



Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

11-2 | 2007

Varia

À propos de l'ouvrage d'Helmholtz *Über die Erhaltung der Kraft* sur un principe limité de la conservation de l'énergie

Muriel Guedj¹



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/331>

DOI : 10.4000/philosophiascientiae.331

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 1 novembre 2007

Pagination : 1-25

ISBN : 978-2-84174-439-8

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

Muriel Guedj¹, « À propos de l'ouvrage d'Helmholtz *Über die Erhaltung der Kraft* sur un principe limité de la conservation de l'énergie », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 11-2 | 2007, mis en ligne le 27 juin 2011, consulté le 15 janvier 2021. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/331> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.331>

À propos de l'ouvrage d'Helmholtz *Über die Erhaltung der Kraft* sur un principe limité de la conservation de l'énergie

Muriel Guedj¹

Equipe REHSEIS (UMR 7596) CNRS et Université Paris 7
muriel.guedj@montpellier.iufm.fr

Résumé : Incontestablement, *La conservation de la force* d'Helmholtz constitue un texte qui annonce la conservation de l'énergie, comme en témoignent l'introduction du concept de potentiel, l'importance accordée au concept de travail ainsi que le fort degré de généralité du principe de conservation tel qu'il est exposé. Cependant, ce dernier présente certaines restrictions (statut des pertes, de la chaleur, formalisation mathématique...) qui empêchent la formulation du concept d'énergie totale. Nous montrons que c'est donc la conservation de l'énergie mécanique qu'il convient de lire dans le texte d'Helmholtz. Ces restrictions sont significatives de l'attachement de ce dernier à une mécanique conservative qui rend parfaitement compte du principe fondateur de la théorie (l'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel) et qui par ailleurs est cohérente avec ses travaux de physiologie.

Abstract: Without a doubt, Helmholtz's *Conservation of force* constitutes a text announcing the conservation of energy as it is shown both in the introduction of the potential concept and in the high degree of generalization of this principle. However, this later principle has a number of limits — loss and heat status, mathematical formulation — preventing the formulation of total energy concept from happening. Consequently, it is the mechanical energy that is worth to be read in Helmholtz's text. Significantly, those limits testify to the attachments of the scientist to a conservative mechanics that gives a complete account of the seminal principle of this theory (impossibility to achieve a perpetual movement) and which are furthermore consistent with Helmholtz's work in physiology.

¹Adresse actuelle : IUFM, 2 place Marcel Godechot, BP 4152, 34092 Montpellier Cedex 5

« ... il fallut surtout que Helmholtz lançât son écrit sur la conservation de la force, retentissant manifeste qui annonçait à la science l'avènement des nouvelles doctrines. » [Duhem 1895, 405]

Cette opinion de Pierre Duhem concernant le célèbre texte d'Helmholtz *Über die Erhaltung der Kraft* [Helmholtz 1847] est généralement partagée par l'ensemble des historiens des sciences qui voient en Helmholtz l'un des pionniers du principe de conservation de l'énergie. Cependant, ces derniers ont des lectures différentes du principe présenté dans le texte de 1847. Ces divergences concernent autant l'interprétation de ce principe que la méthode développée par Helmholtz pour l'établir.

Par exemple, C.C. Gillispie souligne qu'Helmholtz parvient à la conservation de l'énergie par le biais de la physiologie et que cette approche de non-spécialiste est essentielle [Gillispie 1970]. Par contre, T. Kuhn relève que c'est en appliquant un principe de conservation à des phénomènes anciens et connus que Helmholtz annonce ce que Kuhn qualifie d'« hypothèse de la conservation de l'énergie » [Kuhn 1959]. Aucun de ces deux auteurs ne précisent toutefois le sens du terme *énergie*. D'un autre côté, Y. Elkana affirme la formulation sans ambiguïté et la généralisation du principe par Helmholtz, invoquant les convertibilités mutuelles et la présence d'un principe unificateur avec le terme de *kraft* [Elkana 1970]. Plus récemment, F. Bevilacqua et B. Pourprix s'accordent sur le fait que l'énergie explicitée par Helmholtz exprime une énergie potentielle et une énergie cinétique avec la conversion d'une forme à l'autre mais chacun de ces auteurs pondère l'universalité du principe de conservation dégage. Ainsi, Bevilacqua pointe des insuffisances expérimentales et mathématiques² [Bevilacqua 1993, 295] alors que Pourprix souligne l'attachement du principe de Helmholtz au système des forces centrales³ [Pourprix 2003, 100–104].

Cet article vise à clarifier ces interprétations du travail d'Helmholtz⁴

²Bien que Bevilacqua qualifie de non-achevée l'approche mathématique et qu'il constate l'absence de travaux expérimentaux (en opposition aux travaux de physiologie qui reposent entièrement sur une démarche expérimentale), il indique que cette approche d'Helmholtz permet de souligner l'effort théorique basé sur l'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel.

³Dans *La fécondité des erreurs*, Pourprix souligne l'erreur qui consiste à considérer comme équivalent le caractère central des forces et l'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel. Il indique toutefois que cette erreur d'Helmholtz s'est avérée fructueuse puisqu'elle a permis à ce dernier de construire le concept de *force de tension*.

⁴Le texte de 1847 a été traduit en français par Louis Pérard qui le publie en 1869 sous le titre *Mémoire de la conservation de la force*. Il existe des modifications substantielles entre le texte allemand et la version française; cette dernière en effet, comporte des ajouts (introduction des termes d'énergie actuelle et énergie potentielle par exemple) qui modifient le texte original d'Helmholtz. Il est essentiel de noter

afin de vraiment appréhender ce qui est exposé dans le texte de 1847. Quel principe de conservation est exprimé ? Qu'est-ce qui préside à l'établissement de ce dernier ?

Pour notre part, nous pensons que le principe de conservation de la force d'Helmholtz concerne en fait le **principe de conservation de l'énergie mécanique**. Ce dernier est ensuite transposé à d'autres domaines que celui de la mécanique, ce qui est novateur. Cependant l'approche d'Helmholtz présente un certain nombre d'éléments qui restreignent la généralisation du principe de conservation de l'énergie mécanique en vue d'exprimer **la conservation de l'énergie totale**. Ce sont ces éléments que nous allons pointer ; ils concernent essentiellement la section IV du texte de 1847, intitulé « Equivalent de la force et de la chaleur ».

Afin de situer le texte d'Helmholtz, nous présentons, dans un premier temps, un bref contexte du travail de ce dernier avant d'explicitier, dans un second temps, le principe de conservation de la force tel qu'il est abordé dans les trois premiers chapitres de l'ouvrage. Le rôle du concept de travail et celui des mathématiques sera plus particulièrement analysé. La troisième partie concerne les concepts de chaleur et de perte ainsi que la notion d'équivalent de la force, et, plus encore, c'est le lien entre ces diverses notions et le principe de conservation de la force qui est interrogé. La dernière partie synthétise tous les éléments précédents pour conclure relativement au principe de conservation de l'énergie abordé dans le texte d'Helmholtz.

1 Le contexte

L'émergence du principe de conservation de l'énergie, au milieu du XIX^{ème} siècle, a donné lieu à de nombreux commentaires et les historiens des sciences ont avancé plusieurs causes à cette émergence. Parmi les principaux éléments, il convient de citer notamment les processus de conversion, l'intérêt porté par les ingénieurs aux machines, la progression de la *Naturphilosophie*⁵, la réduction des phénomènes physiques à une

que la traduction française a été soumise à Helmholtz qui a porté à cette dernière un certain nombre de modifications (principalement des notes). Ainsi, il convient de considérer la version française comme un texte significatif de l'évolution de la pensée d'Helmholtz entre 1847 et 1869.

