

Chapitre II

L'ÉMERGENCE DU CONCEPT ET DU TERME EN PHYSIQUE

L'énergie est une donnée invisible que posséderaient les objets, et dont les ont affirmé l'invariance. Nous suivrons dans ce chapitre l'évolution des intuitions, des idées, des observations et des réflexions qui ont conduit à préciser cette notion.

L'étude des transformations du monde physique a été le vecteur clé de ce processus. On a commencé par l'examen des plus évidentes, celles liées au simple transport spatial des corps : les physiciens mouvements, leurs causes, ou au contraire ce qui assure l'absence de mouvement par l'équilibre, sont les sujets de réflexion sur lesquels se pencheront, entre autres, Aristote dans l'antiquité, Archimède, Buridan, Oresme, Galilée, Huyghens, Newton, et Lagrange au dix-huitième siècle. On assiste, au fil du temps, à la montée en puissance de la formalisation : les premières descriptions et analyses des faits, exposées dans les termes du langage courant, font place à la représentation géométrique, support actif du raisonnement, puis, dans un dernier temps, à la représentation symbolique dans laquelle l'outil mathématique employé est l'analyse, qui traduit la géométrie dans le nombre.

A partir du dix-neuvième siècle, ce sont les transformations entre les différents modes d'expression du monde physique qui sont observées : les savants s'efforcent de les représenter en faisant appel aux méthodes et outils déjà éprouvés dans l'étude des déplacements des corps dans l'espace usuel. Les transformations de la chaleur en d'autres formes physiques ont tenu une grande place dans cette évolution.

Si, de tout temps, les hommes ont affirmé la pérennité globale de l'univers, c'est par l'étude locale des phénomènes de conservation qu'ils sont parvenus à démontrer ou à affirmer des énoncés généraux, parfois susceptibles d'une représentation mathématique précise. Les réflexions sur la conservation possible de l'*impetus*, de la quantité de mouvement, de l'énergie cinétique, du travail, de la puissance, qui sont des notions locales, définies et étudiées d'abord dans le cadre des déplacements spatiaux, débouchent, autour des années 1840, sur la création d'une notion globale invariante, l'énergie.

Son expression sous la forme ramassée d'un lagrangien, ou de l'action associée à ce lagrangien, est une donnée première pour l'analyse, la compréhension et la description du monde physique. Parvenir à son extension opératoire dans les autres domaines de la science reste un souhait largement partagé.

II.1 Des notions équivalentes au temps d'Aristote ?

Nul ne peut définir de manière générale la notion d'énergie. La sémantique du concept s'avère « totipotente » : l'énergie se déploie et s'incarne en autant d'objets qu'il en existe dans la nature, en autant de types de forces que l'on en vient à postuler. N'entendons-nous pas parfois parler d'« énergie psychique », d'« énergie mentale »? Apparue au XIXe siècle dans un contexte physique précis, la notion n'acquiert un statut proprement technique qu'à partir du moment où lui est associée une expression mathématique acceptée par la communauté scientifique. Cette expression représente elle-même un nombre ou un ensemble numérique que l'expérience est, en principe, capable d'authentifier.

Chez les Anciens, le terme de *principe* (αρχή), semble avoir été introduit par Anaximandre [1] (611-547) ; fort apprécié par Platon (427-347) et particulièrement important tant dans sa philosophie que dans celle de son élève Aristote (384-322), ce terme est peut-être celui qui préfigure le mieux celui d'énergie dans la mesure où il désigne également parfois la matière dans laquelle l'énergie peut s'incarner.

Une autre notion proche sans doute de celle actuelle d'énergie est celle de substance (οὐσία) au sens où Aristote l'entend :

Mais ce qui, plus que tout, est le caractère propre de la substance, c'est, semble-t-il bien, que tout en restant identique et numériquement une, elle est apte à recevoir les contraires. (*Organon, catégorie, 5*) [4]

Et, en vérité, l'objet éternel de toutes les recherches, présentes et passées, le problème toujours en suspens : qu'est-ce que l'être ? revient à demander : qu'est-ce que la substance ? C'est cette substance, en effet, dont les philosophes affirment, les uns, l'unité, et les autres, la pluralité, cette pluralité étant conçue, tantôt limitée en nombre,

et tantôt comme infinie. C'est pourquoi, pour nous aussi, l'objet principal, premier, unique pour ainsi dire, de notre étude, ce doit être la nature de l'être pris en ce sens.

(*Méta.*, Z, I). [3]

Mais deux autres termes doivent également être retenus : celui de puissance ($\delta\upsilon\nu\alpha\mu\iota\zeta$) et celui d'énergie ($\epsilon\nu\epsilon\rho\gamma\epsilon\iota\alpha$), pouvant être associés, le premier davantage à des capacités potentielles, le second davantage à des capacités actantielles¹ et actuelles de transformation.

Ce sont ces deux derniers termes qui feront leur chemin dans l'esprit et dans le vocabulaire des physiciens.

Les premières notions physiques dont on a conservé encore le sens et l'emploi sont celles de « force » et de « puissance », présentes dans les écrits d'Aristote (*Phys.*, VIII, 10, 266). Mais pas davantage que l'énergie, nul n'a réussi à matérialiser la force ou la puissance, qui sont tout comme l'énergie des entités abstraites.

On doit à Aristote et à Archimède (287-212) les premières analyses du mécanisme du levier. Toute la théorie de l'équilibre dans le monde physique est en germe dans leurs études. Elle sera présentée dans ses traits principaux au paragraphe II.2.2, lors de l'examen de la propriété fondamentale de l'énergie.

