

Chapitre I

LA NAISSANCE DE LA THERMODYNAMIQUE

Panorama de la physique en 1850

Deux cent cinquante ans seulement séparent les premières découvertes de Galilée et la naissance de Max Planck. C'est bien peu, surtout si l'on songe que Max Planck a vécu près de quatre-vingt-dix ans, quatre-vingt-dix ans pendant lesquels la physique connaît les plus grands bouleversements. Max Planck est véritablement à la charnière entre ce qu'il est convenu d'appeler la physique classique et la « nouvelle » physique apparue à l'aube du XX^e siècle.

Mais resituons d'abord rapidement les grandes étapes de cette physique classique dont Max Planck sera fortement imprégné.

Poggendorff¹ indique, à juste titre, que :

[Galilée] *mériterait le titre de fondateur de la physique, si un seul homme avait pu fonder une science aussi vaste et aussi variée.*

En effet, Galilée (1564-1642), en alliant l'expérimentation à l'utilisation des mathématiques, donne à la physique, à partir de 1600 environ, une puissance insoupçonnée. En énonçant son principe de relativité et la loi de composition des mouvements, il donne à la mécanique des bases solides. Huygens (1629-1695) corrobore et amplifie les travaux de Galilée. On lui doit, en particulier la découverte de la conservation de la quantité de mouvement. Newton (1642-1727) en publiant ses *Principia*

¹ J.-C. Poggendorff, *Histoire de la physique*, 1883, réédition J. Gabay, 1993.

(1687) structure la mécanique pour plus de deux siècles. Les *Principia* sont à la fois le premier manuel de mécanique générale, le premier manuel d'hydrodynamique et le premier manuel de mécanique céleste. Lagrange s'exclamera :

il n'y a qu'une seule loi dans l'univers, et c'est Newton qui l'a trouvée.

Lorsque Max Planck fait ses études, la mécanique semble définitivement installée dans son cadre newtonien. Rappelons la profession de foi que fait Laplace en 1816¹ :

Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait, dans la même formule, les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome. Rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Il est vrai que Laplace a introduit également les probabilités en physique. Il module les propos célèbres qui viennent d'être cités en ajoutant :

mais l'ignorance des différentes causes à l'origine des événements et leurs complexités nous empêchent d'atteindre la même certitude dans la plupart des phénomènes. Ainsi il y a des choses qui sont incertaines pour nous, des choses qui sont plus ou moins probables, et nous cherchons à compenser notre impossibilité de les connaître en déterminant leurs différents degrés de vraisemblance. C'est ainsi que nous devons à la faiblesse de l'esprit humain l'une des plus délicates et des plus ingénieuses théories mathématiques, les probabilités.

On retrouve chez Planck la foi déterministe de Laplace et sa confiance en l'utilisation des probabilités pour cerner le réel.

Après Newton et Laplace (surnommé le « Newton français »), la mécanique s'enrichit des travaux de Lagrange (1736-1813) et de Hamilton

¹ P.S. Laplace, « Recherches sur l'intégration des équations différentielles aux différences finies, et sur leur usage dans la théorie des hasards », 1776, in *Œuvres complètes*, vol. 8, p. 144-145.

(1805-1865). La mécanique analytique (1788) de Lagrange est une véritable révolution. En faisant disparaître la notion de force, Lagrange permet une approche systématique des problèmes de mécanique et donne à cette science un cadre très général. Hamilton (surnommé le « Lagrange irlandais » et même le « Newton irlandais ») dote, dans les années 1830, la mécanique d'un outil extrêmement puissant et prolonge ainsi les travaux de Lagrange. À son tour Jacobi (1804-1851) simplifie et généralise la théorie de Hamilton. Les approches de Lagrange, Hamilton et Jacobi se révéleront remarquablement bien adaptées à la formalisation de la mécanique quantique réalisée dans les années 1925-1926 (cf. les chapitres VII et VIII).

Pendant la jeunesse de Max Planck, l'électromagnétisme est un domaine en pleine élaboration. Depuis la découverte, en 1800, de la pile par Volta, les physiciens disposent d'une source continue d'électricité. Ørsted (1777-1851) met en évidence en 1819 le fait qu'une aiguille aimantée est déviée au voisinage d'un fil parcouru par un « conflit » électrique. Arago (1786-1853) fait le compte rendu de cette expérience à l'Académie des Sciences en septembre 1820 et à la suite de cela, Ampère (1775-1836) fonde en quelques semaines l'électrodynamique. Faraday (1791-1867) découvre l'induction en 1831, introduit la notion physique de champ électrique et magnétique et a la conviction profonde de l'unité des forces en physique. Les premiers travaux de Maxwell (1831-1879) sur l'électricité datent de 1855... trois ans avant la naissance de Max Planck. Helmholtz (1821-1894), qui sera le professeur de Planck (et de Hertz) à Berlin, fait connaître les travaux de Maxwell en Allemagne...