⁵T. Kuhn souligne la nécessité pour les *Naturphilosophen* de trouver un principe unificateur unique à tous les phénomènes naturels. Il cite l'affirmation de Schelling selon laquelle « les phénomènes magnétiques, électriques, chimiques et finalement même organiques étaient interconnectés en une grande association. . . [qui] s'étend sur

mécanique conservative [Darrigol 2001], la transition d'un paradigme statique à un paradigme dynamique ⁶. . . A ces éléments, l'affirmation de C. Smith selon laquelle :

Between Isaac Newton and Albert Einstein no development in physics is more significant than the replacement of the concept of force by the concept of work [Smith 1990, 326]

non seulement renseigne sur les évolutions conceptuelles, mais plus encore est symptomatique d'une reformulation de la physique dans les années 1840 conduisant dans la seconde moitié du siècle à une physique de l'énergie.

Sans revenir en détail sur l'ensemble du processus qui conduit du concept de force à celui de travail, il est toutefois intéressant d'en souligner certaines étapes en s'attachant à dégager les amorces d'un principe de conservation.

La physique des forces centrales telle qu'elle est présentée par Laplace consiste à réduire tous les phénomènes physiques à l'action de forces inversement proportionnelles au carré de la distance séparant les corps, ces derniers étant considérés comme des « atomes non ponctuels ». Précisant que les distances mises en jeu interviennent sur le type de force, l'étude des phénomènes célestes se ramène à celle des forces attractives — alors que ce sont des forces répulsives qui interviennent lorsque les distances sont faibles — Laplace en arrive à la conservation de la force vive⁷. Si Poisson et Fourier, tous deux héritiers de Laplace, ont conduit le programme de ce dernier dans différentes branches de la physique, le style de ces auteurs témoigne d'un tournant esquissé vis-à-vis de la physique laplacienne. Dans le cadre de sa *Théorie mécanique de la chaleur*, la méthode développée par Poisson pour expliciter l'équation de la conduction de la chaleur, nécessite d'élaborer un modèle complexe et spéculatif rendant compte des relations entre le calorique et les molécules du solide. L'équation alors obtenue révèle une approche mathématique rigoureuse mais complexe. Fourier en revanche traite le phénomène de la conduction de la chaleur comme s'il s'agissait d'un flux continu et ne

toute la nature. » Cité par [Kuhn 1977, 149].

⁶Voir [Bevilacqua 1993] qui s'intéresse plus particulièrement à l'introduction de la force de tension et note l'aspect novateur constitué par l'égalité, réalisée par Helmholtz, entre la force vive qui est une grandeur dynamique, et la quantité des tensions qui est une grandeur statique. [Pourprix 2003] souligne le passage des conceptions statiques aux conceptions dynamiques comme élément pertinent pour l'émergence du principe de conservation de l'énergie. Ce thème est également développé avec précision dans [Smith & Wise 1989], voir par exemple le chapitre 8 de ce dernier.

⁷La force vive est notée mv^2 , (m représente la masse et v la vitesse).

s'interroge pas sur la nature physique de la chaleur. Son approche se démarque nettement de la physique des forces centrales car si comme Laplace, il privilégie l'analyse mathématique, cette approche exclut tout modèle microscopique pour adopter une théorie de la chaleur macroscopique, géométrique et pratique.

Cet « aspect pratique » que doit revêtir une théorie n'est pas sans lien avec la montée en puissance d'une génération d'ingénieurs théoriciens français plus concernés par l'établissement d'une théorie générale des machines que par la mécanique rationnelle. Ainsi, les écrits de Navier, Coriolis et Poncelet confirment un glissement du concept de *force* vers celui de *travail*, marquant ainsi une orientation vers la physique mathématique de Fourier plutôt qu'un attachement à la force abstraite de Laplace. Cette approche n'est pas fondamentalement novatrice, et Lazare Carnot dans son *Essai sur les machines en général*, soulignait déjà l'intérêt du concept de travail sur celui de force ; le travail mesurant directement l'effet obtenu par une machine. Cependant, chez cet auteur, le travail n'apparaît pas encore comme un concept indépendant, la conservation de la force vive (exprimée par mv^2) jouant le rôle principal. Ainsi, c'est la génération d'ingénieurs suivant celle de Lazare Carnot qui transforme la mécanique en une science du travail. Les termes de travail mécanique ou quantité de travail sont introduits, la force vive sera redéfinie comme étant $1/2mv^2$, elle correspond au travail accompli. L'équation qui lie la force vive et le travail devient explicite et la distinction des données intérieures ou extérieures est effectuée au sein du principe des forces vives, précisant ainsi les concepts de forces et de travail⁸.

Par ailleurs, les pertes d'effet, pertes de forces vives ou de travail, deviennent un sujet d'étude, les processus mécaniques ne devant pas impliquer de pertes. Ainsi, les pertes qui interviennent lors des chocs ou des frottements sont interprétées comme autant de mouvements ou modifications moléculaires : elles sont en fait dissimulées [Darrigol 2001]⁹.

Cette approche est novatrice car elle repose sur une mécanique conservative qui s'attache à distinguer les grandeurs internes des grandeurs externes. Plus encore, le système explicatif avancé souligne le lien explicitement établi entre les grandeurs macroscopiques et les grandeurs microscopiques. Ce dernier aspect s'avère essentiel pour une formulation générale du principe de conservation de l'énergie, incluant notamment l'explicitation de l'énergie interne.

C'est dans le contexte de la physique laplacienne que s'inscrivent les travaux d'Helmholtz qui reste très attaché aux forces centrales, concepts

⁸Cet aspect est développé dans [Grattan-Guinness 1984].

⁹Voir notamment page 325.

sur lesquels repose entièrement son mémoire sur la conservation de la force¹⁰. Ainsi, en 1854 dans son *Exposé élémentaire des forces naturelles*¹¹, *La mécanique céleste* de Laplace est le texte auquel il se réfère pour évoquer la structure et la constitution de l'Univers [Helmholtz 1854, 31 et 39]. Cependant, c'est l'influence de Kant qui apparaît comme étant essentielle. En effet, si dans le texte de 1847 Helmholtz ne cite pas explicitement l'influence kantienne de ses travaux, nous avons trouvé dans la conférence¹² donnée à Königsberg en décembre 1854, cette proposition significative :

Kant, contemplateur enthousiaste de la composition physique de la terre et de la structure du monde, avait entrepris l'étude des ouvrages de Newton : il prouva combien il en avait pénétré les idées fondamentales en émettant lui-même la féconde pensée que la même force d'attraction qui existe dans toute la matière pondérable, et qui entretient aujourd'hui le mouvement des planètes, pouvait bien avoir existé dans la matière disséminée en vapeur dans les espaces, et formé le système du monde.¹³ [Helmholtz 1854, 31]

Ces écrits justifient l'importance de la force d'attraction, force centrale à l'origine du raisonnement d' Helmholtz. Cette interprétation est renforcée lorsque dans la suite de ce même texte il affirme à propos de Laplace : « Plus tard, de son côté [. . .], Laplace, conçut la même idée et la propagea chez les astronomes » [Helmholtz 1854, 31] situant ainsi les travaux de ce dernier dans la droite ligne de ceux de Kant qui apparaît, dans les écrits d'Helmholtz, comme étant le seul véritable précurseur¹⁴.