Le parallélogramme des forces n'apparaît timidement qu'en fin du seizième siècle et de manière claire au début du dix-huitième (voir le paragraphe III.2) ; on notera alors avec intérêt, dans le traité de *Mécanique* de l'Antiquité² qui relève de l'école d'Aristote, la présence du parallélogramme de composition des vites-ses (*Mech.*2. 848^b 13-26) [32] – rappelons que pour Aristote la force était proportionnelle à la vitesse. Il convient peut-être ici de citer Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) qui, s'il commet une petite erreur historique qui

¹ On pourra lire l'article sur « L'énergétisme des actants » dans le chapitre intitulé *Réflexions sur les modèles actantiels* de l'ouvrage classique du linguiste A.J. GREIMAS, *Sémantique structurale*, Larousse, Paris, 1966. Le qualificatif *efficient* que les philosophes classiques auraient employé a une signification plus restreinte.

² On le dit parfois d'Aristote ; mais on pense qu'il a pu être écrit par Straton de Lamsaque, dit le Physicien, ; il prit la direction la direction du Lycée en 289 avant J.C

n'est pas de sa responsabilité, apporte ces renseignements intéressants sur le devenir de la composition des vitesses – notons que cette composition précède celle des forces qui n'apparaîtra qu'à la fin du XVI^e siècle :

Sur l'art. 32. Le premier de tous les auteurs qui nous sont parvenus, qui se soit occupé de la composition des mouvements, c'est Archimède, quand il traite des spirales. Le premier qui s'en soit servi pour expliquer l'égalité de l'angle d'incidence avec l'angle de la réflexion, c'est Képler, dans ses *Paralipomena optica*, où il décompose le mouvement oblique en un mouvement perpendiculaire et en un mouvement parallèle. C'est lui que Descartes a suivi à cet égard, aussi bien ici que dans *Dioptrique*. Mais c'est Galilée qui, le premier, a montré l'ample usage qu'on peut faire de la composition des mouvements en physique et en mécanique.[42]

II. 2 Du XIV^e jusqu'à la fin du XVIII^e siècle

Jean de Buridan (1295-1360) et Nicolas Oresme (1320-1382) vont apporter des éléments phénoménologiques nouveaux, introduire des outils géométriques de représentation des mouvements qui permettront la mise en place de la mécanique analytique, quatre siècles plus tard.

Née dans les cercles scientifiques du XIV^e siècle, la théorie de l'*impetus* sera précisée et fortifiée par Buridan :

je crois qu'au mobile, le moteur n'imprime pas seulement le mouvement, mais, par voie de conséquence, un certain *impetus* ou une certaine force (*vis*) ou une certaine qualité (le nom qu'on lui donne importe peu). Cet *impetus* a pour nature de mouvoir ce à quoi il est imprimé, de même que l'aimant imprime au fer une vertu qui meut le fer vers l'aimant.[20]

Il remarque aussitôt cette propriété de l'*impetus* : « Plus le mouvement est vite, plus *cet impetus* se fait intense. » Par ailleurs « plus un corps contient de matière, plus il peut recevoir de cet *impetus*, et plus grande est l'intensité avec laquelle il peut le recevoir. »

Il faudra attendre trois siècles pour que Christiaan Huyghens (1629-1695), savant de tout premier plan, donne de ce concept la représentation mathématique adéquate.

Buridan réfléchit sur la manière de définir la quantité de matière que nous désignons par la masse, et aboutit à cette conclusion que Isaac Newton (1643-1727) exprimera de manière plus compacte au début de ses *Principia* [48]:

La quantité de matière est la mesure de cette matière obtenue en multipliant la densité par le volume. ...C'est cette quantité qu'en ce qui va suivre, je désignerai parfois sous les noms de corps et de masse.

Galileo Galilei (1564-1642), un des grands penseurs de la physique, humble devant l'expérience qu'il pratique autant que faire se peut et dont il a révélé l'importance scientifique, utilisera le mot « *impeto* ». René Descartes (1596-1650) lui donnera le nom de *quantité de mouvement*. C'est Huyghens donc qui introduira, sous la forme mv , la représentation mathématique de cette quantité de mouvement qu'en hommage à Descartes il nomme *motus quantitas*.

Il convient ici d'introduire une parenthèse sur la représentation géométrique dont l'importance est cruciale. On doit à Nicolas Oresme les introductions de la représentation dite cartésienne et de la géométrie analytique afin de représenter par ce biais, et de manière précise, les qualités, les propriétés des objets :

toute chose mesurable doit être imaginée à la manière d'une quantité continue...., toute intensité susceptible d'être acquise d'une manière successive doit être imaginée au moyen d'un ligne droite élevée verticalement à partir de chaque point de l'espace ou du sujet qu'affecte cette intensité. ... La mesure des intensités peut donc être convenablement imaginée comme la mesure des lignes... Et cette représentation s'étend, d'une manière universelle, à toute intensité imaginable, qu'il s'agisse de l'intensité d'une qualité active ou d'une qualité non active, que le sujet ou l'objet affecté tombe ou ne tombe pas sous les sens ...

Toute qualité linéaire est figurée à la manière d'une surface dressée verticalement sur la ligne sujette [à la qualité]. Soit donc AB la ligne qui est informée par la qualité... L'altitude de cette surface représente l'intensité de la qualité.[20]

Cet énoncé est tout à fait remarquable : il révèle qu'Oresme avait en tête la notion de ce que les mathématiciens appellent un espace fibré, une notion géométrique essentielle : elle sera définie en 1941³ par Charles Ehreshmann (1905-1979).

Les coordonnées cartésiennes, abscisses, ordonnées, ont été introduites par Oresme sous les noms de *longitudino* et de *latitudino* :

Et de même qu'en général la ligne qui représente la longueur de la surface d'un corps et la ligne qui en représente la largeur se coupent à angle droit, de même l'extension de la qualité, qu'on doit nommer sa latitude, se devra imaginer perpendiculairement à la ligne de longitude de la même qualité... [20]

Plus généralement, Nicolas Oresme conçoit également des représentations multidimensionnelles. Il a employé celle à deux dimensions pour comprendre le mouvement uniformément varié.

