on découvre de très nombreux phénomènes dans des champs expérimentaux très différents. Mieux : on arrive à mettre en relation expérimentalement ces différents champs. Citons quelques exemples : la connexion entre l'électricité et la chimie (Volta invente la pile en 1800 et Davy fait des expériences d'électrolyse à partir de 1805) ; la connexion entre l'électricité et le magnétisme (à partir de 1820, grâce aux travaux d'Oersted, Ampère et Faraday) ; la connexion entre l'électricité et la chaleur (Seebeck découvre l'effet thermoélectrique en 1821 et Peltier découvre l'effet inverse en 1834) ; la connexion entre la chaleur et la force mécanique (Sadi Carnot publie sa théorie de la machine à vapeur en 1824).

Dans les années 1840, un pas décisif est franchi dans la mise en relation des différents champs. Les connexions entre les phénomènes mécaniques, chimiques, électriques, magnétiques, calorifiques, lumineux sont interprétées comme des conversions, des transformations : quelque chose se convertit d'une forme dans une autre, se transforme. On sent confusément que quelque chose se conserve quantitativement tout en changeant de forme qualitative. Ce « quelque chose » sera plus tard identifié comme étant l'énergie. Pour beaucoup de savants, c'est la nature tout entière qui se trouve ainsi unifiée, et pas seulement les différents champs expérimentaux. C'est ce que pensent notamment Joule, Mayer, Helmholtz, pour ne citer qu'eux, parmi la dizaine de noms considérés généralement comme les pères fondateurs de la physique de l'énergie.

À la même époque, dans le domaine de la physiologie, ont lieu de grands débats au sujet de l'existence d'une force vitale. Celle-ci coordonnerait l'action des forces chimiques et physiques dans les êtres vivants. La disparition de la force vitale entraînerait la libération des forces chimiques et physiques, et, par conséquent, la putréfaction de l'organisme. Helmholtz est médecin et physiologiste avant d'être physicien. Ses recherches sur la conservation de la force sont très liées à ces débats. Son raisonnement est le suivant. Si un corps possédait véritablement une force vitale, il serait animé d'un « mouvement perpétuel », c'est-à-dire qu'il pourrait produire du travail indéfiniment sans rien consommer, ce qui est absurde. L'inexistence de la force vitale doit donc se déduire de l'impossibilité absolue du mouvement perpétuel, ou, en d'autres termes, de la conservation de la force dans toutes les opérations de la nature. C'est ce principe qu'il lui faut établir de manière indiscutable.

Quand il élabore son mémoire Sur la Conservation de la Force, Helmholtz appartient à la Société de physique de Berlin, fondée en 1845 par les physiologistes Emil du Bois-Reymond et Ernst Brücke, entre autres. Les physiologistes appartenant à cette Société ont pour ambition de construire une physiologie selon des lignes mécanistes, en s'inspirant des méthodes de la physique. Dans cette perspective, le plaidoyer d'Helmholtz pour l'impossibilité du mouvement perpétuel apparaît comme lié à son combat, et celui de ses collègues, contre la force vitale. Plus généralement, son mémoire veut être une contribution à la mise en place des fondements de cette nouvelle physiologie.

Helmholtz s'emploie à exprimer, à formaliser le principe de l'impossibilité du mouvement perpétuel dans un cadre conceptuel mécanique. Ce faisant, il rencontre les travaux des géomètres et autres mécaniciens qui, depuis longtemps, ont établi différentes versions de la loi de la « conservation de la force vive ». Il est connu aujourd'hui pour avoir démontré mathématiquement que la nature renferme une réserve d'énergie inaltérable, constante, et que cette énergie se présente sous deux formes, cinétique et potentielle, avec passage d'une forme dans une autre. Qu'apporte-t-il de nouveau par rapport à un auteur comme Lagrange, qui est déjà allé loin sur ce point ? On pourrait penser que l'idée d'Helmholtz d'un va-et-vient entre deux formes d'énergie, cinétique et potentielle, pour utiliser les expressions d'aujourd'hui, est une idée courante en mécanique à cette époque. Lagrange, dans sa Mécanique analytique (1788), n'a-t-il pas déjà exprimé le principe de conservation de la force vive en ces termes ? Certes, il a montré que, dans un système isolé, constitué de corps qui se déplacent en obéissant à leurs attractions et répulsions mutuelles, la somme de la force vive T et d'une fonction V de la position des points du système reste constante. Mais la fonction V ne représente pas encore physiquement l'énergie potentielle du système ; elle a pour seul rôle de rendre compte mathématiquement de quelle manière la force vive T se conserve. Le principe de conservation de la force vive, pour Lagrange, ne signifie pas que deux grandeurs physiques, T et V , se conservent ensemble. C'est Helmholtz qui, le premier, attire l'attention sur la relation nécessaire et fondamentale de ces deux formes d'énergie.

Cependant la conservation de la force au sens d'Helmholtz n'est pas la conservation de l'énergie au sens où nous l'entendons aujourd'hui. Le lecteur qui s'attendrait à trouver dans le mémoire les expressions énergie cinétique et énergie potentielle risque d'être fort surpris de trouver, à la place de ces expressions, celles de force vive (*lebendige Kraft*) et force de tension (*Spannkraft*). Pour comprendre comment Helmholtz en est venu à construire ce concept nouveau de force de tension, ébauche de l'énergie potentielle, il nous faudra reconstituer ce qui a pu être son cadre conceptuel. Nous verrons alors à quel point ce cadre porte l'empreinte de traditions germaniques, notamment kantienne et leibnizienne.

