

Un inédit de Louis de Broglie:

## Diverses questions de mécanique et de thermodynamique classiques et relativistes

(Lectures Notes in Physics, Springer, Heidelberg 1995)

Introduction de l'ouvrage\*

G. LOCHAK, M. KARATCHENTZEFF, D. FARGUE

Fondation Louis de Broglie, 23, quai de Conti, 75006 Paris

Discrète, mais fidèle, la thermodynamique a accompagné Louis de Broglie toute sa vie. Jeune homme, c'est en emportant le traité de *Thermodynamique* de Planck qu'il part au service militaire. Dix ans plus tard, après des travaux sur les rayons X, il obtient d'importants résultats sur la théorie du corps noir de Planck, qui sont à l'origine de sa thèse. Dans celle-ci, il allait retrouver, indépendamment de Bose et d'Einstein, les lois macroscopiques des gaz et énoncer les principes de la nouvelle statistique comme conséquences de la mécanique ondulatoire.

Mais ce n'est qu'après une vingtaine d'années d'enseignement et avec toute la maturité d'un grand physicien, qu'il écrit le présent ouvrage, prélude à vingt années de recherches qui verront naître la Thermodynamique cachée, percée ultime de sa pensée secrète.

Cette fidélité de plus de soixante-dix ans surprendra peut-être ceux pour qui "thermodynamique" est synonyme de "mal aimée". L'étudiant n'y voit souvent qu'une succession de "recettes" et, devenu ingénieur ou chercheur, il fuira ce cadre ouvert de la physique pour des branches plus formalisées. Pourtant, la thermodynamique fut source d'inspiration pour les plus grands physiciens, à commencer par Planck et Einstein; c'est d'elle que la théorie des quanta est née, et il n'est donc pas étonnant que Louis de Broglie, dès sa jeunesse, en fût imprégné. Pourtant, cherchant

---

\* Ce texte reproduit, avec l'aimable autorisation des Editions Springer, l'Introduction de l'ouvrage de Louis de Broglie, *Diverses questions de mécanique et de thermodynamique classiques et relativistes*, Lectures Notes in Physics, Springer, Heidelberg 1995.

des représentations claires dans l'espace et dans le temps, il critiquait son caractère abstrait et disait [1], à propos de la seconde partie du XIX<sup>e</sup> siècle :

*C'est l'époque où naît l'austère science de la Thermodynamique qui, drapée dans ses symboles abstraits, semble se détourner des représentations intuitives.*

Inversement, il évoquait [2] en ces termes l'avènement de la thermodynamique statistique :

*Ce jour-là le voile s'est déchiré et nous avons enfin aperçu avec soulagement la réalité physique qui se cachait derrière les formes si abstraites de la thermodynamique classique.*

C'est peut-être un hasard si le cours de Louis de Broglie que nous publions commence l'année qui suit la mort de Planck (1947), mais ce n'est pas un hasard si, reprenant des thèmes qui lui étaient familiers au moment de sa thèse, il commence la réflexion qui devait aboutir à son sursaut contre le formalisme de l'École de Copenhague.

Son cours à l'Institut Henri Poincaré s'adressait à un public de chercheurs et d'étudiants avancés. Le sujet changeait tous les ans et avait trait à ses propres recherches, généralement en mécanique quantique. Le cours inédit de 1948-1949, reproduit dans ce livre, est le seul qui parle presque uniquement de physique classique. Mais en réalité, la question de physique quantique posée au chapitre VIII est celle vers laquelle tout le cours était orienté.

Comme cette question n'était encore qu'esquissée, Louis de Broglie ne publia pas son cours. Ce n'est qu'ensuite qu'il développa le sujet et se persuada de son importance. C'est pourquoi il est intéressant de publier ce texte, non seulement pour l'ensemble des sujets traités, mais aussi parce qu'il est à l'origine d'une voie de recherche que Louis de Broglie a poursuivie et sur laquelle il dit ici des choses qu'il ne redira pas plus tard.

On peut faire deux lectures de ce livre selon qu'on se limite aux sujets classiques ou qu'on s'intéresse au but poursuivi par l'auteur.

Les questions de mécanique analytique, de relativité, de thermodynamique et d'électromagnétisme sont par elles-mêmes très intéressantes, et l'exposé porte la griffe d'un grand théoricien.