Probablement, la notion d'accélération était présente dans l'esprit de ses prédécesseurs comme par exemple Guillaume d'Ocagne (1300-1349) ; Oresme la formule en tout cas avec clarté :

toute vitesse est susceptible de devenir plus intense ou de s'atténuer ; ce par quoi elle devient continuellement plus intense se nomme accélération (*velocitatio*) ...[elle] se produit tantôt d'une manière uniforme, tantôt d'une manière difforme, et ceci de diverses façons. [20]

³ Dans une note aux Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Charles Ehreshmann et Jacques Feldbau (assassiné par les nazis), tome 213, p.762-764.

Déjà connu en son temps dans un cas particulier, Oresme donne une démonstration géométrique claire de l'énoncé suivant qui sera retrouvé par Galilée – la formulation est ici celle de Pierre Duhem [20] :

lorsqu'un mobile se meut, pendant un certain temps, d'un mouvement uniformément varié, le chemin qu'il parcourt est égal à celui qu'il parcourrait en un mouvement uniforme, de même durée, dont la vitesse serait égale à celle qui est prise en l'instant moyen du premier mouvement.

Oresme d'ailleurs s'exprime ainsi :

Il est donc évident qu'une qualité ou une vitesse uniformément difforme quelconque se trouve égalée à une qualité ou à une vitesse uniforme.

Les mathématiciens rapprocheront ces énoncés de celui du théorème dit « des accroissements finis » ou encore « de la moyenne », établi près de quatre cent cinquante années plus tard⁴.

Il convient d'insister sur le rôle tenu par la géométrie euclidienne comme *outil symbolique de représentation* des données spatio-temporelles et des qualités des objets. Jusqu'à Newton, Leibniz et Jean Bernoulli, en passant par Oresme, Albert de Saxe (XIV^e siècle sans autre précision actuelle), Galilée, Simon Stevin, Pierre Simon de Fermat (1601-1665), Huyghens, elle sert de support à la construction de schémas, de dessins permettant de donner des explications détaillées, présentées sous la forme de démonstrations, des faits, des comportements, des évolutions. Les théorèmes de Pythagore et de Thalès standard sont pratiquement les seuls outils employés pour aboutir aux conclusions, souvent obtenues à la suite d'analyses fouillées.

⁴ Il a fallu attendre l'année 1690 pour que Michel Rolle (1652-1719) en propose une première version dans un cas particulier. Lagrange, un siècle plus tard, en 1797, lui donnera sa forme actuelle : soit $f(t)$ la position d'un cavalier sur une route, représentée à l'aide de la fonction f de la variable temps t , supposée continue et dérivable sur l'intervalle temporel $[a,b]$: la dérivée $f'(t)$ représente la vitesse de ce cavalier. Il existe un instant \underline{t} , à l'intérieur cet intervalle $[a,b]$, pour lequel la dérivée-vitesse $f'(\underline{t}) = M$ vérifie cette propriété : la distance parcourue sur la route par le cavalier entre les instants a et b vaut M fois la valeur de la distance temporelle $b - a$: $f(b) - f(a) = M (b - a)$.

Huyghens, comme nous l'avons vu, traduit en termes mathématiques, de la manière la plus simple qui soit, sous la forme mv , la *quantité de mouvement* ou *impulsion* dont Buridan avait énoncé les propriétés phénoménologiques. Mais il fait bien davantage en introduisant, dans les années 1650, par le procédé géométrique il faut le rappeler, la quantité mv^2 à laquelle il ne donne pas de nom spécifique ; il lui arrive d'utiliser l'expression « *vis motus* » pour la nommer. Le premier article où apparaît cette découverte (rédigé vers 1652 et publié à titre posthume en 1703) porte le titre de *De Motu corporum ex percussione*⁵[34]. L'influence de l'ouvrage de Galilée, *Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno à due nuove Scienze attenenti alla Mecanica & i Movimenti Locali* [26], publié à Leyde en 1638, tant dans le sujet que traite le hollandais Huyghens, que dans ses démonstrations, est manifeste – Galilée s'y intéresse à la question du choc entre deux projectiles (cf la citation qui sera donnée plus loin), et y démontre notamment le fait que, dans la chute d'un corps, la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps mis à la parcourir.

Seul au début, le terme « *potentia* » employé par Leibniz se réfère à cette quantité mv^2 . L'expression « *vis viva* », « force vive », qu'il introduit par ailleurs avec un sens différent, après discussions entre Leibniz et les Cartésiens, sera cependant bientôt employée pour la désigner⁶. Le coefficient $\frac{1}{2}$ qui, en général, précède aujourd'hui mv^2 , a été utilisé de manière systématique par le mécanicien Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843) en 1829, mais on le rencontre auparavant dans le traité de *Mécanique Analytique* [39] (1788) de Lagrange (1736-1813) (à la page 337 : « quantité **T** qui exprime la somme de toutes les quantités $\frac{1}{2} m \left(\frac{dx^2}{dt^2} + \frac{dy^2}{dt^2} + \frac{dz^2}{dt^2} \right)$ relativement aux différents corps. »).

⁵ On trouvera une première analyse de ce travail dans l'Introduction à l'ouvrage de Michel Fichant, *La Réforme de la Dynamique* [24].

⁶ On pourra suivre l'évolution des idées de Leibniz dans l'ouvrage précité de Fichant.

Au moins jusqu'au milieu du XIX^e siècle, si ce n'est encore aujourd'hui, on continuera à appeler « force vive » la quantité mv^2 . L'appellation d'*énergie cinétique* lui sera ensuite donnée par William Thomson, futur Lord Kelvin of Largs (1824-1907), et Peter Guthrie Tait (1831-1901), auteur avec Thomson du fameux *Treatise on Natural Philosophy* (Cambridge, 1879) [58], en fait, un beau traité de mécanique générale.