¹⁰« . . . dans tout système soumis d'une manière entièrement générale à la loi de la conservation de la force vive, les forces élémentaires des points matériels sont des forces centrales. » [Helmholtz 1847c, 71]

¹¹Il s'agit du texte d'une conférence donnée par Helmholtz à Königsberg le 7 décembre 1854. Le texte « *Exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles* » est publié avec le « *Mémoire sur la conservation de la force* », traduction française de L. Pérard de 1869.

¹²Voir la note 19.

¹³Voir également la référence à Kant et Laplace relativement à l'organisation de la matière sous forme de nébuleuses lors de la constitution de l'Univers, p. 29.

¹⁴Notre approche se limite à présenter l'influence de Kant comme l'un des éléments essentiels à la compréhension des travaux d' Helmholtz. L'analyse de cette influence et toutes les nuances qu'il convient d'apporter relativement à cette question ont été débattues à plusieurs reprises. Voir plus particulièrement « *Helmholtz and Kant : the Metaphysical Foundations of Über die Erhaltung der Kraft* », [Heimann 1974b].

2 Le principe de conservation de la force

« Nous admettons l'impossibilité de créer de rien une force motrice durable par une combinaison quelconque de corps. » [Helmholtz 1847c, 5] L'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel constitue pour Helmholtz, comme cela avait déjà été le cas pour Carnot et Clapeyron, un principe fondateur sur lequel l'ensemble de la théorie repose. Helmholtz toutefois se démarque de ces deux auteurs en « traduisant » ce principe à l'aide de concepts mécaniques qui en permettent la formalisation. Ainsi, la conversion du travail et de la force vive est exprimée mathématiquement à l'aide de l'expression suivante dont Helmholtz précise qu'il s'agit de la loi de conservation de la force vive :

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2, \quad (1)$$

le premier terme correspond au travail consommé ou produit ; le second est selon Helmholtz la « moitié de la force vive ».

L'argument d'Helmholtz repose sur le fait qu'au cours d'un cycle d'opérations¹⁵, le bilan en terme de travail est nécessairement nul. Le contraire entraînerait en effet, la possibilité d'obtenir un mouvement perpétuel ; un excès de travail pouvant être utilisé pour produire du mouvement. Ainsi, le travail est ainsi perçu comme une fonction d'état.

Pour Bevilacqua, les travaux des ingénieurs français sont à l'origine de l'approche du concept de travail chez Helmholtz [Bevilacqua 1993]. Il souligne cependant que ce dernier se démarque des études françaises en interdisant toute perte de travail¹⁶, perte systématique pour Carnot et Clapeyron.

Dans la deuxième section, Helmholtz généralise le principe de conservation de la force vive en *Principe de la conservation de la force*. Pour un point de masse m se déplaçant suivant une direction r sous l'influence d'une force d'intensité φ , Helmholtz écrit :

$$\frac{1}{2}md(q^2) = -\varphi dr.$$

En intégrant cette dernière équation entre « Q et q les vitesses tangentielles en deux positions quelconques » et « R et r les distantes corres-

¹⁵L'approche d'Helmholtz consiste à considérer un système de corps soumis à des forces centrales et pour lequel un bilan est effectué une fois que tous les corps de système ont retrouvé leurs positions initiales. Ibid., page 65.

¹⁶Ibid., pages 311–312. Cet aspect sera abordé ultérieurement.

pondantes », il obtient :

$$\frac{1}{2}mQ^2 - \frac{1}{2}mq^2 = \int_r^R \varphi dr, \quad (2)$$

équation dans laquelle le premier membre représente la différence des forces vives entre les deux instants considérés. La définition du second membre donne lieu à une justification détaillée : « Appelons *tension* la force qui tend à mouvoir le point matériel m , avant que le mouvement soit effectué, par opposition à ce que la mécanique appelle *force vive* » [Helmholtz 1847c, 73]. Ainsi, le second membre de (2) est qualifié de *Quantité des Tensions*, et la définition qu'en donne Helmholtz évoque davantage un potentiel qu'un travail comme cela est le cas avec l'équation (1). La différence entre le terme de « *Arbeit* » qui exprime le travail et celui de « *Spannkräfte* » qui désigne la force de tension, a été pointée par les historiens qui soulignent l'aspect novateur de cette distinction, préfigurant ainsi la notion d'énergie potentielle¹⁷. Par ailleurs Helmholtz exprime avec la conservation de la force, non pas un simple principe d'interconversion, mais un véritable principe de conservation pour lequel **la force apparaît comme le dénominateur commun des diverses interconversions étudiées.**

Ainsi, en associant la conservation de la force vive à son concept de potentiel ou d'énergie potentielle, *c'est la conservation de l'énergie mécanique que Helmholtz exprime dans la seconde partie de son texte*, et c'est cette conservation qu'il va généraliser à d'autres domaines de la physique.

3 « Equivalent de la force et de la chaleur » (section IV)

3.1 La chaleur, son équivalent mécanique et les pertes

« Ce que l'on a appelé jusqu'ici quantité de chaleur, n'est qu'une façon d'exprimer, d'une part, la quantité de force vive du mouvement calorifique, d'autre part, l'énergie potentielle des atomes, qui, par une modification de leur arrangement, peuvent être causes d'un pareil mouvement » [Helmholtz 1847c, 92].

¹⁷Pour cette question voir [Bevilacqua 1993, 315–316] et [Pourprix 2003, 98].

Alors qu'il tente d'expliciter le mouvement en se référant aux travaux d'Ampère¹⁸, Helmholtz conclut son développement sur la chaleur en indiquant que la connaissance de sa nature s'avère accessoire devant la nécessité d'appréhender la chaleur en terme de mouvement. La substitution de la conservation de la force à la conservation du calorique est ensuite immédiate : « La conservation de la force aurait lieu dans ce mouvement [c'est à dire la chaleur] dans tous les cas où l'on a reconnu la conservation du calorique¹⁹ ... » Cette substitution en rejetant la conservation du calorique montre qu'Helmholtz semble intégrer le concept de chaleur à la conservation de la force. Cependant, pour illustrer son principe de conservation, Helmholtz limite les exemples²⁰ à des processus purement caloriques tels que la conductibilité ou le rayonnement, et l'exposition et le traitement d'une situation abordant simultanément des échanges de chaleur et de travail ne sont pas évoqués.

Ainsi, dans ce chapitre consacré à l'équivalent de la force et de la chaleur, Helmholtz ne semble pas viser l'extension de son principe de la conservation de la force aux phénomènes de la chaleur afin de prolonger l'étude entreprise dans les chapitres précédents ; son objectif paraît résider davantage dans la volonté de mettre en adéquation les phénomènes caloriques et le principe de conservation. Finalement, de façon paradoxale, si la chaleur est présentée comme un concept cohérent avec le principe de conservation de la force, son approche indépendante des concepts mécaniques largement explicités lors de l'établissement du principe de conservation, lui confère le statut de concept autonome. Incontestablement l'approche d'Helmholtz est novatrice : la conservation de la force succède à la conservation du calorique. Cependant, elle semble limitée : pourquoi les phénomènes calorifiques sont-ils traités indépendamment ?