Simple, clair, rapide sur les points élémentaires, qu'il traite sur un ton d'évidence, Louis de Broglie approfondit les points importants dont

il aura besoin, avec des remarques inédites et des résultats un peu oubliés. Il jette des ponts entre différents domaines, comme le schéma canonique de Helmholtz, la thermodynamique relativiste ou la formulation lagrangienne de l'énergie utilisable. Il en donne des applications à divers problèmes, comme la loi du corps noir, la formule de Boltzmann sur les mouvements périodiques ou l'énergie mutuelle des aimants et des courants. A propos de cette question, il montre que, de l'intérieur même de la physique classique, on peut apercevoir que son cadre est trop étroit et qu'il y manque des éléments : les quanta et le spin.

Tout lecteur, quel que soit son niveau, trouvera ici des choses à apprendre bien que certaines soient connues depuis longtemps et portent de grandes signatures, comme celles de Planck, Einstein et Laue.

Mais c'est l'autre lecture du livre qui est la plus importante, celle qui concerne les analogies entre la thermodynamique et la mécanique et leur application possible à la théorie des quanta. Elles ont été très étudiées au siècle dernier, principalement par des physiciens allemands et il faut rappeler, à ce sujet, que Louis de Broglie, bien qu'imprégné des idées et des méthodes de la science française, était très influencé par la physique allemande : en premier lieu par Planck, Boltzmann et Einstein, mais aussi par Jacobi, Kirchhoff, Helmholtz ou Drude, qu'il lisait souvent dans le texte original.

Les théories en question sont fondées sur des rapprochements entre certaines grandeurs mécaniques et thermodynamiques, notamment *l'action et l'entropie, la fréquence et la température*. Ce problème, jadis posé par Clausius et Szily, fut repris sous différentes formes par Helmholtz, Boltzmann, J.J. Thomson et Planck. Il eut d'importantes applications qu'on verra dans ce livre, mais sans aboutir à une grande théorie. Celle-ci aurait dû être l'interprétation mécanique de la thermodynamique, mais le projet fut abandonné après le succès de l'interprétation statistique. Cependant, ces analogies, belles et énigmatiques, demeurent et continuent de mériter l'attention: comme le dit Louis de Broglie dans sa leçon inaugurale, elles peuvent avoir *une portée très profonde et [...] servir utilement de guide aux théoriciens pour édifier des théories nouvelles*.

Il parlait d'or, pour avoir lui-même découvert les ondes de matière à partir de l'analogie entre la mécanique et l'optique. Il voulait renouveler cet exploit avec la thermodynamique et la mécanique en réunissant, en un sommet unique, les principes de Fermat, de Maupertuis et de

Carnot-Clausius, autrement dit, les principes de plus court chemin optique, de moindre action et de maximum d'entropie. De même qu'il avait prévu les propriétés ondulatoires de la matière en s'écartant du sommet Fermat-Maupertuis en direction de la théorie des ondes, il espérait qu'en s'écartant du sommet Fermat-Maupertuis-Carnot en direction de la thermodynamique, il parviendrait à une description des transitions quantiques comme processus dynamiques irréversibles. Cette dernière idée, qui n'apparaît pas dans ce livre, a été élaborée plus tard avec ses collaborateurs (Fer, Lochak et Andrade e Silva) et rejoignait une idée de jeunesse car, dès sa thèse, il savait qu'en expliquant les états quantiques par une condition de stabilité sur l'onde, il laissait inexploré le problème du passage d'un état quantique à un autre.

Pour comprendre la démarche de Louis de Broglie, il faut se rappeler celle qu'il avait adoptée dans les années vingt. Il était parti de l'analogie entre les principes de Fermat et de moindre action, ignorant qu'elle avait déjà été remarquée par Hamilton. Mais le rapprochement entre la mécanique et l'optique n'est pas viable en mécanique classique. Certes, Hamilton avait compris qu'il fallait que la vitesse de phase de l'onde, qui figure chez Fermat, soit proportionnelle à *l'inverse* de la vitesse du corpuscule, qui figure dans le principe de moindre action : c'est la formule qu'allait trouver Louis de Broglie, mais elle n'est vraie qu'en relativité car en mécanique classique, elle est incompatible avec la loi des quanta [3]. La relativité a donc joué un rôle aussi fondamental que les quanta, comme le montre l'idée de Louis de Broglie d'identifier, pour tout élément de matière, les expressions de l'énergie données par Planck et Einstein [4] :