L'emploi du terme « énergie » dans un sens physique précis figure, pour la première fois peut-être, en 1717 sous la plume de Jean Bernoulli (1667-1748), dans une lettre à Pierre Varignon (1654-1722) [7]:

F>Cp fait ce que j'appelle l'énergie

L'énergie, en ce sens de Bernoulli, évalue en fait le travail de la force F – ce terme *travail* sera introduit en 1828 par Coriolis – le travail est à ses yeux le concept fondamental ; Coriolis sera suivi un moment dans cette voie par le mathématicien Victor Poncelet (1788-1867). Notons que le travail est bien une forme de l'énergie : il en est une forme locale, au sens où la différentielle d'une fonction est une forme locale de cette fonction.

L'emploi du terme énergie sera long à s'implanter, et à s'imposer. Ainsi, il n'apparaît qu'une seule fois dans le traité précité Lagrange, près de 70 années donc après Bernoulli, et dans un sens encore non précis ; dans l'introduction, p.20, Lagrange écrit :

Galilée entend par moment d'un poids ou d'une puissance appliquée à une machine l'effort, l'action, l'énergie, l'*impetus* de cette puissance... [39]

Dans ces lignes, Lagrange reprend les termes de Galilée dans l'article 217 de ses *Discorsi* précités:

Et puisque nous reconnaissons que l'*impetus*, l'énergie, le moment ou la tendance au mouvement d'un corps mobile est aussi grande que la force ou la résistance minimale suffisante pour l'arrêter ...

Dans la suite de son texte, Galilée emploie à nouveau et à plusieurs reprises le terme *energia*, par exemple lorsqu'il écrit :

pour déterminer la force et l'énergie du choc [*forza ed energia della percossa*] ...

Le physicien anglais Thomas Young (1773-1829), dans son traité de philosophie naturelle (*Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*, 1807), emploiera également le terme d'énergie pour désigner la force vive : peut-être a-t-il lu Galilée et Lagrange ? Il serait bien sûr étonnant qu'il ne l'ait point fait. Les britanniques feront parfois référence à Young comme étant le premier qui, à leurs yeux, aurait employé le terme « énergie » ...

Pierre Simon de Laplace (1749-1827) introduit en 1785⁷ le concept de potentiel ; celui-ci est précisé par le « prince des mathématiques », Carl Friedrich Gauss (1777-1855), dans sa *Théorie générale du magnétisme terrestre* (1839) [28]. Gauss, qui était également astronome, aura travaillé sur l'électromagnétisme avec le physicien Wilhelm Weber (1804-1891)⁸. Bien qu'il note également par V la fonction potentiel, il est peu probable qu'il ait eu connaissance de l'essai [32] de l'étonnant George Green (1793-1841), fils de boulanger et autodidacte : en 1846, W. Thomson fera réimprimer cet essai,

⁷ Ce renseignement est donné dans un ouvrage récent de J.-C BOUDENOT & J.-J. SAMUELLI H.A. Lorentz (1853-1928) *La naissance de la physique moderne*, Ellipses, Paris, 2005, p. 231, excellent ouvrage. On le trouve également sous la plume de Thomson et Tait, à l'article 501 de leurs *Essays on Natural Philosophy* (à ne pas confondre avec le *Treatise*) : « This function [potentiel] was introduced for gravitation by Laplace, but the name was first given to it by Green, who may almost be said to have created the theory, as we now have it. Green's work was neglected till 1846, and before that time most of its important theorems had been re-discovered by Gauss, Chasles, Sturm, and Thomson. » Laplace connaissait le traité de Daniel Bernoulli (*Hydrodynamica sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*, 1738) qui, inspiré par la terminologie de Leibniz, introduit, par exemple, la notion de « *potentia absoluta* ».

⁸ Cf la publication de 1840, *Allgemeine Lehrsätze ...* : «Zu bequemern Handhabung der dazu dienenden Untersuchungen werden wir uns erlauben, dieser V mit einer besondern Benennung zu belegen, und die Gösse das *Potential* des Masen, worauf sie sich bezieht, nennen.«[29].

d'abord publié à compte d'auteur en 1828. Partant notamment des travaux de Poisson en électricité et en magnétisme, Green y présente notamment son important théorème, et y définit en toute clarté le terme potentiel et les propriétés des fonctions potentielles :

It is well known, that nearly all the attractive and repulsive forces existing in nature are such, that if we consider any material point p , the effect, in a given direction, of all the forces acting upon that point, arising from any system of bodies S under consideration, will be expressed by a partial differential of a certain function of the co-ordinates which serve to define the point's position in space. The consideration of this function is a great importance in many inquiries, and probably there are none in which its utility is more marked than in those about to engage our attention. In the sequel we shall often have occasion to speak of this function, and will therefore, for abridgment, call it the potential function of the system S .

Cependant, au temps où Green et Gauss publient leurs travaux, on n'emploie toujours pas le terme énergie. Mais l'heure approche.

II. 3 Le XIX^e siècle

Le terme énergie n'apparaît pas semble-t-il dans les traités de physique jusqu'au milieu du XIX^e siècle. Ainsi, par exemple, le traité fondateur⁹ de Sadi Carnot (1796-1832) portant sur les machines à vapeur¹⁰ [16], paru en 1824, utilise la terminologie de « puissance motrice ».

Cependant, dès la fin du XVIII^e siècle, les progrès dans l'observation et dans l'expérimentation permettent de mettre en évidence de très nombreux échanges et transformations entre les diverses expressions des mondes chimique et physique ; le travail de Sadi Carnot qui vient d'être mentionné, où est établie la liaison entre le « *calorique* » et la « *puissance motrice* », en est l'une des

⁹ « Les droits de Carnot à notre reconnaissance sont d'un ordre excessivement élevé » énonce Tait dans sa quatrième conférence [55].

