



La longue élaboration du concept d'énergie

par Roger Balian, membre de l'Académie des sciences

Table des matières

1. Préhistoire : La dynamique, germe du concept d'énergie
2. Naissance de l'énergie mécanique
3. Premières études sur la chaleur
4. Naissance de la thermodynamique
5. Multiplicité des énergies et essor de la thermodynamique
6. La thermodynamique des processus irréversibles
7. L'apport de la physique statistique
8. Apports de la mécanique quantique ; énergie et temps
9. Apports de la relativité ; énergie et masse
10. Apports de la physique des particules ; hiérarchie des énergies

Le concept d'énergie est l'un des plus *abstrait*s et des plus *multiformes* de la science ; il ne date que d'un siècle et demi. Son élaboration, particulièrement longue et tortueuse, a fait intervenir d'intéressants allers et retours entre sciences et techniques. Nous en donnons ci-dessous un aperçu, que l'on pourra compléter en consultant le monumental *Dictionary of scientific biography* de C. C. Gillispie (Scribner's, New York, 1981, 16 volumes).

Les dictionnaires ou encyclopédies parviennent mal à définir l'énergie. Le *Robert* donne par exemple : « Ce que possède un système s'il est capable de produire du travail », ce qui n'est guère satisfaisant. En fait, bien que l'énergie soit liée aux propriétés de la matière, c'est un objet mathématique abstrait. Il s'agit d'une quantité associée à tout système, fonction des diverses paramètres caractérisant l'état de celui-ci à chaque instant ; elle peut se manifester sous diverses formes, mais possède la propriété essentielle de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

Il a fallu plusieurs siècles pour commencer à dégager l'idée d'énergie, d'abord dans le cadre de la dynamique. Puis l'étude des transformations entre chaleur et travail a conduit au premier principe de la thermodynamique, dont la formulation précise a fait émerger au milieu du XIX^e siècle une notion

plus générale d'énergie couvrant chaleur et énergie mécanique. Quelques décennies plus tard, la chaleur elle-même a pu être interprétée à l'échelle microscopique en termes mécaniques, ce qui semblait une unification définitive. Cependant les développements plus récents de la physique ont considérablement enrichi et précisé le concept d'énergie, comme on le verra plus loin.

1. Préhistoire : La dynamique, germe du concept d'énergie

Notre terme d'énergie provient du mot grec ενέργεια, qui signifie travail ou action interne. Les Grecs distinguaient δυναμική et ενέργεια, le terme de δυναμική signifiant l'action de pouvoir, la capacité caractéristique d'une chose. Le terme actuel d'énergie possède ces deux connotations de puissance et d'action, mais a acquis un sens mathématique précis. Dans la langue française le terme apparaît semble-t-il dans le cadre de la physique sous la plume du mathématicien Jean Bernoulli, en 1717, dans une lettre au mécanicien Pierre Varignon, pour désigner le produit de la force par le déplacement, produit désigné plus tard comme le travail mécanique de cette force. Cependant, de la force au travail, de la chaleur à l'énergie, de l'impulsion à la puissance, un chemin compliqué de clarification conceptuelle et d'expression mathématique restait à parcourir. Il n'aboutira qu'au XX^e siècle en traversant tout un ensemble de sciences et de techniques, de la mécanique à la thermodynamique, de la théorie des machines thermiques à la physiologie, de la relativité à la physique des particules.

Les mathématiciens et physiciens des XVII^e et XVIII^e siècles, qui étudiaient le mouvement sous l'angle de sa transmission, ou de son utilisation et sa transformation dans les machines simples, avaient l'intuition que quelque chose se conservait dans la communication du mouvement, sans s'accorder toujours sur la nature de cette quantité. Galilée (1564-1642) reconnaît que la vitesse v d'un corps ne varie pas en l'absence d'action extérieure. Dans sa philosophie d'inspiration mécaniste, selon laquelle tout se fait par figure et mouvement, René Descartes (1596-1650) expose des lois du choc et admet que c'est la quantité de mouvement mv (vue comme quantité scalaire) qui se conserve en se communiquant d'un objet à l'autre lors de leur interaction. Ce principe de conservation est adossé à la métaphysique : Dieu dans sa toute-puissance « a créé la matière avec le mouvement et le repos, et conserve maintenant en l'Univers, par son concours ordinaire, autant de mouvement et de repos qu'il y en a mis en le créant. Car bien que le mouvement ne soit qu'une façon en la matière qui est mue, elle en a pourtant une certaine quantité qui n'augmente ni ne diminue jamais, encore qu'il y en ait tantôt plus et tantôt moins en quelques unes de ses parties ».

Pourtant, lorsque Isaac Newton (1642-1727) élabore les lois du mouvement, il met en avant non l'idée de *conservation* mais celle de *force*. Dans son ouvrage *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687), il introduit d'abord la notion de masse m , produit de la densité d'un corps par son volume, à substituer au poids utilisé par les auteurs précédents. Puis il distingue la *vis insita* ou « force d'inertie » (qui fait persévérer le corps dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme) et la *vis impressa* ou « force imprimée », qui modifie l'état de repos ou de mouvement du corps sous l'action de causes diverses, choc, pression, force centripète. La force apparaît sous ce jour comme la cause qui modifie la quantité de mouvement mv . La force centripète attire un corps vers un point ou centre, comme la gravité ou la force magnétique. Cette force possède une quantité, la quantité motrice. La deuxième des trois lois fondamentales du mouvement concerne le changement

élémentaire de la quantité du mouvement sous l'action de la « force motrice imprimée » et énonce la proportionnalité entre les deux. Il reste difficile d'assimiler le langage newtonien au langage moderne dans la mesure où la « force motrice imprimée » n'est pas une force mais une *impulsion* (le produit d'une force par une durée d'application). L'introduction de la notion de force centripète va intensifier la discussion sur les « forces centrifuges », en réalité effets de l'inertie, à travers l'exemple bien connu de l'eau qui tend à se concentrer à la périphérie d'un seau en rotation. Ce mouvement est un « mouvement vrai » (et non un simple mouvement relatif) dont la cause, chez Newton, n'est pas une « force centrifuge » (terminologie due à Huygens), mais résulte de la combinaison de la force centripète et de la « force d'inertie ». De même, c'est par la combinaison de la force d'inertie, qui tend à retenir les corps dans un état de mouvement rectiligne, et de la force centripète, assimilée à la gravité, et inversement proportionnelle au carré de la distance au centre, que Newton rend compte des phénomènes des mouvements des planètes et des satellites.

