

Évolution du concept d'énergie

par

PIER-YVES TRÉPANIÉ

Département de physique
Université de Montréal
Montréal, Québec, Canada
Décembre 2005

Travail présenté au Prof. François Wesemael dans le cadre du cours *Évolution des concepts en physique* (PHY3012)

1 Introduction

Entre les premières expériences de l'Antiquité et les dernières découvertes annoncées au début du 21^e siècle, la physique a progressé de façon parfois modeste, tantôt plus explosive. Chaque développement était le fruit d'un travail accompli par des hommes et des femmes, eux-mêmes précédés de gens tous aussi talentueux, dont le véritable génie réside dans le fait qu'ils avaient ceci en commun : ils sont allés au-delà des idées préconçues pour permettre l'émergence de concepts nouveaux.

Bien que certaines idées aient fait leur temps, d'autres ont survécu aux attaques de l'histoire en raison d'un caractère plus innovateur et dont la description allait faire franchir un pas de géant dans le développement de la physique. C'est le cas, notamment, de l'énergie et de la loi de conservation qui lui est associée. Aujourd'hui, aucun physicien n'accepterait de remettre en question ce principe de conservation tellement son importance est la base même de l'édifice conceptuel de la physique moderne.

Le développement du concept d'énergie possède une histoire tortueuse qu'il est intéressant de retracer. Seront d'abord présentées les idées issues de la mécanique qui ont permis de démarrer ce long processus. De façon inévitable suivra un exposé sur la chaleur, qui mènera à l'unification de deux concepts considérés longtemps comme disparates. Finalement seront résumés les travaux des physiciens-mathématiciens qui ont ajouté le dernier morceau au concept d'énergie : l'énergie potentielle.

2 Mise en situation et premières expériences

Comment définir l'énergie ? C'est là une question tout à fait légitime à se poser avant d'entreprendre toutes discussions sur le sujet. D'un point de vu commun, cela s'avère un concept très difficile à décrire puisqu'il demeure d'abord et avant tout quelque chose d'abstrait. L'énergie ne peut pas être vue, ni même mesurée directement. Son existence n'est révélée que par sa *transformation* et son *transfert*. Sa manifestation dans les phénomènes naturels est donc bien réelle. Pour cette raison, il serait naïf de prétendre que l'énergie n'est qu'un outil de travail. De toutes les définitions imaginables, probablement aucune ne réussirait à décrire, en quelques lignes, *l'essence* du concept d'énergie. C'est qu'elle se manifeste sous tellement de formes et dans tellement de circonstances différentes qu'il est virtuellement impossible de les inclure toutes.

R. Bruce Lindsay propose une idée à partir de laquelle il sera possible de bâtir, et éventuellement de définir, le *concept* d'énergie : *The key idea [in the energy concept] is simple : constancy in the midst of change* (Lindsay, p. 5). De même, Roger Balian déclarait lors d'un séminaire présenté à Lyon en 2003 que la meilleure façon de définir l'énergie, c'est d'utiliser une approche historique. Il se trouve que, historiquement, c'est justement la recherche de la constance dans le mouvement qui a mené à l'élaboration

de ce concept.

L'approche dynamique des problèmes de la mécanique vise l'étude des causes du changement survenu dans l'état du système étudié, un processus souvent laborieux. Le physicien qui procède ainsi ne peut avoir qu'une vision incomplète de la réalité qu'il tente de décrire puisqu'il demeure conceptuellement difficile d'étudier l'ensemble des changements survenus dans un système suite à une interaction donnée. Une méthode souvent plus judicieuse est la **recherche d'une constante dans le problème**, car étudier le problème en focalisant sur les aspects qui ne changent pas permet d'avoir une vue beaucoup plus fondamentale de ce qu'est la nature : La nature est telle qu'une certaine quantité est toujours conservée. La recherche de la constance dans les phénomènes naturels est une idée en soi révolutionnaire qui en a beaucoup facilité l'étude.

C'est avec l'étude des machines simples qu'a commencé la grande épopée de l'énergie. L'analyse d'un banal levier, par exemple, permet une constatation aussi évidente qu'étonnante : « *To raise the weight in question a given distance above the ground, it was necessary to lower the end of the longer arm of the lever, at which the force is applied, a greater distance.* » (Lindsay, p. 7) Ainsi, **quelque chose est gagné au détriment d'une autre chose qui est perdue**. Ce « quelque chose », c'est le produit de la force par la distance parcourue. L'écriture moderne en terme du travail¹ serait $F_1 h_1 = F_2 h_2$. Cette loi aurait été formulée pour la première fois par Aristote, mais il serait prétentieux de lui en attribuer l'exclusivité. Un deuxième exemple ou « quelque chose » est conservé est celui d'une balle lancée verticalement à une vitesse donnée. Galilée a montré que la vitesse à laquelle la balle revient au lanceur après sa descente est égale à sa vitesse initiale. « Quelque chose » a donc été donnée à la balle au départ et ce « quelque chose » semble être le même à son retour.