¹⁰ Notons que S. Carnot mentionne dans cet ouvrage une invention de Niepce qui préfigure le moteur à explosion. Huyghens avait également pensé à un usage voisin.

illustrations. Carnot est peut-être le premier à avoir compris et formulé le principe de conservation de l'énergie : je renvoie sur ce point à la citation de Poincaré donnée l'Appendice I.5 et qui le concerne.

Cette question de la transformation du « calorique » en puissance mécanique ou autre va notamment occuper une place très importante dans l'esprit des physiciens à partir des années 1840.

En particulier, James Prescott Joule (1818–1889) met en évidence en 1841 l'effet thermoélectrique qui porte son nom, et, en 1842 [36], vérifie par l'expérience, tout comme Robert Mayer, la conservation de l'énergie et l'équivalence entre énergie mécanique et énergie thermique¹¹. Mais ce seront d'abord les chercheurs dans le domaine du vivant (médecine ou physiologie), qui, parmi les premiers, ressentent la nécessité de parvenir à établir des synthèses conceptuelles permettant d'unifier les nombreux et divers phénomènes physiques et physico-chimiques.

Toute une génération de ces savants – le plus âgé est né en 1814, le plus jeune en 1824 – va concourir à introduire et à développer le concept d'énergie. Les principaux acteurs de cette saga se nomment : Julius Robert von Mayer (1814-1878), James Prescott Joule, William Rankine (1820-1872), Hermann von Helmholtz (1821-1894), Rudolf Clausius (1822-1888), et William Thomson. Le physicien et mathématicien américain Josiah Willard Gibbs (1839-1903) , à qui la thermodynamique doit également beaucoup a été en partie formé par l'école précédente.

Mayer, Helmholtz et Clausius sont allemands, Joule, Rankine et Thomson britanniques. Ils sont tous physiciens, mais Mayer et Helmholtz étaient parvenus à la physique, après une formation en médecine et physiologie.

¹¹ Joule et Mayer ont chacun revendiqué la priorité dans l'établissement de cette équivalence. On peut lire les courriers qu'ils se sont adressés, rédigés en excellent français, dans [47].

L'influence d'Emmanuel Kant (1724-1804), à travers ses *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature* (1786), est présente dans ces travaux : Helmholtz le cite en note dans l'édition de 1881 de son texte fondateur. Kant, s'appuyant en partie sur les travaux des mécaniciens de son temps, tente d'établir les bases phénoménologiques¹² des sciences de la nature [12]. L'époque est à l'étude du mouvement mécanique : c'est plus généralement par le mouvement que Kant entend fonder sa vision du monde. Mais Kant connaît aussi les Anciens, et l'œuvre des mathématiciens et des philosophes de son temps. La substance dont il parle n'est pas sans rappeler celle d'Aristote. Et pour Leibniz qui précède Kant, la notion de force est primordiale ; Leibniz s'exprime ainsi dans le *Specimen Dynamicum* :

J'ai suggéré ailleurs que les choses corporelles contiennent quelque chose d'autre que leur extension, en vérité quelque chose d'antérieur avant l'extension, à savoir la force de la nature implantée en toute chose par le Créateur.[43]

Chez Kant également, la notion de force est très présente. Kant classe les forces en forces soit d'attraction ou de répulsion (l'amour et la haine d'Héraclite) soit en forces vives et « *forces mortes* »¹³. Ce faisant, il ne fait encore que reprendre la distinction et la terminologie de Leibniz. Kant insiste par ailleurs sur son théorème IV, « la loi mécanique de l'égalité de l'action et de la réaction », empruntée par exemple à Newton.

La notion de force est donc très présente dans l'esprit des philosophes et savants du XVIII^e siècle. Citons encore par exemple également ce texte de Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), dont on admirera l'ampleur de la prescience :

¹² On entend par là la mise en exergue des principaux phénomènes à partir desquels les autres peuvent s'en déduire

¹³ Jean Bernoulli utilise en 1723 la même terminologie : « La force vive est celle qui réside dans un corps, lorsqu'il est dans un mouvement uniforme ; & la force morte, celle que reçoit un corps sans mouvement, lorsqu'il est sollicité & pressé de se mouvoir, ou à se mouvoir plus ou moins vite, lorsque ce corps est déjà en mouvement. » [7]

Les vrais ressorts de notre organisation ne sont pas ces muscles, ces veines, ces artères, ces nerfs, que l'on décrit avec tant d'exactitude et de soin ; il existe, comme nous l'avons dit, des forces intérieures dans les corps organisés, qui ne suivent point du tout les lois de la mécanique grossière que nous avons imaginée, et à laquelle nous voudrions tout réduire : au lieu de connaître ces forces par leurs effets, on a tâché d'en écarter jusqu'à l'idée ; on a voulu les bannir de la philosophie : elles ont reparu cependant, et avec plus d'éclat que jamais, dans la gravitation, dans les affinités chimiques, dans les phénomènes de l'électricité...[14]

De manière apparemment indépendante, plusieurs auteurs simultanément, Mayer et Helmholtz en particulier, vont développer des idées, des théories qui auront un impact profond sur le développement de la physique¹⁴. Ils n'utilisent encore que le terme de « *kraft* », de « *force* », dans un sens très général, à la manière de Leibniz, Kant ou Buffon. Notons que ce terme « *kraft* », souvent correspond davantage à celui de puissance ou d'énergie.

Le texte de Mayer date de 1841 ; il s'intitule, dans sa traduction française, *Sur la détermination quantitative et qualitative des forces* [46]. Remplaçons force par énergie ; Mayer, d'inspiration vitaliste, y présente la loi de conservation de l'énergie. Le médecin puis chimiste Wilhelm Ostwald (1853-1932), dans son ouvrage sur l'énergie [49], commente ainsi l'apport de Mayer :

Ce qui, dans l'œuvre de Mayer, est le plus important du point de vue de l'étude d'ensemble que nous faisons ici, c'est qu'il conçoit les forces, c'est-à-dire, dans notre langage, l'énergie, comme une substance. La force est pour lui une réalité, un être d'une espèce déterminée et particulière ; son indestructibilité et son incréabilité sont des marques de sa réalité.