La *recherche d'une grandeur conservée* fait cependant son chemin. Christiaan Huygens, physicien et astronome (la Haye 1629-1695), reconnaît la conservation au cours du temps pour un système isolé de la quantité de mouvement totale $\sum m\mathbf{v}$, somme des vecteurs $m\mathbf{v}$ où m désigne la masse de chaque partie du système et \mathbf{v} sa vitesse. Il énonce aussi que, lors d'un choc élastique, la somme $\sum mv^2$ des quantités mv^2 est conservée. Leibniz (1646-1716), disciple de Huygens à certains égards, reprendra cette idée sous la forme du principe de conservation de la « force vive ». Ce principe est vu comme conséquence des lois de la chute des corps énoncées par Galilée : du fait que la vitesse acquise est proportionnelle au temps (en vertu du principe découvert par Galilée que le temps est la variable indépendante pour la conception de la vitesse et de l'accélération) et que l'espace parcouru est proportionnel au carré des temps (ce qui ressort d'une série d'expériences à l'aide du plan incliné), il s'ensuit que l'espace parcouru est proportionnel au carré v^2 de la vitesse. On voit ici que l'intuition des concepts de la physique est issue d'une coopération entre raison et expérience conduisant à l'élaboration de structures mathématiques. C'est donc non seulement la quantité de mouvement $\sum m\mathbf{v}$, mais la « force vive », nouveau concept exprimé par la quantité $\sum mv^2$, qui est conservée dans les processus (non dissipatifs) d'échange de mouvement. Cette force vive est dite « absolue » car la mise au carré implique l'élimination de la direction et du sens de \mathbf{v} . Elle est estimée par la violence de ses effets, traduisant son « impétuosité ». Le vocabulaire de la force (*vis*, en latin) domine chez Leibniz comme chez Newton. Le principe métaphysique selon lequel l'effet total est toujours égal à la cause entière permet d'estimer la cause par ses effets. Leibniz ajoute ainsi à l'ontologie cartésienne de la figure (la matière, l'extension) et du mouvement ce nouvel objet qu'est la force. Il distingue la « force vive » de la « force morte », qui existe à l'équilibre alors que la force vive n'est pas encore produite en l'absence de mouvement effectué. Il en illustre la différence en comparant la force morte et la force vive au point et à la ligne. Le repos correspondrait à un mouvement infiniment petit. Leibniz écrit à De Volder que si v est la vitesse, dv est la « force morte », $\int v dv$ (équivalent à v^2) est la force vive ; la loi de la statique s'applique ainsi aux différentielles, celle de la dynamique aux intégrales. La transition entre l'équilibre des corps en conflit et leur mouvement se fait par le jeu de la « force morte », mouvement infiniment petit, potentialité de mouvement. En outre, la force vive « naît d'une infinité des impressions continues de la force morte ».

Au cours du XVIII^e siècle, les idées d'où a germé le concept d'énergie mécanique progressent lentement. Traductrice de Newton, amie de Maupertuis, Clairaut et Voltaire, la marquise Emilie Du Châtelet (1706-1749) prend parti pour Leibniz contre les cartésiens, et rapporte un grand nombre

d'expériences dans ses *Institutions de physique* en 1740. Les expériences de 's Gravesande (1688-1742) sur les corps mous frappent par leur ingéniosité. Il mesure les enfoncements subis par une boule de glaise frappée successivement par une boule de cuivre de masse $3m$ et de vitesse v , et par une boule de cuivre de masse m et de vitesse $3v$. L'effet, très supérieur dans le second cas, donne raison à Leibniz, promoteur de la force vive, contre Descartes, promoteur de la quantité de mouvement (qui est la même dans les deux cas).

2. Naissance de l'énergie mécanique

Nous savons aujourd'hui que les processus *non dissipatifs*, tels que mouvements des astres, oscillations d'un pendule non amorti, chocs élastiques de solides idéaux, dynamique de fluides non visqueux, conservent l'*énergie mécanique*, somme de l'*énergie cinétique* et de l'*énergie potentielle*. La physique du XVIII^e siècle rendait correctement compte des mouvements des divers éléments du système, mais il fallut attendre le milieu du XIX^e siècle pour qu'émerge le concept d'énergie mécanique. Même si les écrits de Leibniz comprenaient en germe les deux notions modernes d'énergie potentielle et d'énergie cinétique, celles-ci ne pouvaient être appréhendées faute d'un vocabulaire adéquat.

De fait, la multiplicité des « forces », grandeurs en tous genres qui caractérisaient les développements et discussions de la mécanique au XVIII^e siècle, appelait une mise en ordre des concepts et de la terminologie. Sans doute en raison du rôle central que Newton faisait jouer à la force dans sa formulation des équations de la dynamique, le mot de *force* fut longtemps employé non seulement dans son sens actuel mais aussi (accompagné éventuellement d'un adjectif comme nous l'avons vu plus haut) dans un sens plus ou moins imprécis d'énergie ou d'impulsion. Autre source de confusion, le terme de *puissance*, réservé aujourd'hui pour représenter une énergie par unité de temps, a été employé pour désigner une énergie elle-même. Ainsi Mayer écrit-il en 1842 que « les plantes absorbent une forme de puissance, la lumière, et en produisent une autre, la différence chimique ». Le terme de *travail*, dans son acception scientifique de produit d'une force par un déplacement, n'est proposé qu'en 1821 par Coulomb. L'introduction en physique du mot *energy* date de 1807 ; elle est due à Thomas Young, physiologiste, physicien et linguiste anglais (1773-1829) ayant découvert le mécanisme de l'accommodation par l'œil, les interférences, les lois de l'élasticité, et concurrent passionné de Champollion. Mais ce vocable n'a alors qu'un sens encore vague. Même en 1847, lorsque Helmholtz découvre (section 4) la généralité et l'importance de la conservation de l'énergie (sous toutes ses formes), il intitule le livre même où il énonce le premier principe *Über die Erhaltung der Kraft*. Ce n'est qu'en 1850 que William Thomson propose de substituer « energy » à « force », et Rankine introduit l'énergie potentielle en 1853. Le mot « énergie » n'apparaît toutefois pas avant 1875 dans la littérature scientifique française...

C'est cependant l'emploi croissant du langage mathématique qui a conditionné les progrès majeurs d'où le concept d'énergie mécanique s'est dégagé. Un moment crucial est la publication en 1788 de la *Mécanique analytique* de Louis de Lagrange (Turin 1736 – Paris 1813). Peu intéressé par des discussions philosophiques, celui-ci élabore un formalisme unifié basé sur l'emploi du calcul différentiel. Il déduit des équations du mouvement le « *théorème des forces vives* » : au cours d'un processus non dissipatif, le travail reçu par chaque point matériel (de masse m et de vitesse \mathbf{v}) d'un

système est égal à la moitié de l'accroissement de sa force vive mv^2 . Afin de passer de là à la conservation de l'énergie mécanique, somme des énergies potentielle V et cinétique T , il restait à reconnaître que les forces appliquées au système dérivent en général d'un potentiel, à en déduire que leur travail s'identifie à la diminution d'une certaine fonction V des variables de position appelée plus tard « énergie potentielle » (William Rankine, 1853), et à interpréter la demi force vive $T=\frac{1}{2}\sum mv^2$ comme « énergie cinétique » (Gaspard-Gustave Coriolis, 1829). Plusieurs décennies seront nécessaires pour établir clairement que l'énergie mécanique totale $T+V$ reste constante au cours du temps en l'absence de dissipation.

Le rôle central joué par les énergies cinétique et potentielle ressort déjà des travaux de Lagrange. Dans son traité, celui-ci établit que les équations du mouvement peuvent se déduire de la différence $L=T-V$ entre énergies cinétique et potentielle, considérée comme fonction des positions et des vitesses. Ainsi, cette nouvelle formulation de la dynamique fait intervenir le concept d'énergie plutôt que celui de force. Le nom de *lagrangien* a été donné à la fonction L .