Ces deux exemples illustrent les *prémisses du concept d'énergie*. « **Quelque chose est conservée dans les expériences de mécanique** et ce quelque chose, c'est l'énergie. Il a toutefois fallu attendre le milieu du 19^e siècle pour que ces idées soient bien établies en science. Les progrès ont notamment été freinés par un manque de vocabulaire. Aristote n'a jamais parlé de *travail* au sens moderne, pas plus que Galilée ne parlait *d'énergie*. Le développement d'un vocabulaire adéquat fut une étape tout aussi cruciale à l'émergence du concept devenu, sans doute, le plus important en physique.

3 La mécanique et la recherche de constantes

En 1687, Isaac Newton (1642 – 1727) publie ses *Philosophiae naturalis principia mathematica* dans lesquels il énonce trois lois bien connues régissant le mouvement

1. Le concept de travail n'a pas d'origine bien précise. Il est cependant utilisé depuis plusieurs siècles, sans forcément être désigné de cette façon. C'est par soucis de clarté que ce mot est délibérément utilisé ici.

des objets. Dans ces ouvrages, il formalise le concept de *force*, une notion intuitive qui remontait à la nuit des temps.

Depuis l'antiquité et jusqu'à tard au 19e siècle, les gens étudiaient les problèmes de mécanique en considérant l'effet des forces, croyant qu'elles étaient l'aspect le plus fondamental en mécanique. Ce courant de pensée a atteint son apogée avec les *Principia* de Newton. Rapidement, toutefois, il est devenu évident que l'étude dynamique du mouvement pouvait devenir une tâche très laborieuse. Après la mort de Galilée, l'idée de rechercher des lois de conservation en physique est devenue de plus en plus à la mode. Dans un contexte où les forces étaient au cur de la physique, il est normal que les gens aient été à la recherche de lois de conservations *basées sur les forces*.

Newton lui-même n'a jamais évoqué le concept d'énergie sous aucune forme. Bien qu'il ait eu à sa disposition les outils du calcul différentiel et intégral, les équations du mouvement qu'il a publiées ne sont pas écrites dans cette notation. Certains historiens croient qu'il aurait eu sans difficulté la vision de la conservation de l'énergie s'il aurait fonctionné ainsi (*Lindsay*, p.99). Au lieu de cela, il évoque néanmoins un embryon de loi de conservation, basée sur sa troisième loi (voir *Newton* dans *Lindsay*, p.100).

Avec Newton, le concept de force a pris tellement d'importance que, jusqu'au milieu du 19e siècle environ, les gens ont utilisé cette notion à tort et à travers, lui attribuant tantôt le rôle d'une puissance, tantôt celui d'une énergie, quelques fois celui d'une force à proprement parler. En fait, même après la publication des *Principia*, il a fallu plus d'un siècle avant que le concept de force soit ne utilisé conformément à la définition de Newton. Plusieurs grands penseurs, dont Descartes, Bernoulli, Euler et d'autres, se sont attachés très longtemps à l'idée que la force était une propriété d'un corps en mouvement. Un corps pouvait posséder plus ou moins de « force », selon son état de mouvement. Ironiquement, c'est par un désir de quantifier cette propriété supposée des corps que le concept d'énergie a surgi.

L'une des premières tentatives, pour associer la « force » inhérente au mouvement à une quantité qui s'exprime en terme de variables connues remonte à René Descartes (1596 – 1650). En effectuant des expériences de collisions, il a établi que, dans certaines circonstances, la quantité scalaire mv (produit de la masse et de sa vitesse) était conservée. Il énonce ainsi son principe de conservation de la « force » et nomme la quantité mv « quantité de mouvement. » Ses expériences ne sont pas très poussées, et la loi qu'il en tire semble davantage basée sur des arguments divins (voir *Descartes* dans *Lindsay*, pp. 97 – 98). Bien que sa formulation se soit avérée incomplète, Descartes a néanmoins mis le doigt sur quelque chose de très profond. Pour lui, la « force » se mesure en terme de la quantité de mouvement. Aussi, comme c'est la force qui est responsable de la modification de l'état de mouvement, **l'effet de cette force peut être mesuré comme un changement dans la quantité de mouvement**. Il n'a pas fallu beaucoup de temps pour vérifier, après la sortie des *Principia*, que la conservation de la quantité

de mouvement est en fait une conséquence directe des équations du mouvement de Newton.