Le premier historique de la notion d'énergie a été présenté par Tait au cours de conférences faites en 1876 et traduites en français en 1886 [55]. Cet

¹⁴ Il n'est pas impossible que les conceptions de Straton, le possible auteur du traité aristotélicien de mécanique, aient préfiguré celles de nos physiciens allemands.

historique porte presque exclusivement sur la première moitié du XIX^e siècle ; Tait n'y ménage pas ses critiques à l'égard de Mayer. Il mentionne par ailleurs deux autres auteurs, qui, toujours dans les années 1840, n'ont pas eu la même audience que Mayer ou Helmholtz. Il s'agit d'une part de Karl Friedrich Mohr (1806-1879) : son « mémoire date de 1837 – cinq ans avant le travail de Mayer – et il contient tout ce que celui de Mayer offre d'exact, mais présenté sous une forme bien supérieure », écrit Tait. Le second auteur est le danois Ludwig A. Colding (1815-1888) : il avait l'idée du principe de conservation dont d'ailleurs il fit part au physicien Hans Christian Oersted (1777-1851), et auquel il s'employa à donner un contenu expérimental solide. Tait écrit à son égard : « Ceci montre, qu'au moins jusqu'à un certain point, il avait anticipé sur Helmholtz, dont je vais maintenant faire connaître les grands services rendus à cette branche de la science ».

C'est en effet le texte de Helmholtz, *Ueber die Erhaltung der Kraft* (1847) [33], traduit en français par Pérard sous le titre de : *Mémoire sur la conservation de la force* (1869), qui aura une grande audience, auprès des britanniques notamment. D'une grande culture, influencé tant par Kant que sans doute par Leibniz et Lagrange, Helmholtz, s'emploie à fonder une théorie mécaniste des phénomènes physiques, à l'intérieur de laquelle s'inscrirait aussi la physiologie. Le terme « force » est pris, comme chez les auteurs précités, dans un sens physique général et dans une optique d'unification des sciences. Helmholtz refuse le vitalisme auquel par contre Mayer adhère. Helmholtz s'intéresse notamment, dans ses débuts, à la production de la chaleur musculaire dans le corps, et vise à établir une théorie physico-chimique, étayée par une mathématique rigoureuse, décrivant les phénomènes qui apparaissent dans le monde naturel. Ainsi, c'est un cadre général qu'il souhaite établir, capable en premier lieu de rendre compte de l'ensemble des phénomènes du monde physique :

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.

Il reprend la notion de « *force morte* » de Leibniz puis de Kant, sous le nom de « *force de tension* » :

Appelons *forces de tension* les forces qui tendent à mouvoir le point m , tant qu'elles n'ont pas encore produit le mouvement, par opposition à ce que la mécanique appelle *force vive*.

Ces forces ont donc une nature potentielle, ce que justifie l'adjectif « potentielle » proposé plus tard par Rankine pour nommer l'énergie correspondante¹⁵.

On notera par ailleurs ici l'absence, en ces temps, de consensus sémantique concernant le terme force, employé parfois dans son sens actuel, parfois avec la signification d'une impulsion ou quantité de mouvement mv : Laplace n'écrit-il pas dans son *Exposition du Système du Monde*¹⁶ [40] (la première édition date de 1796) que :

la force est le produit de la masse d'un point matériel, par la vitesse qu'elle lui ferait prendre, s'il était libre. (p.186)

Ajoutons l'emploi du terme force vive pour désigner mv^2 . On conçoit que Mayer et Helmholtz aient pu songer à employer ce terme de force dans un sens beaucoup plus général, pour désigner une notion physique dotée d'ubiquité, et

¹⁵ Dans un article de 1867 *On the phrase "potential energy" and on the definitions of physical quantities* Rankine écrit : « Until some years afterwards I was not aware of the fact, that the idea of a phrase equivalent to "potential energy", in its purely mechanical sense, had been anticipated by Carnot, who, in an essay on machines in general, employed the term "force vive virtuelle", of which "potential energy" might be supposed to be almost a literal translation. »

¹⁶ Dans ce traité en cinq volumes, Laplace y expose en termes accessibles à tous ses idées sur un certain nombre de problèmes physiques. L'*Exposition* sert notamment d'introduction à son grand ouvrage, plus technique, son *Traité de Mécanique Céleste*, traité en 5 volumes dont les deux premiers parurent en 1799.

d'aussi belles propriétés que celles du caméléon : la force peut changer d'apparence, elle peut revêtir l'habit électrique, magnétique, mécanique ou chimique sous mille formes. Elle peut se diluer en chaleur, et inversement, parvenir en partie à reprendre l'une des incarnations précédentes. L'étude de ces transformations sera l'un des principaux sujets de recherches des physiciens du XIX^e siècle, conduisant à la mise en place de la thermodynamique.

Mais, en définitive, c'est Thomson, aidé par Rankine, qui, indépendamment de ses collègues allemands, l'emportera, choisissant à juste titre le terme d'énergie.

Les premiers travaux de Thomson, nommé à 22 ans professeur à l'Université de Glasgow, sont de nature mathématique, quoique relatifs à la physique mathématique (ces travaux portent sur les séries de Fourier et l'étude de la conduction de la chaleur)¹⁷ ou à la géométrie différentielle¹⁸. Dès cette première époque, Thomson étudie en particulier la théorie de Carnot¹⁹, et consacre plusieurs mémoires *On the dynamical theory of heat*, publiés par les *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. Le cinquième, lu le 15 décembre 1851 et qui paraît en 1852, est intitulé : *On the Quantities of Mechanical Energy contained in a Fluid in Different States, as to Temperature and Density* [57]. C'est l'article fondateur.