Lagrange associe aussi, à tout chemin virtuel que l'on imagine être suivi par un système depuis une situation initiale (à l'instant t_i) jusqu'à une situation finale (à l'instant t_f), un nombre $S=\int Ldt$, appelé *action*, égal à l'intégrale de t_i à t_f du lagrangien le long de ce chemin ; il démontre alors que le chemin suivi dans la réalité par le système pour aller du premier au second des états considérés est celui qui rend l'action minimale. Ce faisant, il change le statut du « principe de la moindre quantité d'action » énoncé en 1744 par Maupertuis: « Maintenant voici ce principe si sage, si digne de l'Être suprême : Lorsqu'il arrive quelque changement dans la Nature, la quantité d'action employée pour ce changement est toujours la plus petite qu'il soit possible ». Maupertuis s'inspirait du principe de Fermat en optique, et de considérations métaphysiques à la Leibniz, la Nature étant censée choisir les solutions les plus économiques. Son « principe » était critiqué en raison de son caractère finaliste : la trajectoire semble déterminée par une cause finale, la connaissance par le système de son point d'arrivée. Depuis Lagrange, le « principe de moindre action » n'est qu'une conséquence mathématique des équations du mouvement, qui sont causales.

Parmi les mathématiciens successeurs de Lagrange, sir William Hamilton (Dublin 1805-1865) montre en 1833 que les équations de la dynamique non dissipative peuvent être engendrées non seulement à partir du lagrangien mais aussi à partir du *hamiltonien* $H=T+V$, somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle considérées comme fonctions des variables de position et de leurs moments conjugués (à la place des vitesses). Pour un système isolé, le hamiltonien ne dépend pas explicitement du temps, et les équations du mouvement admettent une *intégrale première* égale au hamiltonien lui-même. L'énergie mécanique apparaît finalement comme la valeur, qui demeure constante au cours du temps, du hamiltonien.

Il pouvait sembler artificiel, au milieu du XIX^e siècle, d'avoir mis sur pied une théorie aussi formelle et aussi élaborée pour ne traiter que de systèmes particuliers, non dissipatifs, somme toute exceptionnels. Nous verrons (section 7) que cette même théorie s'est ultérieurement révélée adéquate, de façon inattendue, pour les systèmes les plus généraux, à condition de les décrire en tenant compte de tous leurs degrés de liberté microscopiques.

3. Premières études sur la chaleur

Il n'a été question dans ce qui précède que de phénomènes purement mécaniques, sans production ni absorption de chaleur. La chaleur était un objet de réflexion scientifique depuis longtemps. Ainsi, Emilie Du Châtelet participe en 1737, en même temps que Voltaire et Euler, au concours de l'Académie sur « la nature du feu et sa propagation ». Mais l'étude quantitative des phénomènes calorifiques commence véritablement avec les premières mesures de *calorimétrie* dues à Pierre Simon de Laplace, astronome, mathématicien et physicien (Beaumont-en-Auge 1749 – Paris 1827), et à Antoine Laurent de Lavoisier (Paris 1743-1794) qui déterminent entre 1780 et 1784 toute une série de chaleurs spécifiques et de chaleurs de réaction. Laplace montre aussi que, lorsqu'un gaz se dilate sans perdre ni recevoir de chaleur, le produit PV^γ reste constant, P étant la pression, V le volume et γ le rapport entre les chaleurs spécifiques à pression et à volume constant. Cette relation remarquable entre propriétés mécaniques et thermiques lui permet de corriger la formule de Newton sur la vitesse du son, et de prévoir la variation de la température atmosphérique avec l'altitude.

L'étape suivante est marquée par Benjamin Thompson, aventurier et officier américain (1753 – Auteuil 1814) devenu ministre de la guerre en Bavière sous le nom de comte Rumford. Après avoir perfectionné le calorimètre, il mesure entre 1798 et 1804 la quantité de chaleur produite lors du forage de canons et comprend qu'elle doit être proportionnelle au travail fourni.

Inversement, divers inventeurs avaient déjà réussi à extraire empiriquement une « force motrice » à partir de chaleur. Denis Papin, après avoir imaginé sa célèbre « marmite », ancêtre de l'autoclave, fait des tentatives dans ce sens lors de son exil en Allemagne et en Angleterre après la révocation de l'édit de Nantes ; il parvient à construire en 1707 à Kassel le premier bateau à vapeur, malheureusement détruit par les bateliers lors des essais, et il meurt dans la misère (Blois 1647 – Londres 1714). Les mécaniciens anglais Thomas Savery et Thomas Newcomen mettent au point entre 1689 et 1705 les premières machines à feu, utilisables mais dont le rendement n'était que de 1%. James Watt, mécanicien écossais (1736-1819) chargé par l'Université de Glasgow de réparer un modèle réduit de démonstration d'une machine de Newcomen, découvre alors que celle-ci peut être considérablement perfectionnée. Il prend en 1769 un brevet sur la première véritable *machine à vapeur*, puis y apporte de multiples améliorations.

Toutes ces expériences et réalisations s'interprètent aujourd'hui comme des transformations en chaleur d'une énergie mécanique ou chimique, ou inversement. Pourtant, à l'époque, en l'absence du concept d'énergie, on considérait généralement la chaleur, à côté de la lumière, de l'électricité et du magnétisme, comme l'un des quatre « fluides impondérables », appelé phlogistique puis *calorique*. Ce calorique pouvait imprégner les corps matériels pesants et se *conservait* lors des transformations de ceux-ci. (Lavoisier écrit cependant : « nous ne sommes pas obligés de supposer que le calorique est une matière réelle ».) Une telle conception du calorique en tant que fluide conservé était encore répandue jusque vers 1840, malgré les expériences de Rumford et malgré la généralisation des machines à vapeur. Afin de progresser, il fallait explorer mieux les propriétés de la chaleur et comprendre sa nature. L'histoire de cette quête, difficile, qui s'étendit tout au long du XIX^e siècle, fait l'objet du passionnant ouvrage de S. G. Brush, *The kind of motion we call heat* (North Holland, 1976, deux volumes). Nous la résumons dans les deux sections qui suivent.

4. Naissance de la thermodynamique

Au cours de la première moitié du XIX^e siècle, les découvertes se sont succédé dans un ordre opposé à celui que nous estimons actuellement logique ou pédagogique. C'est ainsi qu'avec les études de Fourier sur la *propagation de la chaleur*, la notion de flux d'énergie, qui sous-tend la dynamique des processus irréversibles, a précédé d'une cinquantaine d'années la notion d'énergie, pourtant plus simple puisqu'elle concerne l'équilibre. Il est vrai que cette propagation pouvait s'interpréter en termes de flux de « calorique ». Joseph Fourier (1768-1830), après avoir été l'un des premiers professeurs à l'École Polytechnique avec Monge et Lagrange, participe à l'expédition d'Égypte, puis devient préfet de l'Isère sous l'Empire tout en consacrant ses loisirs aux mathématiques et à la physique. A travers un impressionnant ensemble de travaux, il résout le « problème de la chaleur » qui avait été mis au concours par l'Académie des Sciences. Il parvient d'abord à trouver les équations du problème, en exprimant la proportionnalité du flux de chaleur au gradient de température (1811), invente les séries dites de Fourier (1812) pour tenter de résoudre ces équations, puis les intégrales de Fourier qui lui permettent enfin d'aboutir à une solution complète ; il publie ses résultats quelques années plus tard (1822) sous le titre de *Théorie analytique de la chaleur*.