Après la mort de Descartes, Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716) a proposé une approche différente pour évaluer la « valeur de la force. » Pour lui, la vision de Descartes devait être fautive ; la véritable valeur d'une force devait se mesurer par une quantité qu'il nomme *vis viva* (force vive), définie comme le produit de la masse avec le carré de sa vitesse : mv^2 . Il arrive à cette conclusion après avoir imaginé une expérience où deux objets de masses différentes subissent une chute libre à partir de hauteurs différentes (voir *Leibniz* dans *Lindsay*, pp.119 – 121). Christian Huygens avait avant Leibniz utilisé ce concept dans un traité qu'il a publié sur les pendules composés, *Horologium Oscillatorium*, mais n'y a pas porté une attention particulière, ni même donné de nom. Leibniz a eu l'intuition que cette quantité **n'était pas qu'un simple outil de calcul** et avait un intérêt fondamental.

Un débat musclé a accompagné la controverse entre les adeptes de la vision de Descartes et celle de Leibniz concernant la mesure de la « force. » Jean Le Rond (1717 – 1783), aussi connu sous le nom de D'Alembert, a contribué à résoudre ce conflit. Dans son *Traité de Dynamique* où il étudie le mouvement des particules soumises à des contraintes, D'Alembert consacre un chapitre entier sur la notion de *vis viva* telle qu'introduite par Leibniz. Il tente également de briser la vieille idée que la force est une propriété d'un corps en mouvement. Pour lui, la force est plutôt une cause externe qui provoque le mouvement : *The word « force » should be used to signify only the effect produced by overcoming an obstacle or by resisting it* (voir *D'Alembert* dans *Lindsay*, p.137).

D'Alembert réalise que la controverse sur la valeur de la « force » n'est qu'un artifice dû à une mauvaise façon d'exprimer les concepts, ce qui reflète déjà d'importantes lacunes dans les définitions. Il explique que l'idée de Descartes consiste à mesurer l'efficacité d'une force par son effet dans le temps, c'est-à-dire par un changement dans la quantité de mouvement (mv). À l'opposé, l'idée de Leibniz est de mesurer l'efficacité d'une force par son effet dans l'espace, par un changement de vis viva (mv^2).

D'Alembert publie aussi ce qu'il désigne comme le *principe de la conservation de la force vive dans les collisions élastiques*, mais ne le démontre pas. Il remarque également qu'une « force accélérante » modifie la *vis viva*. De façon générale, ses travaux ne sont pas très bien reçus pour la principale raison qu'ils ne sont pas très limpides (*Lindsay*, p.113). L'idée de conservation de la vis viva sera reprise notamment par Daniel Bernoulli et Leonard Euler, qui auront un peu plus de succès à la faire accepter.

L'introduction du mot *énergie* pour désigner la *vis viva* est due à Thomas Young (1773 – 1829), populaire pour ses expériences d'interférence (*Balian*, p.4). Dans une lecture qu'il présente à la Royal Institution of Great Britain, il énonce le principe de conservation de la quantité de mouvement de même qu'un principe de conservation de

la *vis viva* dans les collisions élastiques. Dans la version écrite de cette même lecture, il utilise le mot *energy* pour désigner la *vis viva*.

4 Les théories de la chaleur

Il est pertinent, à ce stade, de se tourner vers le concept de chaleur, dont l'évolution demeure une étape cruciale du développement du concept d'énergie. L'idée de la chaleur est liée à aux notions de chaud et de froid, présentes dès l'Antiquité, chez Aristote (Wesemael, chap. 6). Afin de quantifier ces deux qualités, Galilée aurait mis au point le premier thermomètre primitif (Einstein et Infeld, p.39). Il semble en effet qu'il ait été au courant des quelques principes physiques nécessaires à la conception d'un tel instrument. Ces principes ont été résumés par Joseph Black (1728 – 1799) lors d'une conférence qu'il a présentée vers la fin du 18e siècle. Les concepts de température et de chaleur furent toutefois, pendant un certain temps, utilisés avec confusion. Black lui-même reconnaît ce fait vers la fin de sa vie et insiste alors sur le fait qu'il ne faut pas confondre la chaleur (une quantité) et son intensité — associée à la température.

Les déclarations de Black concernant une expérience particulière où des corps de « chaleurs » (températures) différentes atteignent l'équilibre (Einstein et Infeld, p.40) révèlent implicitement qu'il comprend le phénomène comme un écoulement de chaleur des corps chauds vers les corps froids, un comportement typique aux substances. Cette vision de la « chaleur substance » est alors assez répandue mais n'est par contre pas exclusive. Dans ses *Lectures on the Elements of Chemistry*, parues en 1766 – 1767, Black résume les différentes théories de la chaleur valorisées par ses contemporains et prédécesseurs. Essentiellement, le débat est limité à l'opposition de deux grandes visions : une théorie matérialiste et une théorie cinétique. Il n'émet pas lui-même de nouvelle idée mais sa conclusion sur cette synthèse le convint que la chaleur ne peut pas être autre chose qu'une substance (voir Black dans Lindsay, p.200).