Il y fait l'éloge du riche traité d'Helmholtz dans une note rajoutée au texte original de cet article :

si je l'avais connu à l'époque, j'aurais eu l'occasion de m'y référer sur ce point [l'effet Peltier] et sur de nombreux autres points de la théorie dynamique de la chaleur, la

¹⁷ *On Fourier's Expansions of functions in trigonometrical series*, in Cambridge Math. Journal, May 1841.[57]

¹⁸ *On orthogonal isothermal surfaces*, in Cambridge Math. Journal, May 1843, *Elementary demonstration of Dupin's theorem*, in Cambridge Math. Journal, May 1844. [57]

¹⁹ *An account of Carnot's theory of the motive power of heat,...*, in Trans. Edinburgh Royal Soc., 1849 et Annales de Chimie, XXXV, 1852. [57]

théorie mécanique de l'électrolyse, la théorie de l'induction électromagnétique, et la théorie mécanique des courants thermoélectriques.

Helmholtz, de son côté, présentera l'article de Thomson en ces termes :

[il y] développe les relations mutuelles entre le volume, la température, la pression, la chaleur spécifique et la quantité de travail moléculaire (énergie mécanique) ... L'«énergie mécanique» est en substance cela même que l'on nommait antérieurement la quantité de chaleur (libre et latente) contenue dans le corps, ou son équivalent mécanique ...

L'influence de Carnot est très présente ; elle transparaît dans l'explication précise donnée par Thomson de ce qu'il qualifie lui-même d'« unqualified term, *mechanical energy* »:

« l'énergie mécanique d'un corps dans un état donné » dénotera la valeur mécanique des effets que le corps produirait en passant, de l'état où il se trouve, à l'état standard, ou encore la valeur mécanique de l'action totale qui serait requise pour amener le corps, de l'état standard, à l'état où il se trouve.

Ainsi, comme chez Carnot, la valeur de cette énergie ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système.

Tenant compte du phénomène de dissipation possible et fréquent de l'énergie mécanique par émission de chaleur, Thomson élargit la même année sa conception en supprimant l'adjectif mécanique, ne conservant que le terme énergie.

Entre en scène, maintenant, Rankine, grand ingénieur mais aussi, en tant que physicien, l'un des principaux fondateurs de la thermodynamique. Toujours en 1852, il lit, devant la British Association of Belfast, un premier texte, court, ignoré apparemment des cosmologistes contemporains, mais qui pourrait en étonner quelques-uns. Il a pour titre *On the reconstruction of the mechanical*

energy of the universe [52], et a été publié dans le *Philosophical Magazine* de la même année. Je ne résiste pas au plaisir de citer les deux premiers et les deux derniers paragraphes de ce texte dans sa langue originale.

The following remarks have been suggested by a paper by Professor William Thomson of Glasgow, on the tendency which exists in nature to the dissipation of indefinite diffusion of mechanical energy originally collected in stores of power.

The experimental evidence is every day accumulating, of a law which has long been conjectured to exist, – that the different kinds of physical energy in the universe are mutually convertible; that the total amount of physical energy, whether in the form of visible motion and mechanical power, or of heat, light, magnetism, electricity, or chemical agency, or in other forms not yet understood, is unchangeable ; the transformations of the different portions from one of those forms of power into another, and their transference from one portion of matter to another, constituting the phenomena which are the objects of experimental physics.

...

Thus it appears, that although, from what we can see of the known world, its condition seems to tend continually towards the equable diffusion, in the form of radiant heat, of all physical energy, the extinction of the stars, and the cessation of all phenomena; yet the world, as now created, may possibly provided within itself with the means of reconcentrating its physical energies, and renewing its activity and life.

For aught we know, these opposite processes may go on together; and some of the luminous objects which we see in distant regions of space may be, not stars, but foci in the interstellar ether.

Il poursuit ses réflexions sur l'énergie, et lit un an plus tard, devant la Philosophical Society de Glasgow, un texte intitulé *On the General Law of the Transformation of Energy* [53]. Ce texte commence ainsi :

ACTUAL, or SENSIBLE ENERGY is a measurable, transmissible, and transformable condition, whose presence causes a substance to tend to change its state in one or more respects. By the occurrence of such changes, actual energy disappears, and is replaced by

POTENTIAL or LATENT ENERGY; which is measured by the product of a change of state into the resistance against which that change is made.

Selon Helmholtz qui rend compte de cet article :

Ces deux dernières définitions sont quelque peu obscures, parce que M. Rankine a voulu éviter là toute hypothèse sur la nature de la force agissante. Au demeurant, les expressions appropriées ont été choisies. Elles concordent avec celles que le rapporteur a antérieurement désignées par *force vive* (énergie actuelle), et *quantité des forces de tension* (énergie potentielle).

Rankine reprend et approfondit ses idées dans un texte remarquable lu en 1855 également devant la Philosophical Society de Glasgow. Il est intitulé *Outlines of the Science of Energetics* [54]. Dans les articles courts et très solides I à VI de ce texte, (sa lecture comme celle de l'ouvrage précité de Duhem [19] serait hautement profitable aux étudiants), Rankine définit notamment en toute clarté ce qu'est une théorie physique. Voici les titres de ces articles :

Section I. – What constitutes a Physical Theory.

Section II. – The Abstractive Method of forming a Physical Theory distinguished from the Hypothetical Method.

Section III. – The Science of Mechanics considered as an Illustration of the Abstractive Method.

Section IV. – Mechanical Hypotheses in Various Branches of Physics.

Section VI. – Advantages and Disadvantages of Hypothetical Theories.