De même, la découverte de ce que nous appelons le « deuxième » principe de la thermodynamique précède d'une vingtaine d'années celle du « premier ». On la doit à Sadi Carnot (Paris 1796-1832) qui, inspiré par l'étude théorique des machines à vapeur, énonce en 1824 sous une forme déjà claire ce principe dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance*. Cette publication constitue l'acte fondateur de la thermodynamique. Carnot y donne en particulier une expression correcte pour le rendement des machines à vapeur, rapport du travail fourni par la machine au cours d'un cycle à la chaleur qu'elle reçoit de la source chaude. Mais il n'écrit pas le bilan global, ne se souciant pas de la chaleur cédée à la source froide. Plus ou moins consciemment, il adhère encore alors à la théorie du calorique, fluide censé s'écouler sans perte depuis la source chaude vers la source froide, comme l'eau qui met en mouvement une roue de moulin est transférée d'un bief à l'autre en générant du travail. Cependant, quelques années plus tard, Carnot comprit que le travail produit était soustrait à ce flux de chaleur, et prit ainsi conscience de l'équivalence entre travail et chaleur. Malheureusement, il mourut lors de l'épidémie de choléra de 1832 et la majeure partie de ses meubles et de ses papiers fut détruite par mesure d'hygiène – bien que l'on se soit interrogé plus tard sur la véritable cause de son décès. Ses écrits où il avait pressenti le premier principe ne furent découverts et publiés qu'un demi-siècle plus tard.

Nous nous focalisons ici sur l'histoire du premier principe de la thermodynamique, conservation de l'énergie ; sur l'histoire du deuxième principe, dégradation de l'énergie, et de l'entropie, on pourra lire la section 3.4 du livre *From microphysics to macrophysics* de R. Balian (Springer, tome I, 2007).

L'établissement définitif d'une équivalence entre travail et chaleur, puis l'énoncé du premier principe, et enfin l'introduction de la notion générale d'énergie ont requis la convergence d'idées issues de domaines divers. En témoigne la variété des préoccupations de la dizaine de savants qui, plus ou moins en parallèle, clarifient ces questions entre 1840 et 1850. Julius Robert von Mayer, médecin allemand de la marine (1814-1878), auteur d'expériences quantitatives sur le *métabolisme* humain, énonce en 1842 le *principe d'équivalence entre travail et chaleur* ; il comprend aussi en 1845 que

l'assimilation chlorophyllienne réalise une transformation d'énergie lumineuse en énergie chimique. L'équivalence du travail et de la chaleur est établie avec plus de précision par James Prescott Joule, riche brasseur anglais (1815-1889), physicien amateur, grâce à ses célèbres expériences de 1843-1847 où une chute de poids échauffe l'eau d'un calorimètre grâce au frottement dans l'eau d'une roue à ailettes entraînée par un poids. Le « calorique », fluide indestructible, n'existe pas ; la chaleur peut être créée ou détruite en même temps qu'une quantité proportionnelle de travail est consommée ou produite. Cette proportionnalité a conduit de nos jours le Bureau International de Poids et Mesures à choisir comme unité de chaleur le joule, en proscrivant l'emploi de la calorie.

Le *concept d'énergie* fut introduit en toute généralité en 1847 par Hermann von Helmholtz, médecin prussien (1821-1892) qui se consacra très tôt à la physique et apporta des contributions majeures à la plupart des branches de celle-ci. C'est lui qui émit l'idée que les transformations de la matière traduisent des changements de nature de l'énergie, et que la valeur totale de celle-ci reste conservée. Un apport de chaleur ou de travail à un système aboutit à un accroissement équivalent de son énergie interne.

Helmoltz avait été précédé par Ludvig Colding, penseur danois (1815-1888) animé par des motivations métaphysiques, qui imaginait déjà en 1843 l'énergie comme l'essence des choses, une entité sous-jacente à la matière. On peut considérer comme héritiers de Colding les *énergétistes*, tenants d'une philosophie teintée de mysticisme largement répandue vers la fin du XIX^e siècle, en particulier Wilhelm Ostwald, chimiste allemand (1853-1932) célèbre pour ses travaux sur l'électrolyse et la catalyse. Leur conception de l'énergie, substance continue, créée et indestructible, source suprême des choses, devait freiner le développement de la théorie cinétique et de l'atomisme, dont les partisans comme Boltzmann estimaient au contraire que la réalité ultime était faite de particules et non d'énergie (section 7).

Parmi ceux qui ont contribué à l'établissement du premier principe, on trouve aussi des *ingénieurs* ayant participé aux progrès des machines à vapeur, William Rankine, ingénieur et physicien écossais (1820-1872), Marc Seguin (Annonay 1786-1875) et Gustave Hirn (Colmar 1815-1890). On rencontre enfin un chimiste allemand, Justus von Liebig (1803-1873), et un électrochimiste anglais, William R. Grove (1811-1896), inventeur en 1839 de la pile à hydrogène.

5. Multiplicité des énergies et essor de la thermodynamique

On vient de voir que les phénomènes mécaniques et thermiques ont joué un rôle majeur dans l'élaboration du premier principe : c'est la mise en évidence de la proportionnalité entre quantité de chaleur dégagée et travail fourni qui conduit à considérer ces grandeurs comme deux formes différentes d'une entité sous-jacente, l'énergie. Mais, en même temps, comme l'illustre la variété des intérêts des personnalités précitées, le développement de branches nouvelles de la science met en évidence l'existence d'autres formes de l'énergie ; la généralité de la conservation de celle-ci est reconnue dans toutes sortes de transformations.

En fait, de tels phénomènes de transferts avaient déjà commencé à être étudiés, et la découverte du premier principe va faire apparaître l'énergie comme un caractère qui leur est commun. Ainsi, l'idée

d'énergie chimique se transformant en chaleur est sous-jacente dans les travaux de Laplace et Lavoisier sur les chaleurs de réaction. La mesure à l'aide d'un thermomètre de la chaleur transportée par les rayonnements solaires, effectuée en 1800 par William Herschel, astronome et compositeur (1738-1822), peut s'interpréter comme une détection d'énergie radiative. En fabriquant la même année la première pile, Alessandro Volta (1745-1827) réalise une conversion d'énergie chimique en énergie électrique. Immédiatement après, la découverte de l'électrolyse, puis en 1839 la construction par Grove de sa pile à hydrogène, enfin en 1859 l'invention par Gaston Planté (1834-1889) de l'accumulateur (ou « pile réversible ») aident à reconnaître l'équivalence entre énergies chimique et électrique. La découverte en 1839 de l'effet photovoltaïque par Antoine Becquerel (1788-1878) préfigure la transformation d'énergie radiative en énergie électrique. Et en 1841, la découverte par Joule de l'effet portant son nom lui permet d'identifier une transformation d'énergie électrique en chaleur. Une quarantaine d'années plus tard, Helmholtz relie la force électromotrice d'une pile à son énergie libre de réaction. Désormais, l'énergie se présente sous des formes multiples, entre lesquelles elle peut se transformer sans gain ni perte. Une nouvelle forme, l'énergie nucléaire, apparaîtra au début du XX^e siècle (section 10). C'est encore plus tard, dans la seconde moitié du XX^e siècle, que seront élucidés les mécanismes microscopiques de bioénergétique en jeu dans la photosynthèse (transformation de photons en énergie chimique) ou dans les cellules (libération d'énergie par l'ATP).