Les partisans de la « chaleur substance » sont très nombreux jusqu'au début du 19e siècle. L'une des premières théories clairement formulée pour tenter d'expliquer la nature de cette substance fut proposée par Pierre Gassendi (1592 – 1655). Influencé par le courant atomiste issu de l'Antiquité, il argumente que plusieurs faits observationnels sont expliqués en considérant la chaleur comme étant fait d'atomes très petits, de forme sphérique et animés d'un mouvement très rapide (voir Gassendi dans Lindsay, pp.180 – 181). Les idées de Gassendi ont été reprises par d'autres penseurs après lui.

Dans son traité, Black retient en particulier les idées originales d'un certain Dr. Cleghorn, dont les détails de l'existence sont difficiles à retracer. Ce dernier décrit deux autres propriétés de ces particules de chaleur. Elles auraient à la fois une très grande attraction pour les atomes de matière ordinaire et une très forte répulsion entre elles (voir Black dans Lindsay, p. 201). Cela suffit pour expliquer plusieurs phénomènes, dont

l'expansion thermique d'un gaz et les flux de chaleur.

Malgré son penchant pour une théorie aujourd'hui désuète, une contribution importante à la compréhension de la notion de chaleur pourrait être attribuée à Black. Il explique en effet dans ses Lectures que la chaleur est une propriété positive d'un corps, c'est-à-dire quelque chose qui le caractérise et qui n'est pas là naturellement. Pour lui, le froid est simplement une absence de chaleur. Black est au courant des idées qui déjà surgissent concernant la chaleur vue comme un mouvement de la matière. En particulier, il mentionne dans ses Lectures les résultats d'un certain Lord Verulam. Suite à des expériences de frottement et de collisions, ce dernier aurait conclu que la chaleur peut être produite par des effets mécaniques et ne peut donc pas être autre chose qu'un mouvement mécanique des particules élémentaires constituant le corps chauffé (voir Black dans Lindsay, p. 200). Black rejette cette idée. Ironiquement, une observation qu'il a lui-même notée dans ses Lectures aurait pu le mettre sur la piste de la théorie cinétique :

[Heat] penetrates all kind of matter without exception : density and compactness are no obstacle to its progress : it appears to pass even faster into dense bodies, in most cases, than in rare ones (voir Black dans Lindsay, p. 191).

Le développement de la calorimétrie au 18e siècle par les chimistes favorise l'essor de la théorie de la « chaleur substance. » Antoine Laurent Lavoisier (1743 – 1794) prend manifestement cette idée pour acquis tellement elle est pratique pour décrire plusieurs phénomènes, en particulier les transferts de chaleur. Il n'y ajoute aucune contribution personnelle, sinon qu'il suggère dans son *Traité élémentaire de chimie* (1789) le nom évocateur calorique pour désigner ce fluide impondérable qu'est la chaleur. La théorie est très populaire, tellement que Lazare Nicolas Marguerite Carnot (1753 – 1823) se base sur ces principes pour formuler ce qui aujourd'hui est connu comme le deuxième principe de la thermodynamique. La théorie semble atteindre son apogée à l'époque de Joseph Fourier (1768 – 1830), après qu'il ait publié ce qui est maintenant appelée la loi de Fourier. Sa théorie explique les flux de chaleur basés sur l'hypothèse que le calorique est conservé.

La théorie du calorique, bien qu'ayant dominé la pensée pendant plus d'un siècle, a rencontré plusieurs oppositions. À peu près à la même époque que Gassendi, Francis Bacon (1561 – 1626) propose une théorie selon laquelle la chaleur est associée au mouvement. Ses idées sont mal reçues car elles sont mal exprimées. Elles sont reprises et expliquées un peu plus tard beaucoup plus clairement par Robert Boyle (1627 – 1691), qui était au courant des travaux de Verulam (Lindsay, p. 175). Boyle ne fait pas qu'argumenter en faveur de ses convictions. Il aurait fourni des preuves expérimentales sur la nature cinétique de la chaleur. Dans son traité *Of Mechanical Origin of Heat and Cold*,

il discute d'une dizaine d'expériences qui le convainquent de cette idée. Boyle était très avant-gardiste dans sa conception de la chaleur. Il explique que celle-ci est le résultat d'un mouvement des constituants des matériaux et que ce mouvement devient plus important à mesure que la chaleur s'amplifie. Il va plus loin en qualifiant ce mouvement de « confus » ; un mouvement ordonné (celui d'un objet qui se déplace dans son entier) n'est pas associé à la chaleur.