La jonction entre l'optique et l'électromagnétisme se fait pendant la jeunesse de Planck. L'optique est alors déjà une science ancienne. En effet, le premier traité d'optique géométrique a été écrit par Kepler (1571-1630) en 1604, la loi de la réfraction énoncée par Snell en 1620 et Descartes (1596-1650) en 1637, est démontrée par Fermat (1601-1665) en 1662. La diffraction, découverte par Grimaldi vers 1650, et la double réfraction, découverte par Bartholin en 1669, ont été interprétées par le grand Huygens qui publiera son fameux *Traité de la lumière* en 1690. Entre temps l'astronome Römer a montré en 1678 que la lumière se

propage à une vitesse finie. Newton, quant à lui, a opposé à la théorie ondulatoire de Huygens une théorie corpusculaire, et son ouvrage *Traité d'optique* (1704) sera la référence en optique pendant un siècle. C'est Young (1773-1829) qui, en découvrant les interférences en 1802, a redonné du crédit à la théorie ondulatoire, laquelle trouvera son apogée grâce aux magnifiques travaux de Fresnel (1788-1827). Peu avant la naissance de Max Planck, Foucault a réalisé, en 1850, l'*experimentum crucis* de l'optique et a montré que la lumière se propage moins vite dans l'eau que dans l'air : la théorie ondulatoire de la lumière triomphe.

Au moment où Max Planck vient au monde on ne sait encore rien de la structure atomique. Même si les chimistes commencent à utiliser la notion d'atome, cette notion reste vague et est loin de s'imposer à tous. Ce n'est qu'en 1860, au cours du Congrès des Chimistes de Karlsruhe, que les définitions d'atome et de molécules sont adoptées. En physique, les premiers travaux sur ce sujet sont dus à Maxwell, qui fonde la théorie cinétique des gaz en 1860 et à Boltzmann (1867), véritable mentor intellectuel de Planck.

La thermodynamique en 1850

Vers le deuxième principe de la thermodynamique

La thermodynamique étant à l'origine des travaux de Max Planck, nous lui consacrons un paragraphe particulier. En mai 1824 paraît un petit ouvrage de 118 pages intitulé *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, ouvrage tiré à 600 exemplaires aux frais de l'auteur... un certain Sadi Carnot. Sadi Carnot (1796-1832) se montre précoce ; il est reçu à l'École Polytechnique à 16 ans et se passionne rapidement pour l'économie politique et ... la théorie de la chaleur. Son père, Lazare Carnot, est un homme politique célèbre ; chargé en 1793 des questions militaires du Comité de Salut Public, il est surnommé l'« organisateur de la victoire ». C'est également un savant reconnu, auteur d'un *Essai sur les machines en général* (1783) dont le but est de déterminer « le moyen de faire produire aux machines le plus grand effet possible » (ouvrage qui inspi-

ra son fils Sadi). Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1796¹.

Les *Réflexions sur la puissance motrice du feu* constituent véritablement l'acte de naissance de ce qui deviendra la thermodynamique². Bien que les *Réflexions* soient présentées à l'Académie des Sciences très peu de temps après leur parution, et devant un aréopage impressionnant (Arago, Fourier, Laplace, Ampère, Fresnel, Legendre, Poisson, Cauchy, Dulong, Navier,...), il faut attendre dix ans pour que l'ouvrage sorte de l'oubli.

En 1834 en effet, un ingénieur des Mines, Émile Clapeyron (1799-1864) fait paraître dans le *Journal de l'École Polytechnique* son *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur*. Clapeyron met en relief le travail de Carnot et le prolonge. Il écrit :

l'idée qui sert de base à ses recherches me paraît féconde et incontestable. M. S. Carnot arrive à des résultats qui se déduisent sans peine d'une loi plus générale, que je vais chercher à établir.

Il introduit alors son diagramme P, V (diagramme de Clapeyron) dans lequel il dessine le cycle idéal de Carnot. Mais l'article de Clapeyron tombe à son tour dans l'oubli... jusqu'à ce qu'un jeune physicien écossais William Thomson le consulte en 1846. William Thomson (1824-1907), plus connu sous le nom de Lord Kelvin (il sera anobli en 1892), fait l'analyse de la théorie de Carnot sous la forme que Clapeyron lui a donnée ce qui le mène à la notion d'échelle des températures absolues. Ainsi il écrit en 1848 :

La propriété caractéristique de l'échelle que je propose maintenant est que tous les degrés ont la même valeur [...] On peut l'appeler avec raison une échelle absolue, car sa caractéristique est tout à fait indépendante des propriétés physiques d'un corps spécifique.

¹ En septembre 1797, Lazare Carnot est déchu de son titre de membre de l'Institut, c'est Bonaparte qui lui succède à l'Académie des Sciences où il élu fin 1797.

² Le terme sera introduit en 1849 par William Thomson, futur Lord Kelvin.

En février 1850, Rudolf Clausius (1822-1888) entre en scène. Il transmet à l'Académie de Berlin un mémoire intitulé *Sur la force motrice de la chaleur et les lois qui s'en déduisent pour la théorie même de la chaleur* où il indique en introduction :

la recherche la plus importante sur ce sujet est due à S. Carnot, et les idées de cet auteur ont été plus tard exposées analytiquement d'une manière très habile par Clapeyron.