Notre vie courante est dominée par l'utilisation d'énergies de nature électrique et surtout chimique. Comme le travail et la chaleur, celles-ci ont fait et font toujours l'objet d'un va-et-vient entre science fondamentale et technologie. Ainsi la réversibilité des transformations entre énergies électrique et mécanique est mise en évidence par l'électricien belge Zénobe Gramme (1826-1901), qui invente la première dynamo en 1868, et par son associé, l'industriel Hippolyte Fontaine (1833-1910), qui montre en 1873 la possibilité d'utiliser la même machine comme un puissant moteur. Une décennie plus tard, l'ingénieur Lucien Goulard (1850-1888) met au point le transformateur, ce qui lui permet de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances par un courant alternatif à haute tension, ce qui réduit les pertes par effet Joule. Tous ces progrès de l'électrotechnique reposent sur une mise en œuvre de phénomènes magnétiques et ont provoqué en retour des développements de nature fondamentale. (Il est à noter que le magnétisme ne peut s'expliquer que dans le cadre de la physique quantique.)

La seconde moitié du XIX^e siècle est également marquée par la construction de l'édifice de la thermodynamique des états d'équilibre. Emile Clapeyron (Paris 1799-1864) avait précisé et développé en 1843 les idées de Carnot, en définissant notamment la notion de réversibilité. En 1854, Rudolf Clausius, physicien allemand (1822-1888), introduit une grandeur nouvelle, qu'il baptise *entropie* en 1865 et qui permet de donner au deuxième principe une forme plus concise quoique plus abstraite, la croissance de l'entropie d'un système isolé. Son concurrent britannique, William Thomson (1824-1907), devenu lord Kelvin en 1892, introduit en 1848 la *température absolue*. Dans les dernières décennies du siècle, les *potentiels thermodynamiques* comme l'énergie libre ou l'enthalpie, fonctions apparentées à la fois à l'énergie interne et à l'entropie, sont bâtis et utilisés par Helmholtz, par son élève Max Planck (1858-1947) et par l'américain Josiah Willard Gibbs (New Haven 1839-1903). En fait, la même idée avait déjà été exploitée par François Massieu, ingénieur des mines, économiste, physicien et mathématicien (1832-1896), afin de déterminer la chaleur spécifique des fluides à partir de leur équation d'état en vue d'application aux machines à vapeur ; mais son travail publié en 1870 fut méconnu en raison de la guerre franco-allemande.

Nous devons à László Tisza (1907-2009) et Herbert Callen (1919-1993) la formulation moderne de la thermodynamique. On considère un système composé de plusieurs parties ; les états d'équilibre de chacune de celles-ci sont caractérisés par la donnée de variables d'état conservatives, comme son énergie et le nombre de ses particules constitutives de chaque type. Il existe une fonction de ces variables, l'entropie, ayant la propriété suivante : lorsque le système est isolé, et que des échanges spontanés entre ses parties peuvent le mener d'un état d'équilibre à un autre, la valeur globale des variables d'état reste inchangée, alors que celle de l'entropie ne peut décroître. Cet énoncé couvre les deux propriétés essentielles de l'énergie, sa *conservation* et sa *dégradation*, par exemple la transformation irréversible de travail en chaleur, à laquelle est associée une croissance d'entropie. Les principes traditionnels sont ainsi unifiés et généralisés, l'entropie supplantant l'énergie comme grandeur centrale de la thermodynamique. Par exemple, l'inverse de la *température absolue* apparaît ici comme *variable conjuguée de l'énergie*, c'est-à-dire comme dérivée partielle de l'entropie par rapport à l'énergie.

Cependant, dans le cadre de la thermodynamique proprement dite, et en dépit du caractère unifié et général de sa formulation, la multiplicité des formes de l'énergie aussi bien que l'abstraction de ce concept restent pour le chercheur des sources d'interrogations. Nous verrons aux sections 7 et 10 quelles réponses ont été apportées à ces questions grâce au développement d'autres branches de la physique.

6. La thermodynamique des processus irréversibles

Le mot de *thermodynamique*, malheureusement consacré, prête à confusion. En effet, les idées que nous venons d'évoquer concernent seulement des bilans entre états d'équilibre, l'état initial et l'état final, mais pas la manière dont le système passe de l'un à l'autre. La prise en compte du temps est en particulier nécessaire pour manipuler le concept de *puissance*, énergie par unité de temps.

L'étude du déroulement temporel des processus dissipatifs hors d'équilibre a été comme nous l'avons vu initiée par Fourier, et a donné lieu à de nombreuses découvertes au cours de la première moitié du XIX^e siècle. A la loi de Fourier énonçant que le *flux de chaleur* est proportionnel au gradient de température (gradient qui caractérise l'écart à l'équilibre) succède toute une série de lois empiriques du même type : loi d'Ohm (1827) pour la *conduction électrique*, lois de Seebeck (1821) et de Peltier (1834) pour les *effets thermoélectriques* [Thomas Seebeck, médecin puis physicien (Tallinn 1770-1831), Jean-Charles Peltier, horloger puis physicien (1785-1845)], loi de Fick (1855) pour la *diffusion* de soluté dans un solvant [Adolf Fick, physiologiste (Kassel 1809-1901)], loi de Darcy (1856) pour l'écoulement à travers un *milieu poreux* [Henri Darcy, ingénieur de Ponts et Chaussées (Dijon 1803 – Paris 1858)]. L'étude de la *cinétique chimique* s'appuie de même sur la proportionnalité entre le taux de réaction et l'affinité chimique, grandeur caractérisant l'écart à l'équilibre et construite à partir des potentiels chimiques des divers constituants. (Le vocabulaire reste encore aujourd'hui source de confusion ici, puisqu'un potentiel chimique ressemble à une température, et non à un potentiel thermodynamique ou à une énergie potentielle.)

En ce qui concerne la *dynamique des fluides*, Newton avait déjà introduit une loi définissant la viscosité. Les équations complètes furent écrites en 1825 par Henri Navier, ingénieur des Ponts et Chaussées (Dijon 1785 – Paris 1836), s'appuyant sur des rudiments de théorie cinétique. Cependant, l'atomisme étant rejeté au cours des années suivantes par la plupart des savants au fur et à mesure que se développait la physique du *continu*, il fallut attendre 1845 pour que la communauté fût convaincue par les arguments de sir George Gabriel Stokes (Irlande 1819 – Cambridge 1903) du bien-fondé des équations dites aujourd'hui de Navier–Stokes.

Tous ces phénomènes d'apparences diverses ont pu être englobés dans un cadre cohérent à la suite de travaux effectués en 1931 par Théophile de Donder, chimiste et mathématicien (Bruxelles 1872-1957), et par Lars Onsager (Oslo 1903 – Miami 1976), physicien théoricien. Ainsi est née la *thermodynamique* proprement dite des processus irréversibles, théorie systématique et unifiée régissant le *déroulement dans le temps* de ces processus, tout au moins au voisinage de l'équilibre. Malgré son importance, cette discipline n'est guère enseignée que de façon fragmentaire (voir cependant R. Balian, *op. cit.* Tome II, chap. 14). Ses concepts fondamentaux sont ceux de *flux* ou de *courants* des grandeurs conservatives (énergie, quantité de mouvement ou nombres de particules) et ceux d'*affinités*, caractérisant les écarts à l'équilibre. Des principes généraux, s'ajoutant à ceux de la thermodynamique usuelle, régissent les équations combinant les flux, les affinités et les grandeurs thermodynamiques d'équilibre local, en particulier les *réponses* reliant les flux aux affinités, et fournissent les *taux de dissipation*, notamment d'énergie.