Le coup de grâce au calorique fut porté par Benjamin Thompson (1753 – 1814), mieux connu en tant que Compteur Rumford (Einstein et Infeld, p.45). Il s'inspire du raisonnement suivant. Les hommes allument depuis toujours le feu par frottement du bois, ce qui implique forcément que de la chaleur est créée. Or, dans la vision de l'époque, une des propriétés définissant une substance est qu'elle ne peut être ni créée, ni détruite, en parfaite contradiction avec l'expérience. Bien sûr, les défenseurs de la théorie du calorique avaient les reins solides. Ils argumentent que ce frottement pouvait influencer la capacité calorifique du bois. Après tout, ce qui était réellement observé n'était pas directement une augmentation de la chaleur, mais bien de la température. Rumford imagine alors une expérience pour vérifier ce qu'il en est vraiment. Il prend deux pièces de bois identiques. Il chauffe l'une de ces deux pièces par frottement et l'autre par contact avec un radiateur. Il s'affaire ensuite à mesurer les nouvelles capacités calorifiques (s'il y a lieu) de ces deux morceaux de bois — une procédure facile à réaliser. Il n'observe aucune différence dans les capacités calorifiques et sa conclusion est sans appel :

La source de chaleur produite, dans ces expériences, par le frottement paraissait manifestement inépuisable. [...] Ce qu'un corps isolé quelconque, ou un système de corps, peut continuer à fournir sans limitation, ne peut pas être une substance matérielle (Einstein et Infeld, p.45).

Pour lui, rien d'autre qu'un mouvement ne peut se communiquer sans limite de la façon qu'il l'a observé. Sa démonstration n'a malheureusement pas fait boule de neige (Lindsay, p. 176). Il a fallu attendre les travaux de Joule pour trancher définitivement la question. L'établissement d'une équivalence entre la chaleur et le travail mécanique a en effet mené à une formulation bien articulée d'une théorie mécanique de la chaleur.

Julius Robert von Mayer (1814 – 1878) fut le premier à proposer une valeur pour l'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique (Lindsay, p. 257). Les détails de ses démarches demeurent néanmoins plutôt sombres. Il semble qu'il aurait obtenu ce résultat à partir d'une étude comparative sur les gaz. Beaucoup de ses travaux sont par contre davantage orientés du côté de la médecine, un domaine qu'il affectionne particulièrement. Mayer remarque toutefois que la chaleur affecte de façon évidente plusieurs phénomènes biologiques, et cette constatation l'amène à croire que la chaleur pourrait être liée à quelque chose de fondamental dans la nature. Ses travaux n'ont pas reçu l'attention des gens que ça aurait pu intéresser car le titre de l'essai dans

lequel il les a exposés était *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel* (« *The Motion of Organisms and Their Relation to Metabolism* »).

James Prescott Joule (1818 – 1889) fut essentiellement autodidacte et sa situation familiale lui a permis de se consacrer à temps plein à ses activités de recherche dès l'âge de 19 ans. En étudiant le fonctionnement des moteurs électriques, il découvre la loi sur la production de chaleur dans les résistances, loi qui porte aujourd'hui son nom. Cette expérience (et d'autres) lui fait douter du bien fonder de la théorie du calorique. Il se convint alors rapidement qu'il doit exister un équivalent mécanique à la chaleur. Il semble qu'il n'ait pas été au courant des travaux de Mayer, aussi entreprend-t-il des expériences indépendamment pour découvrir cette relation. En utilisant une palme rotative immergée dans l'eau et entraînée par une masse en chute libre, il provoque une augmentation de la température du liquide, qu'il mesure avec une très grande précision. Il établit ainsi, en unités modernes, la relation suivante entre le travail dépensé et la chaleur produite : 4,2 Joules par calorie. Joule jouissait d'une réputation d'expérimentateur hors pair, aussi la relation qu'il publie fut-elle la première considérée comme crédible. William Thomson (Lord Kelvin) a reconnu avant tout le monde l'importance des travaux de Joule et a contribué à les faire connaître (Harman, p. 58).

5 Le chaînon manquant : L'énergie potentielle

La reconnaissance de la chaleur comme une forme d'énergie est une révolution extraordinaire qui a permis d'étendre le domaine de validité de la loi de conservation de la vis viva. Malgré cela, il demeurait de trop nombreuses situations où la perte de vis viva (par frottement ou autre processus) ne pouvait être expliquée par un simple gain de chaleur du milieu. Deux choix s'imposaient alors : Ou bien la conservation de la vis viva — de l'énergie — est une idée absurde, pas vraiment fondamentale, ou bien une contribution importante à l'énergie restait à découvrir.