La suite du texte s'applique à définir de manière axiomatique une science de l'énergétique, et donc en premier lieu les termes de cette science, termes sur lesquels on pourrait réfléchir à nouveau. Les voici selon Rankine : *Substance. Property. Mass. Accident. Effort, or Active Accident* (The term « *effort* » will be applied to every cause which varies, or tends to vary, an accident. This term, therefore, comprehends not merely *forces* or *pressures*, to which it is usually applied, but all causes of variation in the condition of substances.). *Passive Accident. Radical Accident. Effort*

as a Measure of mass. Work. Energy, Actual and Potential (The term “energy” comprehends every state of a substance which constitutes a capacity for performing a work.)

Rankine propose ensuite quelques axiomes, et en déduit quelques propriétés essentielles. Et voici le contenu de la section XX, ses *Concluding Remarks* :

It is to be observed, that the preceding articles are not the results of a new and hitherto untried speculation, but are the generalised expression of a method of reasoning which has already been applied with success to special branches of physics.

In this brief essay, it has not been attempted to do more than to give an outline of some of the more obvious principles of the science of energetics, or the abstract theory of physical phenomena in general; a science to which the maxim, true of all science, is specially applicable – that its subjects are boundless, and that they never can, by human labours, be exhausted, nor the science brought to perfection.

On appréciera, au regard de l’histoire, la largeur de vue de Rankine, son ouverture d’esprit.

La vision globale et générale que partagent Thomson et Rankine s’impose dans le milieu des physiciens. Leur terminologie facilite les tentatives d’extension de leurs concepts à des domaines d’étude autres que ceux qui relèvent de la seule physique.

On assiste ainsi en ces années, et en particulier de 1850 à 1870, à la naissance de la thermodynamique, en même temps qu’on essaie de préciser ce que pourrait être une notion d’énergie propre à chaque objet physique et qu’on appellera son *énergie interne* U (l’objet est vu comme une réunion de particules possédant chacune une énergie cinétique propre et une énergie d’interaction avec ses voisines). Gibbs introduit en 1873 la notion d’énergie utilisable (*available energy*)²⁰ ; Helmholtz donnera le nom d’*énergie libre* à une

²⁰ Je reproduis ici une note de Duhem [21] : « Maxwell semble avoir montré le premier que l’effet utilise d’une modification isothermique ne pouvait jamais dépasser la diminution d’une certaine grandeur qu’il appelait à tort *Entropie*. (J. CLERK MAXWELL, *Theory of Heat*, p. 186, Londres, 1871). La notion générale et le nom d’énergie

expression voisine ; elle porte aujourd'hui également et parfois les noms d'*enthalpie libre* ou de *potentiel de Gibbs*²¹.

Wilhelm Ostwald , prix Nobel de chimie en 1909, que nous avons déjà rencontré, donne une emprise plus vaste au terme énergie ; dans son volume intitulé *Energie* [49], il prend en considération les notions d'« énergie psychique » et d'« énergie sociologique ». Mais le caractère global du concept d'énergie, la prodigieuse richesse et subtilité des interactions, n'ont pas encore permis de dégager un formalisme précis qui permettrait de mettre en avant un emploi très efficace de ce concept. Il n'en reste pas moins que l'objectif de la science étant l'universel, sont à prendre en considération bienveillante toutes les notions et tous les actes de pensée qui vont dans cette direction.

On notera que, s'il existe une définition de l'énergie interne physique, on ne trouve pas de manière explicite celle d'une énergie externe. Sans doute faut-il la concevoir comme l'énergie apportée par l'environnement à l'objet, énergie qui peut le mettre en mouvement, l'enrichir en quelque façon. Quant à cette énergie interne, elle ne concerne encore que des milieux et des quantités physiques, comme par exemple une agitation interne à la Boltzman (1844-1906) induisant une température locale. Or, de manière plus générale, l'énergie interne est notamment liée à la constitution de l'objet à travers ses composants et leur activité réciproque, à travers sa structure, et qui déterminent en partie ses capacités fonctionnelles ; elle dépend aussi des capacités mnémoniques de l'objet, de la connaissance qu'il a de son entourage, des représentations qu'il a

utilisable (*Available Energy*) ont été introduite en Physique par Gibbs, sans qu'il donnât, d'ailleurs, la définition analytique de cette grandeur (J. WILLARD GIBBS, *On a Representation by Surfaces of the Thermodynamic Properties of Substances* (*Transactions of the Connecticut Academy of Art and Sciences*, vol. II, 1873, p. 400). Maxwell, en la quatrième édition de sa *Theory of Heat*, a adopté le nom de *Available Energy* ; d'une manière semblable, Hermann von Helmholtz a donné à la grandeur $\mathfrak{F} = U - F(\mathfrak{D}) S$ le nom d'*énergie libre* (*frei Energie*) et à la grandeur $U - \mathfrak{F} = F(\mathfrak{D}) S$ le nom d'*énergie liée* (*gebundene Energie*).

²¹ De manière générale, en physico-chimie, ce potentiel a pour expression $G = U + PV - TS$ (U est l'énergie interne, celle qui permettrait de créer le système à température et volume constants ; S est l'entropie, P la pression, T la température, V le volume : PV représente le travail nécessaire pour faire occuper au système le volume V sous la pression P, TS est l'apport d'énergie de l'extérieur au système).

établies²². Aussi, lorsqu'on envisage le cas d'un objet en général, le travail à accomplir pour donner une forme opératoire précise au concept d'énergie associé à un objet²³ paraît sans limite. On ne saurait, pour cette raison, se décourager et ne rien entreprendre.

²² Je ne discuterai pas dans ces lignes de l'existence des propriétés des objets qui sont affirmées ici.

²³ Sur la signification du terme « objet » pris dans son acception la plus générale, cf le paragraphe I.2 de la première partie de l'ouvrage *Topologie et Perception* [11], intitulée « données philosophiques, pour une théorie des objets ».