Toutefois, deux brefs exemples, présentés en introduction du chapitre « équivalent de la force et de la chaleur », traitent à la fois des phénomènes mécaniques et caloriques. Dès lors, il est intéressant d'examiner le statut accordé au concept de chaleur lorsque des processus mécaniques sont évoqués.

L'étude des chocs pour des corps non élastiques ou la prise en compte des frottements lors d'un mouvement quelconque sont les exemples que

¹⁸ « ... il semble qu'une hypothèse analogue aux vues d'Ampère peut résumer l'état de la science à ce sujet » et Helmholtz annonce que chaque molécule peut avoir trois types de mouvements : « 1° Déplacement du centre de gravité ; 2° Rotation autour du centre de gravité, 3° Déplacements relatifs de ces différents éléments. » Ibid., page 93.

¹⁹Ibid., page 93.

²⁰Il s'agit de la conductibilité, le rayonnement et les échanges de chaleur intervenant lors des changements d'état

Helmholtz qualifie de « faits mécaniques dans lesquels on admet jusqu'à présent une perte de force » [Helmholtz 1847c, 87]. La mise en défaut du principe de conservation de la force est alors interprétée comme la perte de force vive associée au dégagement de chaleur. Ces exemples pointent un problème théorique que devrait lever l'acceptation d'un équivalent mécanique à la chaleur. Comment l'introduction d'un équivalent mécanique permet-elle de résoudre le problème des pertes et de rendre cohérent l'ensemble de la théorie ?

En fait, cette question n'est pas directement abordée par Helmholtz qui interroge la nature de la chaleur et son lien avec la force :

« Une certaine perte de force mécanique entraîne-t-elle toujours le dégagement d'une quantité de chaleur déterminée ? Et jusqu'à quel point une quantité de chaleur peut-elle correspondre à son équivalent de force mécanique ? » [Helmholtz 1847c, 88].

Les analyses qu'il apporte lui permettent de conclure positivement à la première question et d'affirmer une nature dynamique pour la chaleur. D'autre part, bien que l'ajout d'une note à la traduction française de 1869 indique clairement l'acceptation des résultats obtenus par Joule, et lève ainsi toute ambiguïté concernant la consommation de chaleur mise en jeu dans la production de travail, le texte de 1847 témoigne des doutes persistants relatifs à cette implication²¹.

Finalement, si l'association des pertes de force mécanique et de la chaleur constitue un élément de réponse à la mise en cohérence de l'ensemble de la théorie, la réponse reste implicite car Helmholtz ne suggère aucune approche structurée permettant d'intégrer ces dégagements de chaleur au principe de conservation de la force. Par ailleurs les incertitudes concernant la consommation de chaleur dans la production d'effet mécanique, ne lui permettent pas de pointer le paradoxe qu'il y a à accepter l'existence d'un rendement limité aux machines²² et l'équivalent mécanique de la chaleur.

Ce point de vue est à rapprocher des travaux de William Thomson qui durant la même période s'interroge sur les pertes d'effet dues aux frottements des fluides en mouvement ainsi que sur celles systématiquement observées lors du fonctionnement des machines. La singularité du

²¹ « Quoique la production de chaleur soit hors de doute, on en a aussi peu cherché les lois et les conditions que les lois et les conditions de sa disparition. » [Helmholtz 1847, 94].

²² Le travail de Sadi Carnot, notamment la notion de rendement des machines à vapeur est connu d'Helmholtz.

travail de Thomson réside dans la prise en compte de ces pertes, exprimées sous forme de chaleur, lors de l'établissement des bilans en terme de travail. Et, en définitive, si la réponse apportée par Thomson semble s'opposer à la formulation de tout principe de conservation (il s'agit de concilier les pertes et une conservation), la saisie du problème (comment justifier ces pertes), s'avèrera particulièrement féconde²³.

En résumé, les pertes, et par conséquent la chaleur associée, ne sont pas prises en compte lors de l'établissement de la conservation de la force pour des processus mécaniques et l'« équivalent de la force et de la chaleur » n'apporte pas de réelle réponse aux problèmes des chocs non élastiques ou de la prise en compte du frottement évoqués en début de chapitre. Il semble que le principe de conservation de la force présente ici une limite à sa généralisation. Deux éléments permettent de préciser cette limite, il s'agit d'une part de l'analyse mathématique et d'autre part, des relations entretenues entre les grandeurs macroscopiques et les grandeurs microscopiques.

3.2 Des limites à la généralisation du principe de conservation de la force

Comme cela vient d'être évoqué, c'est à l'aide de données microscopiques, la quantité de force vive du mouvement calorifique et l'énergie potentielle des « atomes », qu'Helmholtz exprime la chaleur avant d'indiquer qu'il convient de transposer à la conservation du calorique la conservation de la force [Helmholtz 1847c, 93]. Cette étape essentielle vers la généralisation de la conservation de la force n'est cependant pas précisée : comment en effet interprète-t-il cette conservation impliquant des grandeurs microscopiques ? Quel lien existe-t-il entre cette conservation microscopique et la conservation de la force telle qu'elle est présentée tout au long de l'ouvrage, c'est à dire une conservation ne mettant en jeu que des grandeurs macroscopiques ?

Finalement si la quatrième partie du texte de 1847 apporte des éléments novateurs concernant la nature de la chaleur et son équivalent mécanique, le statut du concept de chaleur ne va pas de soi. Ce dernier semble en effet occuper une position à la fois cohérente et indépendante du principe — macroscopique — de conservation de la force. La cohérence résulte de la possibilité d'exprimer la chaleur à l'aide des concepts centraux de la mécanique. L'indépendance résulte du traitement que lui

²³Sur cette question voir [Guedj 2006].

confère Helmholtz en la dissociant de l'étude des phénomènes mécaniques ou en l'assimilant aux pertes lorsque cette étude est abordée.

L'absence d'analyse mathématique constitue un deuxième élément empêchant la généralisation escomptée par Helmholtz. Cette absence, dans le chapitre consacré à l'équivalent de la force et de la chaleur, contraste avec la volonté de développer un raisonnement analytique rigoureux lors de l'établissement de la conservation de la force. Pourquoi cette absence et quelles en sont les conséquences ?

Comme conséquence directe de l'étude proposée dans le paragraphe précédent, l'absence de lien entre les grandeurs physiques microscopiques, mises en jeu dans l'explication de la chaleur, et les grandeurs macroscopiques de la conservation de la force, ne permet pas de produire une expression analytique pour la chaleur.

Il ne s'agit pas de rechercher avec l'équivalent mécanique de la chaleur l'étape cruciale qui mène vers la conservation de l'énergie, la trop grande importance accordée à cet élément par les historiens a été soulignée à plusieurs reprises. Plus encore, les travaux d'Helmholtz corroborent cette approche puisque l'établissement de la conservation de la force ne repose en aucun cas sur cet équivalent. Il est bien évident que la prise en compte de ce dernier, en associant la chaleur au travail, conduit à une expression analytique en lien direct avec le principe de la conservation de la force vive²⁴ et autorise alors un principe de conservation plus généralisé car il intègre la chaleur.

Cette absence d'analyse souligne d'une part, le caractère autonome de la chaleur et laisse d'autre part en état le problème des pertes lorsque des forces mécaniques sont produites à partir de la chaleur. Quel est le statut de ces pertes ? Helmholtz n'envisage pas ce problème comme partie intégrante de son principe de conservation de la force.