Une de ces situations est celle, pourtant banale, d'une balle lancée verticalement. Dans l'expérience de Galilée décrite au chapitre 1, si le frottement de l'air est négligé, la vis viva est rigoureusement conservée, en autant que seul les instants initial et final ne sont considérés. À n'importe quel autre moment de la trajectoire, il est évident que la vitesse (et donc la vis viva) diminue jusqu'à s'annuler. Puis, spontanément, la balle regagne de la vitesse pour retrouver toute la vis viva qu'elle avait initialement. Pour que le principe de conservation proposé soit valable, il faut bien sûr qu'il soit vérifié pour tous les points de la trajectoire. Il faudrait admettre, sinon de renverser la théorie, que la vis viva est « emmagasinée » dans une sorte réservoir pour ensuite être « relâchée. » C'est là l'essence même de la notion d'énergie potentielle. Le développement de ce concept est principalement dû aux réalisations de la physique-mathématique.

Le concept d'énergie potentielle (sans être nommé de la sorte) fut probablement

utilisé pour la première fois au 18e siècle par Daniel Bernoulli (1700 – 1782). Dans une lettre à Leonard Euler (1707 – 1783), il discute du mouvement d'un élastique tendu et distingue la vis viva de l'élastique quand il est en mouvement de la vis potentialis quand il est étiré mais au repos. Carnot aurait repris ce concept par la suite dans son étude des machines. Ce dernier explique qu'un objet immobile à une certaine hauteur possède de la vis viva « latente » ou « virtuelle » qui peut devenir réelle à mesure qu'il tombe (Roche, p. 5).

Une contribution des plus importantes au développement de ce concept est due à Louis de Lagrange (1736 – 1813). Lagrange voit quelque chose de très fondamental derrière le principe de conservation de la vis viva. Il réussit à montrer de façon très explicite que l'ajout à la vis viva d'une fonction qui dépend de la position permet, dans certains cas, d'obtenir une quantité rigoureusement constante dans le temps (Balian — séminaire). Dans son traité *Mécanique Analytique*, publié pour la première fois en 1788, Lagrange développe une approche révolutionnaire basée sur les coordonnées généralisées pour étudier les problèmes de mécanique d'un point de vue purement mathématique. Il introduit une fonction qu'il note V , définit comme le négatif du travail (exprimé sous forme d'intégrale) fait par une force centrale. Il explique ensuite que le comportement d'un système peut être décrit par une certaine fonction $L = T - V$, exprimée en terme de ses coordonnées généralisées. Dans son expression, T représente la moitié de la vis viva telle que définie par Leibniz. Lagrange ne donne pas de nom particulier aux fonctions qu'il utilise.

George Green (1793 – 1841) était au courant des travaux de Lagrange. En 1828, dans un essai qu'il publie à ses frais, il affirme que la fonction V a une « grande importance » puisque le négatif de son gradient représente l'intensité d'une force (gravitationnelle, électrique ou magnétique). Pour des raisons inconnues, il la baptise « fonction potentielle. » Il faudra par contre attendre encore quelques décennies avant que cette fonction ne soit considérée comme autre chose qu'un « outil mathématique pratique. » (Roche, p. 5)

L'une des premières tentatives de formulation du principe (généralisé) de conservation de l'énergie fut effectuée par Hermann von Helmholtz (1821 – 1894). Bien que le mot *energy* ait déjà été introduit par Young, il ne l'utilise pas car son sens est encore nébuleux ; il parle plutôt de « puissance naturelle » ou de « force. » Il reconnaît néanmoins l'ambiguïté présente dans l'utilisation du mot *force*. Il considère, comme certains de ses prédécesseurs, qu'une loi de conservation fondamentale doit exister dans la nature. Dans son mémoire *Über die Erhaltung der Kraft* publié en 1847, il discute de la conservation de la « force » dans le problème à force centrale (au sens newtonien). Il explique que la variation de la vis viva peut se mesurer en termes d'une « force de tension », définit comme le produit de l'intensité de la force centrale par la distance de la source. Il démontre enfin que la somme de la vis viva, de la « force de tension »

et de la chaleur produite (s'il y a lieu) est une quantité conservée au cours du temps (Harman, p.41).