Ce que nous tenterons de faire ressortir, dans le mémoire Sur la Conservation de la Force, c'est cette espèce de tension entre tradition et innovation, qui lui donne son caractère si particulier et rend son interprétation si délicate. Pour avoir une idée des difficultés que nous rencontrerons au cours de l'analyse, il suffit de prendre un exemple, celui du projet réductionniste d'Helmholtz. À la fin de l'introduction de son mémoire, Helmholtz affirme que « la tâche des sciences physiques consiste donc finalement à ramener les phénomènes de la nature à des forces invariables, attractives et répulsives, dont l'intensité dépend de la distance ». On croit entendre Laplace exposant, vers 1800, son projet newtonien

pour toute la science... Mais une série de questions se posent. Quelle relation y a-t-il entre le projet ainsi formulé et le principe de la conservation de la force ? Les forces auxquelles Helmholtz fait ici allusion sont-elles des forces centrales newtoniennes ? Cette conception réductionniste, selon laquelle tous les phénomènes de la nature, même ceux qui apparemment diffèrent des phénomènes mécaniques, peuvent être réduits à ces derniers, est-elle sous-tendue par une vision mécanique du monde ?

Afin d'éviter au lecteur, autant qu'il est possible, la mauvaise surprise des contresens, nous apportons d'ores et déjà quelques éléments de réponse à ces questions. Nous verrons que la loi de la conservation de la force d'Helmholtz n'est pas une proposition primitive, un principe indépendant, comme le sera plus tard le principe de la conservation de l'énergie. Ses fondements restent assujettis à un système de forces centrales. Cependant la force centrale d'Helmholtz est difficilement identifiable à une action immédiate à distance. C'est d'abord une idéalisation mathématique, un concept approprié à sa formulation mathématique de la loi de la conservation de la force ; elle n'est pas nécessairement le signe d'une adhésion à la physique de l'action à distance. Par ailleurs, si sa représentation mathématique des phénomènes est fondée sur une méthode de réduction à la mécanique, sa représentation dernière, proprement métaphysique, de la matière et de la force n'est pas pour autant mécanique. La philosophie naturelle d'Helmholtz n'est pas une philosophie mécanique et atomiste, mais une philosophie dynamique (ou dynamiste) et continuiste, dans la tradition germanique.

Quel intérêt présente aujourd'hui le mémoire d'Helmholtz Sur la Conservation de la Force ? Du point de vue de l'histoire des idées, ce travail est doublement intéressant. D'une part, il ouvre une toute nouvelle perspective théorique, un cadre unificateur sans précédent : le principe de conservation de la force affirme que tout phénomène naturel peut être interprété par le jeu de deux formes basiques de force, la force vive et la force de tension, dont la somme reste constante. D'autre part, il est à la charnière de deux époques : il est intermédiaire entre la physique de la force (celle de Laplace, par exemple) et la physique de l'énergie (celle de W. Thomson et J.C. Maxwell, par exemple). Nous verrons que la physique théorique au sens d'Helmholtz fait la jonction entre les deux traditions, newtonienne et leibnizienne, de la dynamique, et c'est pour cette raison qu'elle ouvre la voie à la physique de l'énergie.

Par ailleurs, du point de vue épistémologique et didactique, le mémoire d'Helmholtz est également intéressant, parce qu'il fait découvrir à quel point le concept d'énergie est le fruit d'une élaboration difficile. Rien d'étonnant, dès lors, que ce genre de concept soit difficile à construire pour les élèves d'aujourd'hui. Une meilleure connaissance, par l'enseignant, de la construction historique de la science peut lui permettre de mieux comprendre et guider le cheminement de ses élèves. En suivant notre analyse du mémoire d'Helmholtz, le lecteur entre en quelque sorte dans le « laboratoire épistémologique », il peut voir la science se faire, il peut observer un scientifique au travail et pénétrer dans les détails de sa pratique : conceptualisation, mathématisation, expérimentation, trois opérations coordonnées, mises en cohérence par l'intermédiaire de ses conceptions du monde et de la science. Il voit aussi comment la réception du travail d'un scientifique par ses contemporains peut faire évoluer, non seulement ses idées, mais aussi sa pratique et les principes philosophiques qui la sous-tendent.

Où se trouve le mémoire d'Helmholtz ? On dispose du texte allemand primitif (1847), du même texte inséré dans les œuvres complètes d'Helmholtz (1882), d'une traduction en français (1869) et d'une traduction en anglais (1971). Entre ces textes existent en plusieurs points des divergences, certaines étant dues à des défauts de traduction. Nous en ferons état à l'occasion. Le traducteur français, Louis Pérard, précise qu'Helmholtz a revu lui-même les épreuves, « et surtout, en apportant à son travail primitif certains changements, Monsieur Helmholtz a bien voulu faire de cette traduction une véritable édition nouvelle ». La traduction anglaise, comme le texte des œuvres complètes, comporte des notes et des appendices ajoutés par Helmholtz en 1881. Toutes ces modifications ou adjonctions sont des renseignements intéressants sur le regard porté a posteriori par l'auteur sur son œuvre. Nous serons amenés à citer de nombreux extraits du mémoire ; il s'agira toujours de notre propre traduction du texte allemand.

De nombreux auteurs ont analysé le mémoire d'Helmholtz, et nous nous appuyerons aussi sur leurs travaux, variés tant dans leur perspective et leur méthode que dans l'appréciation générale qu'ils portent sur le mémoire. Ce sera l'occasion de découvrir la diversité des approches en histoire des sciences, et de prendre conscience de l'intérêt de confronter différents points de vue d'historiens et d'épistémologues.