Il convient toutefois de remarquer que la position de ce dernier vis-à-vis des pertes évoluera sensiblement. Ainsi, à l'occasion de la conférence donnée à Kœnigsberg en 1854, Helmholtz indique avoir accepté les résultats de Joule, puis il précise : « Cependant, de ce qu'aucune minime portion de force ne peut s'anéantir, on ne peut conclure qu'elle ne puisse rester stérile pour l'usage de l'homme » [Helmholtz 1854, 27].

Ce court passage, bien que postérieur au texte de 1847, est l'un des seuls montrant l'importance des pertes pour Helmholtz. Cependant, n'ayant pas lui-même abordé la question de la conservation via celle des pertes, il renvoie sur ce point son lecteur aux travaux de Thomson et

²⁴Nous rappelons l'inflexion d'Helmholtz vers l'équivalent mécanique de la chaleur, voir [Helmholtz 1847c, 89].

Clausius²⁵. Concernant l'analyse mathématique et la prise en compte des grandeurs macroscopiques et microscopiques, il est particulièrement intéressant d'examiner les travaux d'Helmholtz à la lueur de ceux de Clausius. En effet, l'approche de ce dernier contribue à clarifier ces deux éléments, confirmant ainsi l'intérêt du renvoi indiqué par Helmholtz. Cet aspect des travaux de Clausius et leur réception par Helmholtz sont présentés dans la partie suivante.

3.3 Théorie de la chaleur : apports de Clausius, réception d'Helmholtz

Dans l'introduction au Mémoire 1 de la *Théorie mécanique de la chaleur* [Clausius 1868], texte publié en 1850, Clausius rédige un historique bref et efficace présentant les principaux éléments qui rendent compte de la théorie : « La recherche la plus importante sur ce sujet est due à S. Carnot... »²⁶, il souligne dans les travaux de ce dernier la nécessité d'avoir deux corps de températures différentes et indique que le transport de la chaleur entre ces deux corps est la condition impérative à l'obtention d'un travail. Par ailleurs, convaincu par les expériences de Joule²⁷, il signale que l'obtention d'un travail résulte de la consommation, et non du simple transport de la chaleur et conclut : « ... la chaleur n'est pas de la matière, mais consiste dans un mouvement des molécules des corps... » [Clausius 1868, 18]

C'est notamment en s'appuyant sur l'équivalent mécanique de la chaleur, qu'il va préciser la notion de chaleur et indiquer les relations entre chaleur et travail. A cet égard, trois éléments novateurs semblent plus particulièrement se dégager de ce mémoire. Ainsi, au cours d'un cycle d'opérations subies par un gaz, Clausius montre que la *chaleur latente* n'existe pas, qu'il est nécessaire de distinguer les grandeurs intérieures et extérieures interagissant avec le système et enfin que l'impossibilité de la conservation de la chaleur résulte de cette distinction.

Le premier point concerne la définition de la chaleur totale et plus particulièrement celle de la chaleur latente ²⁸ lorsque l'hypothèse de

²⁵Voir les ajouts à la traduction française, [Helmholtz 1847c, 97], ainsi que [Helmholtz 1854, 27]

²⁶Ibid., p. 18. Il faut noter qu'au moment de la rédaction de ce premier mémoire, Clausius indique qu'il n'est toujours pas en possession du texte de Carnot et que ce sont les écrits de Clapeyron et de W. Thomson qui lui servent de support.

²⁷Clausius ne donne pas d'autre explication, sinon celle liée à la précision des expériences décrites par Joule, pour justifier l'existence d'un équivalent mécanique de la chaleur.

²⁸Clausius reprend la distinction introduite par Carnot et précisée par Clapeyron

l'existence d'un équivalent mécanique de la chaleur est adoptée.

« On parle souvent de la *chaleur totale* des corps, surtout de celle des gaz et des vapeurs, en comprenant sous cette dénomination la somme de la chaleur libre et de la chaleur latente... » [Clausius 1868, 22]

Le choix d'une nature dynamique pour la chaleur le conduit à conclure relativement à la chaleur latente : « [cette] dernière n'est pas seulement, comme le nom l'indique, *cachée* à notre perception, elle *n'existe pas le moins du monde* ; elle a été *consommée* en travail dans les changements d'état. » [*idem.*, 24] En effet, dans le cadre de l'hypothèse du calorique, justifier l'existence de la chaleur latente revient à justifier la disparition momentanée d'une fraction de matière.

Le deuxième point est lié à la nécessité introduite par Clausius de préciser le découpage entre la chaleur et le travail en distinguant des grandeurs qualifiées d'externes de celles qualifiées d'internes. Cette distinction joue un rôle essentiel dans la théorie car Clausius, par la suite, considérera que seules les grandeurs internes se conservent au cours d'un cycle d'opérations.

Ainsi, il présente deux aspects pour le travail produit :

« D'abord il faut un certain travail pour vaincre l'attraction mutuelle des molécules d'eau et les porter à la distance à laquelle elles se portent les unes des autres dans la vapeur. Ensuite la vapeur doit en se développant repousser une pression extérieure pour se créer de l'espace. Nous appellerons le premier travail *intérieur*, le second *extérieur*, et nous ferons la même distinction pour la chaleur latente. » [*idem.*, 24]

Par ailleurs, au cours d'un cycle d'opérations, le travail extérieur ne peut être nul, parce qu'il dépend de grandeurs comme la pression ou la température. Finalement, en accord avec l'équivalent mécanique de la chaleur :

« la quantité de chaleur qui doit être communiquée à un corps pour le faire passer d'un état à un autre, ne dépend pas seulement de l'état initial et final, mais encore de toute la voie que suit la modification, cela ne se rapporte qu'à *la partie* de la chaleur *latente* qui répond au travail extérieur. » [*idem.*, 24]

entre deux types de chaleur (chaleur libre et chaleur latente). Ce découpage permet par exemple de justifier une détente isotherme, alors qu'un échange de chaleur intervient entre le réservoir et le corps, ou encore une détente adiabatique pour laquelle la température diminue sans qu'aucun échange de chaleur ne soit intervenu.

Ainsi, ni le travail ni la chaleur ne sont des fonctions d'état ; la chaleur n'est pas une grandeur conservative.

C'est la question de la formalisation analytique qu'il convient enfin d'examiner. Ainsi, en travaillant à partir d'un cycle d'opérations, Clausius exprime un rendement c'est à dire la détermination du rapport entre les grandeurs produites et consommées :

$$\frac{\text{Chaleur}_{\text{ consommée}}}{\text{Travail}_{\text{ produit}}} = A$$

où « *A* est une constante qui représente l'équivalent de la chaleur pour l'unité de travail. » [*idem.*, 33] L'expression du travail résulte de la « combinaison des lois de Mariotte et de Gay-Lussac » [*idem.*, 26] et du fait que le travail produit se confond avec l'aire du parallélogramme décrit par les différentes opérations du cycle. Pour chacune d'entre elles, Clausius exprime la variation infinitésimale de chaleur qui correspond à une variation de volume et de température. Il obtient ainsi l'expression de la chaleur consommée²⁹ et exprime le rendement :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dQ}{dv} \right) - \frac{d}{dv} \left(\frac{dQ}{dt} \right) = \frac{A.R}{v}. \quad (\text{I})$$

La chaleur n'est pas une fonction d'état, l'équation (I) constitue à cet égard une preuve immédiate, un élément quasiment « visuel » étant donnée la structure même de l'équation. L'objectif de Clausius est désormais de montrer dans quelle mesure Q , la chaleur, se distingue d'une fonction d'état. Quel écart existe-t-il entre Q fonction d'état et Q considérée comme un équivalent mécanique ? L'intégration de (I) conduit Clausius à l'expression (Ia) de dQ ³⁰ :

$$dQ = dU + AR \frac{a+t}{v} dv, \quad (\text{Ia})$$

« où U est une fonction arbitraire de v et de t ». [Clausius 1868, 35] Si l'introduction de la fonction U n'est pas ici explicitée, son rôle en revanche apparaît immédiatement : il s'agit pour Clausius de distinguer les grandeurs intérieures de celles qui sont extérieures au « système » étudié. Ainsi, U regroupe les grandeurs intérieures alors que le terme

$$AR \frac{a+t}{v} dv$$

²⁹Pour plus de détail sur la formalisation de la chaleur voir [*idem.*, 31–34].