William Rowan Hamilton (1805 – 1865) connaissait les travaux de Lagrange. Il voyait le grand potentiel présent dans la formulation de ce dernier mais a préféré adopté une formulation différente, qui pouvait être utilisée plus facilement dans un plus grand nombre de situations. Il introduit une quantité U (égale au négatif de la fonction V de Lagrange) qu'il nomme « fonction force. » Il définit alors une quantité qu'il note $H = T - U$ (le même T que dans les équations de Lagrange) à partir de laquelle l'équation du mouvement peut être dérivée en terme des coordonnées généralisées de Lagrange et des quantités de mouvement du système. La fonction U est un peu plus tard associée à une « fonction de travail. »

La fonction H introduite par Hamilton — le hamiltonien — joue aujourd'hui un rôle absolument fondamental en mécanique. Notamment, sa simple formulation contient toute l'information menant à la conservation de l'énergie. La mathématicienne Emmy Noether (1882 – 1935) a formulé un théorème (qui porte aujourd'hui son nom) duquel découlent plusieurs lois de conservation. En particulier, l'énergie doit être conservée dans tous les cas où la formulation du hamiltonien est invariante sous translation dans le temps.

Dans la deuxième moitié du 19e siècle, tous les morceaux étaient finalement en place pour énoncer de façon formelle la nature du concept d'énergie. Mais comme il fut mentionné à quelques reprises, c'est au niveau du vocabulaire que les manques restaient à combler. Le mot *energy* introduit par Young avait été proposé pour décrire exclusivement l'énergie associée au mouvement (la vis viva de Leibniz). La synthèse du vocabulaire, incluant la levée des confusions liées à l'utilisation du mot *force*, est due à William John Macquorn Rankine (1820 – 1872) et William Thomson, plus tard Lord Kelvin (1824 – 1907) (Roche, p.2). Pour Rankine, la notion de *force* devait être limitée à « ce qui génère ou tend à générer un mouvement. » Cette définition a mis fin aux ambiguïtés concernant ce concept.

En 1855, Rankine publie aussi une définition formelle très générale de l'énergie, qui a eu l'avantage d'englober des formes d'énergie qui étaient alors inconnues par son auteur :

The term 'energy' comprehends every state of a substance which constitutes the capacity for performing work. Quantities of energy are measured by the quantities of work which they constitute the means of performing (Roche, p.3).

En 1852, Thomson distingue l'énergie « statique » et l'énergie « dynamique ». Cette distinction est reprise par Rankine un an plus tard, qui préfère les expressions « potentielle » et « actuelle » respectivement. Il est plus que probable que Rankine se soit inspiré des travaux d'Euler et de Green dans son choix du mot *potentiel* pour décrire « l'énergie latente. »

L'expression énergie potentielle pour désignée la fonction V de Lagrange ou encore la « force de tension » de Helmholtz n'a donc été introduite qu'en 1853. En 1867, un traité coécrit par Thomson et Tait introduit le terme cinétique pour décrire « l'énergie actuelle. » Ils associent alors l'énergie cinétique à la moitié de la vis viva telle que définie par Leibniz. La raison de ce choix est que la quantité $\frac{1}{2}mv^2$ représente la capacité d'un corps en mouvement à effectuer un travail, un fait qui avait déjà été identifié par Lagrange (Balian — Séminaire).

Il n'est cependant pas surprenant que le concept d'énergie potentielle, malgré les définitions claires offertes par Rankine, ait mis un certain temps à s'installer. John Herschel (1792 – 1871) a d'ailleurs formulé une critique qui est passée à l'histoire. Pour lui, le principe de conservation de l'énergie formulée par Helmholtz n'est qu'une mauvaise façon d'exprimer la véritable loi physique, qu'il croit être la conservation de la vis viva. Il ne croit pas à la réalité de l'énergie potentielle ; d'après lui (si elle existe), elle n'appartient pas au système. Son argument ne peut bien sûr pas être invalidé trivialement. Rankine explique toutefois que l'énergie potentielle est cohérente avec sa définition générale de l'énergie. De plus, Maxwell fait remarquer que si l'énergie potentielle n'en était pas vraiment, alors le principe de conservation de l'énergie (qui est alors établi) s'effondre complètement.

L'expression de la conservation de l'énergie exprimée par Helmholtz et ses successeurs s'est avérée tellement fondamentale qu'elle a amené l'énergie au premier plan dans l'étude des problèmes de mécanique. Même les forces, mécanisme premier au temps de Newton, se sont révélées n'être qu'une propriété dérivée d'un champ d'énergie potentielle. La formulation du premier principe de la thermodynamique est à la fois une reconnaissance de l'existence même de l'énergie et de sa conservation. La conservation de l'énergie était d'ailleurs tellement bien établie à la fin du 19e siècle que les situations où, apparemment, elle n'était pas respectée, ont permis de mettre en évidence de nouvelles formes d'énergie. Ce fut le cas, par exemple, de la radioactivité.