Clausius énonce dans ce mémoire ce qui deviendra le second principe de la thermodynamique et indique notamment :

la chaleur ne peut d'elle-même passer d'un corps plus froid à un corps plus chaud.

Entre 1850 et 1854 Clausius et W. Thomson (de façon indépendante, voire concurrente) poursuivent les travaux de Carnot. À l'impossibilité du mouvement perpétuel de « première espèce » sur laquelle s'est appuyé Carnot, W. Thomson ajoute l'impossibilité d'un mouvement perpétuel de « seconde espèce » *qui consisterait à produire du travail à partir d'une seule source de chaleur*. En 1854 il introduit, sans la nommer, l'entropie, définit une fonction d'état et montre que tous les chemins *réversibles* entre deux états sont caractérisés par la même valeur de $\int dQ/T$, de sorte que *toutes les transformations qui s'effectuent se compensent [et] que leur somme algébrique est nulle* ($\oint dQ/T = 0$). Reste à traiter le cas des transformations irréversibles ; ce sera chose faite en 1865. R. Clausius introduit explicitement l'entropie :

[...] je proposerai donc d'appeler la quantité S l'entropie du corps, d'après le mot grec τροπή, transformation. C'est à dessein que j'ai formé le mot entropie, de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot « énergie » : car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une certaine analogie de dénomination m'a paru utile.

Vers le premier principe de la thermodynamique

Curieusement les concepts qui contiennent en germe le second principe de la thermodynamique sont mis en évidence dans les *Réflexions* de Sadi Carnot en 1824 *avant* que le premier principe de la thermodynamique (i.e. de la conservation de l'énergie) ne soit énoncé.

C'est un peu comme si l'on avait découvert la géométrie non euclidienne avant la géométrie euclidienne !

En 1831 Sadi Carnot énonce l'affirmation suivante :

Partout où il y a destruction de puissance motrice, il y a en même temps production de chaleur [et réciproquement]... La production d'une unité de puissance motrice nécessite la destruction de 2,70 unités de chaleur.

Toutefois ce texte ne sera publié qu'en 1878 par son frère Hippolyte Carnot¹.

Joule (1818-1889) montre expérimentalement en 1841 que lorsqu'un courant d'électricité voltaïque se propage dans un conducteur métallique, la chaleur dégagée dans un laps de temps donné est proportionnelle à la résistance du conducteur multipliée par le carré de l'intensité électrique. Il entreprend ensuite, de 1841 à 1843, une étude systématique des effets calorifiques et, en enfermant une dynamo dans une enceinte cylindrique remplie d'une quantité donnée d'eau, il obtient une première valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur ($J = 4,51$ joules par calorie).

De 1843 à 1847 Joule mesure cet équivalent J par diverses méthodes ; la plus connue consistant à faire tourner une roue à ailettes (à l'aide de la chute de poids) dans un récipient hermétique plein d'eau, dont il mesure l'élévation de température. Le 24 juin 1847, au cours d'un colloque, il donne la valeur de $J = 4,2$ joules par calorie (la valeur actuelle : $4,185 \text{ J}\cdot\text{cal}^{-1}$ est très proche).

Entre temps, dès 1842, le médecin Robert Mayer (1814-1878) conduit des travaux qui le mènent à établir la différence entre les chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant pour un gaz parfait (il s'agit de la fameuse relation de Mayer $C_p - C_v = R$). Il en déduit un équivalent mécanique de la chaleur de $3,7 \text{ J}\cdot\text{cal}^{-1}$.

¹ Notons pour compléter le portrait de la famille Carnot que Hippolyte Carnot sera, au lendemain de la révolution de 1848, ministre de l'instruction publique et des cultes et que son fils, également prénommé Sadi, deviendra en 1887 le 4^e président de la république française sous la 3^e république.

Enfin le 23 juillet 1847, Helmholtz (1821-1894), lit à la Société Berlinoise de Physique un mémoire intitulé *Sur la conservation de la force* dans lequel il énonce le principe de conservation de l'énergie sous une forme qui, en langage moderne, s'exprimerait de la façon suivante : la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique reste constante. Le terme force utilisé ici par Helmholtz signifie énergie, d'après le nom que lui donne W. Thomson en 1850¹.

Ainsi les années 1824-1865 marquent la genèse de la thermodynamique ; Sadi Carnot, Robert Mayer, James Joule, William Thomson (Lord Kelvin), Hermann von Helmholtz et Rudolf Clausius en sont les pères fondateurs. Helmholtz qui est l'un de ceux qui a énoncé le premier principe, sera l'un des professeurs de Max Planck. Quant à Clausius il peut être considéré, grâce à son mémoire de 1865, comme le père de la thermodynamique classique telle qu'elle est encore enseignée. En 1865 Max Planck a sept ans, la thermodynamique est en plein essor et c'est pour cette science nouvelle qu'il va passionner.

¹ Par ailleurs c'est Rankine qui distingue en 1853 l'« énergie potentielle » et l'« énergie actuelle », cette dernière prenant le nom d'« énergie cinétique » dans un article de 1862 de Peter G. Tait et W. Thomson.