³⁰Comme précédemment, Clausius ne donne dans le texte de 1850 aucun détail de son calcul, et c'est une addition datée de 1864 qui apporte les indications nécessaires. Voir [Clausius 1868, 90–93], Addition B.

est significatif des grandeurs extérieures. Ce dernier terme étant identifié comme le *travail extérieur* produit. Finalement, la chaleur totale reçue par un corps se décompose d'une part entre la chaleur interne qui comprend la chaleur libre et le travail interne et qui est une fonction déterminée par l'état initial et final et d'autre part le travail extérieur qui n'est pas une fonction d'état.

Ainsi, l'approche développée par Clausius le conduit à formaliser l'expression analytique qui lie le travail et la chaleur ainsi qu'à préciser les grandeurs conservatives.

L'Exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles [Helmholtz 1854], constitue un texte central significatif de la réception des travaux de Clausius par Helmholtz et de l'évolution de la pensée de ce dernier.

En effet, l'interprétation qu'il donne en 1854 des travaux de Clausius renforce le point de vue selon lequel le principe de conservation de la force présente des limites à la généralisation. Helmholtz revendique en conséquence, l'indépendance de la loi de Carnot³¹ vis à vis du principe de conservation de la force et poursuit son intervention en affirmant : « mais Clausius l'a interprétée [la loi de Carnot] de façon à la rendre compatible avec ce principe général ». Helmholtz évoque ici implicitement le paradoxe auquel le lecteur est confronté lorsqu'il découvre simultanément une limitation à la transformation de la chaleur en travail et l'existence d'un équivalent mécanique de la chaleur. La mise en cohérence des résultats de Joule et Carnot par Clausius ne résulte pas, comme le laisse entendre Helmholtz, de la seule nécessité de présenter une théorie excluant toutes les propositions contradictoires. Clausius en effet dénoue le paradoxe apparent des théories de Carnot et Joule en rejetant la conservation de la chaleur et en affirmant, lors du fonctionnement des machines, l'existence simultanée de la production de chaleur en travail et le transport d'une quantité de chaleur du corps chaud vers le corps froid³². Ce processus nécessite par ailleurs d'appréhender l'implication délicate entre la chaleur et le travail pour l'équivalent mécanique pour la chaleur. Dès lors, en indiquant qu'une partie seulement de la chaleur donne lieu à la pro-

³¹ « La chaleur qui se transmet d'un corps chaud à un plus froid peut seule, et en partie seulement, être transformée en travail » [Helmholtz 1854, 27].

³² « Mais en y réfléchissant de plus près, on trouve que ce n'est pas le principe fondamental même de Carnot, mais l'assertion qu'il ajoute *qu'il n'y a pas de chaleur perdue*, qui est en contradiction avec la nouvelle manière de voir ; car dans la production du travail il peut bien se faire en même temps qu'une certaine quantité de chaleur soit consommée et qu'une autre soit transportée d'un corps chaud à un corps froid et les deux quantités de chaleur peuvent se trouver dans un rapport déterminé avec le travail produit... » Clausius [1868, 21]

duction de travail, Clausius aborde, quoique implicitement, la question des pertes en soulignant le transfert d'une partie de la chaleur du corps chaud vers le corps froid.

Plus encore, sans émettre d'hypothèse sur la nature de la chaleur autre que celle du mouvement³³, il formule une expression analytique pour la chaleur qui associe des grandeurs microscopiques et macroscopiques sans que la conservation de la force, ou d'une autre grandeur ne soit ici exprimée. Cette cohérence chez Clausius ne relève pas de la simple juxtaposition des travaux de Carnot et Joule mais bien de la nécessité de considérer ces travaux comme les fondements de la théorie.

Dans la conférence de 1854, Helmholtz, pourtant très au fait des questions traitées par Clausius, appréhende le travail de ce dernier à travers le prisme de son principe de conservation de la force sans que l'aspect unificateur du travail de ce dernier soit souligné.

4 Conclusion : de la conservation de la force à la conservation de l'énergie

Nous avons évoqué un certain nombre d'éléments qui constituent chez Helmholtz une limitation à la généralisation de la conservation de la force vers la conservation de l'énergie. Par suite, le lien entre les approches macroscopiques et microscopiques n'est pas clairement identifié, le statut réservé à la chaleur ne la positionne pas à égalité avec les autres grandeurs de la mécanique et l'absence d'analyse mathématique concernant les phénomènes caloriques constitue également un facteur limitatif. Ces aspects nous paraissent singuliers chez Helmholtz qui connaît les travaux d'ingénieurs comme Navier ou Coriolis³⁴ et ceux de Joule et qui ramène ses « principes de départ »³⁵ à ceux de la mécanique analytique.

C'est sans doute dans les principes, qui sous-tendent l'ensemble des travaux de physiologie et de physique d'Helmholtz, qu'il convient de chercher l'origine de ces aspects. Ainsi, le rôle accordé à l'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel a été commenté à plusieurs reprises.

³³Clausius donne une interprétation mécaniste de la chaleur.

³⁴Voir la partie consacrée au contexte dans la partie 1.

³⁵« Deux idées peuvent être prises pour point de départ de ces principes : la première, c'est l'impossibilité d'accumuler indéfiniment du travail par les effets d'une combinaison quelconque de corps. La seconde, c'est la possibilité de ramener toutes les actions de la nature à des forces attractives et répulsives dont l'intensité ne dépend que de la distance des points qui agissent les uns sur les autres. » [Helmholtz 1847c], Introduction.

Les auteurs soulignent que l'un des principaux objectifs³⁶ d'Helmholtz est de rejeter, en se basant sur l'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel, la thèse du vitalisme, laquelle interroge ardemment les milieux de la physiologie allemande. Dès lors, les méthodes de la physique, plus précisément celles de la mécanique analytique, en tenant lieu de modèle pour la physiologie crédite cette dernière d'une rigueur qui lui fait défaut³⁷. C'est notamment dans ce contexte qu'il convient d'appréhender le principe de conservation de la force qui apparaît comme une traduction analytique de l'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel³⁸.