7. L'apport de la physique statistique

Aussi bien la thermodynamique des états d'équilibre que celle des processus irréversibles souffrent d'un défaut. Des concepts fondamentaux, chaleur, température, énergie, entropie, y présentent un caractère abstrait difficile à appréhender, même si la théorie permet leur manipulation mathématique, conduisant à des prévisions précises en accord avec l'expérience et se révélant d'une remarquable efficacité pour les applications technologiques. Ce fut un apport majeur d'une nouvelle science, la physique statistique, que de clarifier la signification de ces concepts en leur donnant à l'échelle microscopique une interprétation *mécaniste* et *probabiliste*.

En ce qui concerne les gaz, ce progrès fut effectué grâce à la *théorie cinétique*, principalement élaborée par James Clerk Maxwell (Edimbourg 1831 – Cambridge 1879) et par Ludwig Boltzmann (Vienne 1844 – Trieste 1906). Décrire un gaz, à l'équilibre ou au voisinage de l'équilibre macroscopique, en tant qu'assemblée de très nombreuses molécules, n'interagissant que lors de collisions très brèves, permet d'interpréter la densité comme un nombre moyen de molécules par unité de volume, la pression comme une force moyenne exercée sur une paroi sous l'effet des collisions de molécules sur cette paroi (idée introduite par Daniel Bernoulli en 1736), l'entropie comme une mesure du désordre régnant à l'échelle microscopique. L'énergie interne s'identifie à l'énergie cinétique totale des molécules, le travail fourni par un piston à une énergie mécanique communiquée sous l'effet de collisions, un apport de chaleur à la transmission aux molécules d'une énergie cinétique désordonnée. Pour les matériaux plus condensés que les gaz, l'énergie d'interaction à l'échelle microscopique entre particules constitutives n'est plus négligeable comparée à leur énergie cinétique,

et l'énergie macroscopique totale s'identifie à l'énergie mécanique microscopique, somme des énergies cinétique et d'interaction des particules.

Le *premier principe* de la thermodynamique traduit donc la constance au cours du temps de l'*énergie mécanique microscopique*, grandeur qui a une expression formelle simple en fonction des positions et vitesses des particules constituant le matériau. La théorie cinétique a ainsi abouti à une importante simplification et à un retour en arrière surprenant : en passant à l'échelle microscopique, on n'a plus besoin que de concepts de mécanique analytique ; l'énergie *totale* s'identifie à la valeur, conservée, du hamiltonien microscopique.

Le *deuxième principe* exprime que l'état d'équilibre final d'un système est à l'échelle microscopique *le plus désordonné* parmi ceux que le système puisse atteindre, ce désordre étant mesuré par l'entropie, grandeur statistique. La notion de chaleur, que l'on avait mis si longtemps à dégager et qui était indispensable pour exprimer à notre échelle la conservation de l'énergie, s'évanouit à l'échelle microscopique, où la chaleur n'est qu'une partie (désordonnée) de l'énergie mécanique totale.

Cette explication des concepts et principes de la thermodynamique paraît aujourd'hui naturelle, mais il faut souligner qu'elle ne s'est imposée qu'au XX^e siècle. Malgré sa notoriété, Boltzmann allait à contre-courant de la science de son temps et dut lutter rudement pour défendre ses idées. En effet, la physique du continu triomphait alors avec la thermodynamique, l'électromagnétisme, l'optique ou la dynamique des fluides. Alors que l'atomisme était couramment admis par les physiciens comme par les chimistes jusque vers 1820, il apparaissait dans la seconde moitié du XIX^e siècle comme une hypothèse hasardeuse dénuée de fondement expérimental : les observations décisives de Jean Perrin datent de 1908, et même des chimistes influents comme Berthelot refusaient de considérer une réaction chimique comme un réarrangement d'atomes en molécules.

Au cours du XX^e siècle, le développement de la *physique statistique quantique* permit de généraliser, d'abord aux propriétés énergétiques du rayonnement électromagnétique (Planck, 1900 ; Einstein, 1904), puis aux solides et à tout système matériel, les idées initiées par la théorie cinétique des gaz. En conséquence, les bases de la thermodynamique, autrefois érigées en principes fondamentaux autonomes, n'apparaissent plus aujourd'hui que comme de simples conséquences à notre échelle des lois, elles-mêmes simples, de la microphysique. En principe, les propriétés macroscopiques des processus dynamiques hors d'équilibre et les lois de comportement des divers matériaux découlent aussi de la physique microscopique. Les constituants élémentaires d'un matériau sont si nombreux qu'ils ne peuvent être étudiés que par des méthodes statistiques ; cependant, ce grand nombre permet d'effectuer à notre échelle des prévisions quasi certaines, ce qui confère à la théorie son caractère déterministe malgré les probabilités sous-jacentes. Il émerge ainsi à notre échelle des propriétés, déterminisme, continuité, irréversibilité, transitions de phase, qui diffèrent *qualitativement* des comportements microscopiques.

Ces progrès majeurs constituent une réussite conceptuelle spectaculaire du *réductionnisme* : grâce à l'application de la microphysique à des systèmes comportant un très grand nombre de particules et à l'emploi de méthodes statistiques, le macroscopique, complexe et varié, s'est ramené au microscopique, simple et unifié, donc plus fondamental. Ceci est particulièrement net pour l'*énergie*, dont les *multiples formes* que nous percevons ne sont que des reflets d'une *même réalité sous-*

jacente. Cependant, même si nous savons désormais que les sciences macroscopiques découlent de la microphysique, elles ne sont pas pour autant devenues caduques. En effet, en raison de l'*émergence* de phénomènes a priori inattendus lorsqu'on passe d'une échelle à l'autre, des études de physique à notre échelle restent toujours indispensables : elles seules permettent de découvrir et d'explorer de tels phénomènes, même si ces derniers peuvent a posteriori trouver leur explication dans la physique microscopique. De plus, celle-ci fait intervenir un très grand nombre de degrés de liberté, dont la manipulation est dans la pratique souvent irréalisable. En particulier, pour les applications de la physique à l'énergétique, une approche macroscopique suffit à la plupart des besoins.

8. Apports de la mécanique quantique ; énergie et temps

Même si les progrès de la physique au XX^e siècle ont porté principalement sur des aspects microscopiques apparemment éloignés de notre expérience quotidienne, ils ont apporté des éclairages nouveaux sur le concept d'énergie, qui s'est ainsi enrichi et précisé. Par ailleurs, la physique nouvelle a, dans le domaine de l'énergétique, donné naissance à des objets technologiques aussi divers et novateurs que les *réacteurs nucléaires* ou les *piles photovoltaïques*.