6 Conclusion

Il fut expliqué comment l'édifice du concept d'énergie et la loi de conservation qui lui est associée ont lentement pu être bâtis. Après le conflit entre Descartes et Leibniz sur la mesure de la force, D'Alembert a compris que ce mot n'était pas un choix judicieux pour désigner l'état de mouvement. Les embryons de loi de conservation de la vis viva ont d'ailleurs vu le jour à la même époque. Plus ou moins parallèlement, le succès du calorique fut anéanti par les travaux de Thompson et Joule, qui a montré l'équivalence entre le travail mécanique et la chaleur. Le développement de la mécanique analytique et du concept d'énergie potentielle ont par après suffit pour amener l'énergie sur un piédestal. Le développement du vocabulaire approprié par Rankine et Thomson a enfin

mis un terme à plusieurs confusions conceptuelles.

L'évolution du concept d'énergie ne s'est par contre pas arrêtée au 19e siècle. Le développement de la physique statistique, de la mécanique quantique et de la relativité générale d'Einstein a ajouté à la richesse du concept d'énergie. Le développement de toutes ces disciplines dépasse malheureusement le cadre de la présente rédaction.

Il est bien établi aujourd'hui que le concept d'énergie va bien au-delà de la physique. Bien que l'emphase n'ait pas été mise sur cet aspect dans les chapitres précédents, l'équivalence des différentes formes d'énergie a été reconnue par plusieurs penseurs et chercheurs parallèlement aux développements précédemment décrits. La réalité de l'énergie a ainsi pu être étendue à tous les domaines : chimie, biologie, etc. Encore une fois, c'est une discussion qui va au-delà de cette présentation. La conservation de l'énergie est donc devenue un outil puissant dans toutes les sciences. Pour ces raisons, l'énergie est aujourd'hui considérée comme un pilier unificateur au cœur de la science fondamentale.

7 Références

- [1] BALIAN, Roger, « Physique fondamentale et énergétique : les multiples visages de l'énergie », *Conférence de l'École d'Été de Physique*, Caen : Académie des sciences, 2001. Consulté le 27 novembre 2005. http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie/E2PHY/balian.pdf
- [2] BALIAN, Roger, « L'historique tortueux du concept d'énergie », *Groupe Séminaires de l'ENS Lyon*, 9 octobre 2003. Séminaire visionné le 19 octobre 2005. <http://www.ens-lyon.fr/asso/groupe-seminaires/seminaires/voirsem?id=rbalian>
- [3] EINSTEIN, Albert et INFELD, Leopold, *L'évolution des idées en physique*, Paris : Flammarion, 1983, 280 p.
- [4] HARMAN, P.M., *Energy, Force, and Matter : The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*, Cambridge : Cambridge University Press, 1982, 182 p.
- [5] LINDSAY, R. Bruce, *Energy / Historical Development of the Concept*, Dowden, Hutchinson et Ross ; distributed by Halsted Press, Stroudsburg, Pa. : New York : 1975, 369 p.
- [6] ROCHE, John, « What is potential energy? », *European Journal of Physics*, 24 (2003) 185-196. Consulté le 21 novembre 2005. <http://www.iop.org/EJ/abstract/0143-0807/24/2/359>
- [7] WESEMAEL, François, *Notes de cours PHY 3012*, Montréal : Université de Montréal, 2005

Les textes primaires utilisés comme références directes dans cette rédaction (liste ci-dessous) sont tous tirés du recueil de Lindsay. Certains des articles originaux sont traduits en anglais (lorsque nécessaire) directement par Lindsay, mais la plupart sont en fait des reproductions (anglaises aussi) de l'ouvrage suivant, qui n'a en soi pas été utilisé lors du présent travail :

- [8] MAGIE, W.F., *A Source Book in Physics*, New York : McGraw-Hill Book Company, 1935

Textes primaires :

- [9] BERNOULLI, Johann, *Discours sur les lois de la communication du mouvement*
- [10] BLACK, Joseph, *Lectures on the Elements of Chemistry*
- [11] BOYLE, Robert, *Of the Mechanical Origin, or Production of Heat*
- [12] D'ALEMBERT, Jean Le Rond, *Traité de Dynamique*
- [13] DESCARTES, René, *Principles of Philosophy*
- [14] GASSENDI, Pierre, *De calore et frigore*
- [15] LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm, «A Brief Demonstration of the Memorable Error of Descartes and Others concerning the Natural Law According to Which They Claim That the Same Quantity of Motion Is Always Conserved by God, a Law That They Use Incorrectly in Mechanical problems», *Acta Eruditorum*
- [16] NEWTON, Isaac, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*