Le texte intitulé « De l'application de la loi de la conservation à la nature organique » [Helmholtz 1861, 29–41] de 1861 constitue une référence intéressante qui éclaire le principe de conservation de la force et accentue, davantage encore, l'importance accordée par Helmholtz à l'impossibilité d'obtenir un mouvement perpétuel : « Nous pourrions exprimer le sens de la loi de la conservation de l'énergie en affirmant que chaque force naturelle épuise et perd le pouvoir de causer la même altération une seconde fois. Mais alors que pour chaque altération naturelle, la force qui en a été la cause se dépense, il y a toujours une autre force dont le pouvoir de produire d'autres altérations croît, l'augmentation étant équivalente à la dépense de pouvoir de la première force. Ainsi, bien qu'il appartienne à la nature de chaque force inorganique de s'épuiser par sa propre action, la puissance de l'ensemble du système dans lequel se produit l'altération n'est ni épuisée, ni augmentée en quantité, mais seulement modifiée dans sa forme. » [Helmholtz 1861, 30]

Cette présentation de la conservation de l'énergie repose essentiellement sur le principe, généralisable à tous les domaines des sciences de la nature, de la conversion qualitative et de la conservation quantitative de la force, et apparaît ainsi comme la transcription physique de l'idée centrale chez Helmholtz selon laquelle il est impossible d'obtenir quelque chose à partir de rien. Les différents exemples présentés ensuite, pour illustrer le principe de conservation ainsi défini, appuient davantage les notions de conversion et de transformation. Par conséquent, hormis le cas des machines, succinctement abordé, le problème des pertes n'est

³⁶En 1845 déjà, Helmholtz soulignait que : « L'une des questions les plus brûlantes dont traite la physiologie concerne l'essence de la force vitale dans toute son immédiateté. Est-ce que la vie des corps organisés résulte d'une force autonome qui se renouvelle sans cesse par elle-même et qui agit conformément à ses fins, ou est-elle le produit des forces déjà présentes dans la nature inanimée, mais modifiées par le mode particulier de leur concours ? » [Helmholtz 1845, 13].

³⁷Pour cette question, voir [Pourprix 2003, 95], et [Bevilacqua 1993, 299].

³⁸Sur l'approche commune entre la physiologie et la physique voir Helmholtz [1861, 35].

toujours pas traité alors que l'équivalent mécanique de la chaleur est ici clairement identifié³⁹.

Finalement, c'est dans le cadre d'une mécanique conservative qu'il convient d'apprécier les travaux d'Helmholtz, notamment son texte de 1847. Cette approche, pour laquelle les chocs et les frottements sont discutés en terme de processus microscopiques, présente les pertes de forces vives comme résultant de mouvements moléculaires internes : les pertes n'étant alors qu'apparentes. Dès lors, il est plus aisé d'interpréter les restrictions que nous avons pointées (l'absence de discussion autour de la question des pertes, le statut de la chaleur, le défaut d'analyse de la section IV...), comme résultant de l'attachement d'Helmholtz à une mécanique conservative pour laquelle l'influence des ingénieurs français est non négligeable [Grattan-Guinness 1984, 32–33] et [Darrigol 2001, 341–343].

En résumé, et conformément à ce qui est annoncé dans l'introduction au texte de 1847, l'objectif d'Helmholtz est de donner un statut universel et fondateur au principe selon lequel il est impossible d'obtenir un mouvement perpétuel. La mécanique analytique, dont les principes se réduisent à celui de la conservation de la force vive, constitue le cadre idéal qui permettra la formalisation analytique de l'impossibilité de mouvement perpétuel de première espèce sous la forme du principe de conservation de la force.

Paradoxalement, cette approche, qui fait d'Helmholtz l'un des promoteurs de la mécanique conservative, ne lui permet pas de formuler un principe de conservation qui soit généralisé.

« Le système énergétique a pris naissance à la suite de la découverte du principe de la conservation de l'énergie ; c'est Helmholtz qui lui a donné sa forme définitive » [Poincaré 1902, 139].

Si Poincaré indique ici clairement son point de vue concernant l'apport des travaux d'Helmholtz, il ne manque cependant pas d'ajouter :

« Mais ce n'est pas tout, il faut tenir compte non seulement de l'énergie mécanique proprement dite mais également des autres formes d'énergie... » [Poincaré 1902, 142],

³⁹Dans le passage qu'il consacre à la production de travail par la chaleur, Helmholtz précise sans ambiguïté, que l'on observe une perte de chaleur. Cependant, il ne donne aucune indication permettant d'appréhender cette perte dans le cadre de son principe de conservation. Voir [Helmholtz 1861, 32].

renvoyant ici à la nécessité d'établir un principe de conservation de l'énergie qui soit général. C'est dans la même direction qu'opère Brunhes lorsqu'il pointe la limite constituée par un principe de conservation mettant uniquement en jeu les grandeurs mécaniques que sont les énergies cinétiques et potentielles :

« Il faut à tout prix faire intervenir la notion de chaleur dans la définition de l'énergie, sous peine de sacrifier la vérité à une fausse simplicité » [Brunhes 1909, 268].

En évoquant la nécessité d'associer la chaleur à la définition de l'énergie, Brunhes ne soulève qu'un des aspects du problème. L'impossibilité d'introduire le concept d'énergie interne si la chaleur n'est pas clairement identifiée⁴⁰, ainsi que l'absence de distinction, entre les grandeurs internes et extérieures au système étudié, sont également des éléments significatifs de ce problème. C'est en ce sens que le principe de conservation de l'énergie introduit par Helmholtz est limité même si sa présentation permet d'appréhender le bilan énergétique de systèmes autres que des systèmes mécaniques⁴¹.

Transposée à la conservation de l'énergie, il n'y a qu'un pas entre cette analyse et la conclusion de Poincaré qui annonce : « Le mécanisme est incompatible avec le théorème de Clausius » [Poincaré 1908]⁴². Et finalement la question qui se pose est la suivante : une théorie mécanique de la chaleur constitue-t-elle un cadre pertinent pour que le principe de conservation de l'énergie puisse être formulé de façon générale ? En effet, cela a déjà été souligné, pour les questions relatives à l'« équivalent de la force et de la chaleur », dans les ajouts au texte de 1847 ainsi que dans des conférences plus tardives⁴³, Helmholtz renvoie son lecteur vers les travaux de Thomson et Clausius. Ces auteurs avec des approches très différentes parviennent à exprimer un principe de conservation qui prend en compte la chaleur et distingue, tant pour le travail que la chaleur, les grandeurs intérieures des grandeurs extérieures au système. Ainsi, Thomson définit dans le cadre d'une théorie dynamique [Smith & Wise

⁴⁰Il ne s'agit pas de détailler davantage la nature de la chaleur mais de s'interroger sur les liens entretenus par le concept de chaleur avec les grandeurs mécaniques mobilisées pour exprimer le principe de conservation de l'énergie.

⁴¹Dans les sections V et VI Helmholtz transpose son principe de conservation de la force notamment aux domaines de l'électricité et du magnétisme, son approche repose entièrement sur les résultats obtenus dans le cadre de la mécanique.

⁴²Voir la préface XVIII.

⁴³Voir par exemple la conférence de 1854 déjà citée ou la série de conférences données à Carlsruhe pendant l'hiver 1862-1863, in *Science and Culture Popular and Philosophical Essays Hermann von Helmholtz*, Edited with an introduction by D. Cahan, The University of Chicago Press, 1995.

1989, 237-281] de la chaleur, *l'énergie mécanique totale*, expression qui correspond en fait à une énergie totale dont l'une des composantes est bien identifiable à l'énergie interne même si le terme n'est pas formulé tel quel par Thomson.