Nous avons fait ci-dessus allusion aux origines de la mécanique quantique : afin d'expliquer la loi de Planck, qui régit la manière dont l'énergie se distribue selon les fréquences dans un rayonnement comme celui du Soleil, il faut quantifier le rayonnement, c'est-à-dire le représenter comme une assemblée de particules, les photons. En conséquence, l'énergie d'un rayonnement ne peut prendre que des valeurs discrètes, égales à la somme des énergies des photons qui le constituent. Les progrès ultérieurs de la physique quantique ont montré que la *quantification de l'énergie* est un phénomène général. L'énergie de tout système fini ne varie pas de façon continue ; elle ne peut prendre que certaines valeurs discrètes bien définies. Cette propriété contraste avec notre expérience courante, qui semble indiquer que l'énergie est une grandeur continue. Cependant, à notre échelle, les valeurs permises pour l'énergie d'un système comportant un grand nombre de constituants élémentaires sont certes discrètes, mais si denses que leur caractère discontinu est invisible.

La microphysique a fait aussi découvrir d'autres aspects de l'énergie, associés à l'évolution au cours du temps. A l'échelle microscopique, la dynamique d'un système est engendrée, en mécanique quantique comme en mécanique analytique (section 2), par un hamiltonien, fonction des positions et moments des constituants élémentaires égale à la somme de leurs énergies cinétique et d'interaction. (Le potentiel d'interaction, qui figure ainsi directement dans le lagrangien ou le hamiltonien, présente un caractère plus fondamental que les forces, grandeurs qui en découlent.) En termes de particules élémentaires, il n'y a ni dissipation, ni irréversibilité, ni chaleur : ces notions émergent par passage à l'échelle macroscopique. En physique classique, l'énergie s'identifie à la valeur du hamiltonien microscopique. L'avènement de la mécanique quantique n'a guère modifié ces principes, mais nous devons désormais considérer les positions, moments et autres grandeurs dynamiques non plus comme des variables qui commutent mais comme des opérateurs, objets mathématiques qui ressemblent à des variables aléatoires mais dont le produit n'est pas commutatif. Tout objet physique, décrit par un opérateur, peut donc présenter des fluctuations statistiques autour de sa valeur moyenne. L'énergie s'interprète alors comme *valeur moyenne de l'opérateur hamiltonien H*. Les

fluctuations statistiques relatives de celui-ci sont faibles pour un système macroscopique, de sorte que le caractère probabiliste de l'énergie est masqué à notre échelle.

De plus, à un instant donné, l'état d'un système quantique défini aussi bien que possible est représenté par une fonction d'onde Ψ ; l'évolution de celle-ci se décrit mathématiquement par l'équation de Schrödinger (1926), $i\hbar \partial\Psi / \partial t = H\Psi$, où l'opérateur hamiltonien H agit sur la fonction d'onde et où $\hbar = 2\pi \eta = 6,6 \times 10^{-34}$ Js est la constante de Planck. Un état stationnaire, d'énergie E bien définie, est décrit par une fonction d'onde solution de cette équation, dont seule la phase évolue selon $\exp(-iEt/\hbar)$. Dans le cadre de la dynamique, *l'énergie et le temps* apparaissent ainsi comme des *grandeurs conjuguées* (alors que, comme nous l'avons vu à la section 4, c'est l'énergie et l'inverse de la température qui doivent en thermodynamique être considérées comme conjuguées). Cette conjugaison entre temps et énergie, issue de l'équation de Schrödinger, fait intervenir la constante de Planck ; la fréquence d'oscillation de $\exp(-iEt/\hbar)$ est $\nu = E/2\pi\hbar$. L'énergie E d'une fonction d'onde quantique est ainsi reliée à sa fréquence ν par la relation $E = h\nu$ de Louis de Broglie (1924).

Une autre situation où temps et énergie sont associés est celle des états métastables en physique atomique (atomes optiquement excités) ou en physique des particules (noyaux radioactifs). De tels états, qui ont une certaine durée de vie τ , sont représentés par des fonctions d'onde décroissant au cours du temps selon la loi exponentielle $\exp[-t/\tau]$. Leur énergie est mal définie ; on montre que sa fluctuation statistique ΔE est reliée au temps de vie τ par la relation $\Delta E = \hbar/2\tau$.

La dualité entre énergie et temps, ainsi que la conservation de l'énergie, entrent en fait dans un cadre plus profond et général. Selon un théorème établi par la mathématicienne Emmy Noether (Erlangen 1882 – Bryn Mawr 1935) comme conséquence de la mécanique lagrangienne, toute *invariance* des lois de la nature sous l'effet des transformations d'un certain groupe a pour conséquence la *conservation* au cours du temps de certaines grandeurs, qui sont les valeurs moyennes (en mécanique quantique) des générateurs infinitésimaux de ce groupe. Par exemple, les trois composantes du moment total $\mathbf{P} = \sum m\mathbf{v}$ constituent en mécanique quantique des opérateurs, générateurs des translations ; l'invariance des lois physiques par translation implique la conservation de la quantité du mouvement totale \mathbf{P} (section 1). De même, l'invariance par rotation entraîne la conservation du moment cinétique. La conservation de l'énergie, elle, traduit *l'invariance des lois par changement d'origine du temps*. En effet, selon l'équation de Schrödinger, la variation entre les temps t et $t + dt$ de la fonction d'onde Ψ est $\Psi(t + dt) - \Psi(t) = H\Psi dt / i\hbar$, de sorte que l'opérateur hamiltonien est, au facteur $1/i\hbar$ près, le générateur des translations dans le temps. L'invariance par translation dans le temps, propriété très intuitive, implique la loi de conservation de l'énergie, qui l'est beaucoup moins, comme l'a montré la difficulté de son élaboration.

La description d'un état quantique par une fonction d'onde ne convient que pour des objets microscopiques aussi contrôlables que le permet le caractère probabiliste imposé par la physique quantique. Pour des systèmes macroscopiques, il est nécessaire d'étendre la notion d'état quantique, ce qui a été fait en 1927 par Lev Davidovitch Landau et Johann (John) von Neumann. Celui-ci précise alors les idées de Boltzmann sur *l'entropie* en tant que *mesure du désordre*, en écrivant l'expression générale de l'entropie d'un système en termes de sa description microscopique, probabiliste et quantique. Cette expression inspirera en 1948 les ingénieurs et mathématiciens Claude Shannon et Warren Weaver, lorsqu'ils créeront la théorie de la communication basée sur le concept de *quantité*

d'information transférée. En retour, Léon Brillouin établit en 1950 l'équivalence entre entropie et quantité d'information microscopique manquant lorsqu'un système n'est connu qu'à travers ses variables thermodynamiques, apportant un nouvel éclairage sur le deuxième principe (voir R. Balian, *Entropie, information : un concept protéiforme*, Université de tous les savoirs, vol. 4, pp. 947-959, Odile Jacob 2001).

La mécanique quantique permet de prévoir certains phénomènes énergétiques exotiques. Ainsi, l'effet Casimir (1948) introduit un concept nouveau, celui d'*énergie du vide*. La physique quantique repose sur l'idée que les grandeurs physiques sont des objets aléatoires définis par une loi de probabilité, de sorte que leur valeur présente en général une fluctuation statistique autour de sa moyenne. En particulier, dans une région vide délimitée par des parois non chargées, le champ électromagnétique est nul en moyenne, mais la moyenne de son carré est finie. L'énergie du champ, proportionnelle au carré de son amplitude, peut donc prendre une valeur non nulle dans cette région vide. Etant donné que cette valeur de l'énergie dépend de la position et de la forme des parois, celles-ci se trouvent soumises à des forces, que l'on a pu mesurer.