Nous avons rappelé le contexte de la théorie mécanique de la chaleur dans lequel Clausius introduit la différentielle totale U qui regroupe les grandeurs intérieures au système. C'est en montrant que ni le travail ni la chaleur, ne sont des fonctions d'état, qu'il est amené à faire cette introduction.

En définitive, ni Thomson ni Clausius ne donnent, au début des années 1850, une définition de l'énergie introduisant explicitement le concept d'énergie interne, pourtant, chacun d'eux, avec un style qui lui est propre, pointe les éléments nécessaires à la généralisation du principe de conservation de l'énergie.

L'intention est plus remarquable chez Thomson considéré avec Helmholtz, comme l'un des promoteurs d'une mécanique conservative. La singularité de Thomson réside sans doute dans la volonté de saisir à tout prix le problème des pertes quitte à sortir un peu du cadre délimité par la mécanique conservative, ce qu'Helmholtz, par souci de généralité, n'a pas entrepris.

Remerciements

Que Michel Paty trouve ici l'expression de mes remerciements pour ses encouragements à publier cet article.

Bibliographie

BEVILACQUA, F.

1993 Helmholtz's Ueber die Erhaltung der Kraft : The Emergence of a Theoretical Physicist, in *H. von Helmholtz and the Foundations of Nineteenth-Century Science*, D. Cahan éd., Californie : University of California Press.

BRUNHES, B.

1909 *La dégradation de l'énergie*, Paris : Flammarion, 1991.

BRUSH, S. G.

1976 *The Kind of Motion we call Heat (an History of the Kinetic Theory of Gases in the XIXth century)*, 1. *Physics and Atomists*,

2. *Statistical Physics and Irreversible Processes*, E.W. Montroll et J.L. Lebowitz éds, Amsterdam : North Holland Publishing Company.

CARDWELL, D. S. L.

1967 Some factors in the early development of the concepts of power, work and energy, *The British Journal for the History of Science*, 3, 209–224. 1971 *From Watt to Clausius. The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*, Londres : Heinemann, 1971.

CARNOT, S.

1824 *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, (1824), Edition critique par Fox, Paris : Vrin, 1978.

CLAUSIUS, R.

1868 *Théorie mécanique de la chaleur*, 2 volumes, traduction française par Folie : Paris, Lacroix, 1868 ; fac similé, Paris : Gabay, 1991.

DARRIGOL, O.

2001 God, waterwheels, and molecules : Saint-Venant's anticipation of energy conservation, *Historical Studies in Physical Sciences*, 31, 285–353.

DUHEM, P.

1895 Les théories de la chaleur, *Revue des Deux Mondes*, 129, 869–901 in [Duhem *L'évolution de la mécanique*, Paris : Vrin , 1992 349–462].

ELKANA, Y.

1970 Helmholtz's "Kraft" : An Illustration of Concept in Flux, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 2, 263–298.

GARBER, E.

1999 *The Language of Physics. The Calculus and the Development of Theoretical Physics in Europe, 1750-1914*, Boston : Birkhäuser.

GILLIPSIE, C.C. ED.

1970 *Dictionary of Scientific Biography*, New York : Charles Scribner's sons, 1980.

GRATTAN-GUINNESS, I.

1981 Work and the workers : Advances in Engineering Mechanics and Instruction in France : 1800-1830, *Annals of Science*, 41, 1–33.

GUEDJ, M.

2000 *L'émergence du principe de conservation de l'énergie et la construction de la dynamique*, thèse soutenue le 17/02/2000 auprès de l'Université Paris 7. Travail dirigé par Michel Paty.

2006 Du concept de travail vers celui d'énergie : l'apport de Thomson, *Revue d'Histoire des Sciences*, janvier-juin 2006, 59–1, 29–50.

HEIMANN, P.M.

1974a Conservation of force and the conservation of energy, *Centaurus*, 18, 147–164.

1974b Helmholtz and Kant : the Metaphysical Foundations of « Über die Erhaltung der Kraft. », *Studies in History and Philosophy of Sciences*, 5 (3), 205–238.

HELMHOLTZ, H.

1845 De la combustion de la matière dans l'action musculaire, *Philosophia Scientiæ*, 7 (1), 13–21, 2003.

1847a *Über die Erhaltung der Kraft, eine Physikalische Abhandlung*, Berlin : Reimer.

1847b Traduction anglaise par Tyndall : On the Conservation of Force, in *Scientific Memoirs, Natural Philosophy*, Tyndall et Francis (éds), London : Taylors and Francis, 1853.

1847c Traduction française par Pérard : *Mémoire sur la conservation de la force*. Précédé d'un *Exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles*, Paris : Masson, 1869.

1854 *Exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles*, traduction française par Pérard, Paris : Masson, 1869.

1861 De l'application de la loi de la conservation de la force à la nature organique, *Philosophia Scientiæ*, 7 (1), 2003 : 29–41.

KUHN, T. S.

1959 Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery, in : *Critical Problems in the History of science*, M. Clagett, dir. Publ., University of Wisconsin Press, Madison, 1989, p. 321–356 ; traduction française de M. Biezunski, P. Jacob, A. Lyotard-May et G. Voyat : *Un exemple de découverte simultanée : la conservation de l'énergie*, Paris : Gallimard, 1990.

MACH, E.

1900 *Principles of the Theory of Heat. Historically and Critically Elucidated*, ed. B. Mc Guinness, (de la deuxième édition, 1911), Reidel Publication, 1986.

- 1904 *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, traduction de E. Bertrand, Paris : Hermann, 1904 ; Fac. similé J. Gabay, 1987.
- 1909 *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*, traduction de P. Jourdain, Londres : The Open Court Publishing co, 1911.
- MOYER, D. F.
- 1977 *Energy, Dynamics, Hidden Machinery* : Rankine, Thomson and Tait, Maxwell, *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 8, num. 3, 1977, p. 251–169.
- POINCARÉ, H.
- 1902 *La science et l'hypothèse*, Champs Flammarion, 1968.
- 1908 *Thermodynamique*, Paris : Gauthier-Villars, 1908 ; *Fac similé*, J. Gabay, 1995.
- POURPRIX, B.
- 2003 *La fécondité des erreurs*, Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaires du Septentrion.
- SMITH, C.
- 1990 *Energy, Companion to the History of Modern Science*, Ed. Olby, Cantor, Christie et Hodge, Routledge.
- SMITH, C. & WISE, M. N.
- 1989 *Energy and Empire. A Biographical Study of Lord Kelvin*, Cambridge : Cambridge University Press.
- STEWART, B.
- 1875 *La conservation de l'énergie*, Paris : G. Baillière.
- THOMSON, W.
- 1849 *An Account of Carnot's Theory on the Motive Power of Heat ; with Numerical Results Deduced from Regnault's Experiments on Steam*, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, lu le 2 janvier 1849 ; *Mathematical and Physical Papers*, 1, 113–155.
- 1851 *On the Dynamical Theory of Heat, with Numerical Results Deduced from Mr. Joule's Equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam*, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, lu le 17 mars 1851 ; *Philosophical Magazine* « série 4 », 4, (23) : 8–21, 105–117, 168–176. *Mathematical and Physical Papers*, 1 : 179.

1852 On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, lu le 19 avril 1852 ; *Philosophical Magazine*, série 4, 304–306 ; *Mathematical and Physical Papers*, 1, 511.