9. Apports de la relativité ; énergie et masse

La *relativité* a, comme la physique quantique, apporté plusieurs changements de perspective sur le concept d'énergie. La relativité restreinte (Einstein, 1905) oblige à considérer, pour une particule ponctuelle, les coordonnées de position et le temps comme des variables pouvant se combiner entre elles lorsqu'on change de repère ; elles forment les quatre composantes d'une seule entité, un quadrivecteur. De même, l'énergie se combine aux trois coordonnées du vecteur quantité de mouvement (ou *moment*) pour former un quadrivecteur, de sorte qu'*énergie et moment* sont des grandeurs de nature similaire. La dualité entre temps et énergie apparaît ainsi sous un jour nouveau, en parallèle avec la dualité entre position et moment. De plus, la relativité fixe la constante additive arbitraire qui pouvait être incluse dans la définition pré-relativiste de l'énergie.

Par ailleurs, la célèbre formule $E=mc^2$ met en évidence une équivalence entre *masse et énergie* ; cette équivalence a été vérifiée en comparant la différence des masses des noyaux avant et après une réaction nucléaire à l'énergie libérée. Avec la relativité générale (Einstein, 1915), la densité d'énergie prend un aspect géométrique puisque cette grandeur s'interprète comme l'une des composantes d'un tenseur, relié par les équations d'Einstein à la *courbure de l'espace-temps*. Enfin, dans ce même cadre, si le vide a une énergie définie sans constante additive, il pourrait se comporter comme s'il avait une masse, avec des conséquences cosmologiques.

10. Apports de la physique des particules ; hiérarchie des énergies

La science du XX^e siècle a aussi été marquée par l'apparition de la *physique des particules*, molécules et atomes, puis électrons et noyaux, puis encore constituants de ces derniers à des échelles de plus en plus petites. Elle a pour origine la découverte entre 1896 et 1898 de la *radioactivité* par Henri Becquerel (Paris 1852-1908), Pierre Curie (Paris 1859-1906) et Marie Skłodowska-Curie (Varsovie 1867-1934). Les expériences provoquent pendant quelque temps une

crise en ce qui concerne le premier principe. Ayant observé qu'une masse très faible de radium dégage un flux d'énergie considérable, transporté par le rayonnement émis et recueilli sous forme de chaleur, Marie Curie s'interroge sur l'origine de cette énergie. Avec d'autres, elle se demande même si le phénomène de radioactivité ne violerait pas la conservation de l'énergie, qui était déjà érigée en dogme. Ces doutes étaient légitimes car les énergies en jeu étaient incomparablement supérieures à celles que l'on connaissait jusque là, et leur production semblait ne pas décroître au cours du temps. Le problème fut résolu par Rutherford (1900) et Soddy (1902) avec la découverte des mécanismes de la radioactivité et celle des temps de vie, en relation avec des mesures calorimétriques. Ainsi, il s'avéra que l'*énergie nucléaire* est une nouvelle forme d'énergie satisfaisant comme toutes les autres à la loi de conservation.

L'observation de trois types de rayonnement, α , β et γ , puis l'analyse des rayons cosmiques et surtout le développement des accélérateurs ont progressivement conduit à l'élaboration de la théorie des particules et de leurs interactions. Au cours du dernier demi-siècle, cette étude de la matière à des échelles infra-nucléaires a abouti à une classification fondamentale des énergies au niveau des particules élémentaires. On distingue *quatre interactions élémentaires*, d'intensités fort différentes.

(i) L'interaction la plus intense, dite *forte*, lie entre eux les quarks pour former des protons et neutrons, et ceux-ci pour former des noyaux. Elle est en jeu dans la radioactivité α et dans la plupart des réactions nucléaires, et elle est responsable de la cohésion des noyaux. (ii) L'interaction *électromagnétique* entre particules chargées est véhiculée par le photon. Elle se manifeste en physique nucléaire dans la radioactivité γ , elle lie les électrons et les noyaux pour former des atomes, et ceux-ci pour former des molécules ou des solides. (iii) L'interaction dite *faible*, beaucoup moins intense que l'interaction électromagnétique, est responsable de la radioactivité β . (iv) Enfin, l'interaction *gravitationnelle*, proportionnelle à la masse des objets, est la plus faible des quatre interactions fondamentales : l'attraction gravitationnelle entre deux protons est 8×10^{-37} fois plus faible que leur répulsion coulombienne. Elle devient sensible à notre échelle grâce au très grand nombre de particules constituant les objets macroscopiques.

Quoique microscopique, cette classification se reflète à notre échelle. Elle sous-tend l'énorme différence de concentration des diverses formes macroscopiques d'énergie dans la matière. Les énergies *nucléaires* (*fission* dans nos réacteurs, *fusion* dans le Soleil) sont gouvernées par l'interaction *forte* ; pour libérer 1 kWh (3600 kJ), il suffit de 5 μ g d'hydrogène dans le Soleil, de 10 mg d'uranium naturel dans nos réacteurs (100 fois moins dans les surgénérateurs en projet). Les énergies les plus courantes, *électrique, lumineuse, chimique, biochimique, calorifique, élastique*, ont à l'échelle microscopique la même nature *électromagnétique*. Les masses en jeu pour libérer 1 kWh sont ici de l'ordre du kg : 1 kg de pétrole équivaut à 12 kWh (de même pour les autres carburants, gaz ou charbon) ; une batterie au plomb stocke 0,35 kWh* par kg ; un homme consomme 3 kWh par jour, fournis par ses repas ; 1 kWh permet de faire fondre 10 kg de glace ou de faire bouillir 1,5 kg d'eau ; la puissance du rayonnement solaire est de l'ordre de 1 kW par m². Enfin, l'énergie de *pesanteur* et l'énergie *cinétique*, liées à la *gravitation*, sont extrêmement diluées (gravité et mouvement sont unifiés par la relativité générale). Pour produire 1 kWh d'énergie électrique dans une usine hydroélectrique, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau de 40 m ; avec une éolienne, il faut récupérer l'énergie cinétique de 20 000 m³ d'air (27 tonnes) arrivant à 60 km/h. De même 1 kWh est l'énergie cinétique d'un camion de

*0,35 kWh/ kg n'est pas possible pour une batterie au plomb. Voir notes présentation 2.2.6, page 58. Une batterie ordinaire au plomb fait entre 30 et 50 Wh/kg de densité énergétique. Il doit manquer un zéro dans le chiffre proposé : 0,035 kWh/kg est plus plausible.

10 tonnes roulant à 100 km/h. Ces ordres de grandeur présentent une importance capitale pour la compréhension des problèmes énergétiques.

La majeure partie des deux premières sections a été rédigée par Claude Debru. La suite est principalement issue du premier chapitre du cours « Physique fondamentale et énergétique : les multiples visages de l'énergie » de Roger Balian, dont la suite porte sur les conséquences énergétiques des principes physiques fondamentaux. Ce cours, donné à l'École d'Été de Physique de Caen (2001), est disponible sur

http://e2phy.in2p3.fr/2001/e2phy_2001.html

ou sur

<http://ipht.cea.fr/Docspht//search/article.php?IDA=1375>.