$$m c^2 = h \nu \quad (1)$$

Pour pouvoir appliquer la loi de Planck, il supposa que le corpuscule est le siège d'un phénomène périodique dont la fréquence est définie dans le système propre par l'égalité :

$$m_0 c^2 = h \nu_0 \quad (2)$$

Mais il s'aperçut qu'il était impossible de trouver une forme telle que (1), valable dans tous les systèmes, car la fréquence interne du corpuscule est une fréquence cyclique et se transforme comme une fréquence d'horloge :

$$\nu_c = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (3)$$

donc à l'inverse d'une masse. Cette fréquence ne peut donc pas figurer dans (1); mais Louis de Broglie remarqua alors qu'une *fréquence ondulatoire* se transforme comme une masse et que c'est elle qui doit figurer dans la formule, les deux fréquences, cyclique et ondulatoire, étant égales dans le système propre à la valeur trouvée en (2). Et il démontra que, malgré cette différence de fréquences, le mouvement cyclique interne reste en phase, dans tout système de référence, avec la vibration de l'onde au point où se trouve le corpuscule.

La mécanique ondulatoire est donc née d'une vieille analogie entre l'optique et la mécanique, *mise sous forme covariante et associée aux quanta*. L'idée du chapitre VIII est de reprendre cette démarche avec la mécanique et la thermodynamique pour redonner vie aux idées de Helmholtz, Boltzmann et Planck en les exprimant en langage relativiste et en les rattachant aux quanta. Louis de Broglie dit prudemment : *Il est assez difficile de dire où cette voie pourrait conduire, mais il est intéressant d'en connaître l'existence*. Par la suite, il se persuada de cette idée au point de la considérer comme faisant partie intégrante de la mécanique ondulatoire.

Nous dirons maintenant quelques mots sur les travaux ultérieurs de Louis de Broglie et de ses élèves en renvoyant, pour l'essentiel, à la bibliographie donnée en fin de préface; nous insisterons quelque peu sur la variance relativiste de la chaleur et de la température, pour des raisons que le lecteur comprendra tout de suite.

\* \* \*

Au chapitre VIII, Louis de Broglie donne une forme relativiste à la formule de Boltzmann sur les mouvements périodiques et définit la température d'une particule à partir de sa fréquence cyclique interne en posant l'égalité suivante (où  $k$  est la constante de Boltzmann et  $h$  la constante de Planck) :

$$kT = h\nu_c \quad (4)$$

Cette relation est covariante car la variance (3) d'une fréquence cyclique est la même que celle d'une température, qui est établie au chapitre VII. On montre, en effet, que :

$$Q = Q_0\sqrt{1 - \beta^2} \quad ; \quad T = T_0\sqrt{1 - \beta^2} \quad (5)$$

La chaleur et la température ont même variance car  $dQ = TdS$ , et Planck a montré que l'entropie est un invariant relativiste (voir chapitre VII). Les formules (5) ont été établies au début de la relativité par Planck et par Einstein, puis développées dans le traité de Laue [5], [6], [7].

L'hypothèse de Louis de Broglie, qui part d'une forme relativiste de la formule de Boltzmann, est donc tributaire de la variance (5) de la chaleur et de la température. Or, à sa grande surprise, quand il s'est remis à travailler sur ce sujet, dans les années soixante, cette loi lui fut contestée par plusieurs auteurs et une polémique s'en est suivie, qui lui coûta beaucoup d'efforts et dont on trouvera l'écho dans la bibliographie donnée en fin de préface. Cela mérite quelques précisions.

La démonstration que Louis de Broglie donne au chapitre VII est extraite du grand traité de Max von Laue [7], mais il en existe d'autres, dont une de Laue, basée sur l'effet Joule et dont nous reparlerons. L'une des plus simples est celle donnée par Einstein dans son fameux article de 1907, celui dans lequel il pose pour la première fois le problème de la gravitation [6]. En développant divers problèmes de dynamique, il calcule l'énergie et l'impulsion d'un corps en tenant compte de ses variations de volume et il trouve (en simplifiant un peu ses formules) :

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_0}{\sqrt{1-\beta^2}} + \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^2}} p_0 V_0 \\ G &= \left( \frac{E_0 + p_0 V_0}{c^2} \right) \frac{v}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

$E_0$  est l'énergie au repos (somme de l'énergie de masse propre et du travail reçu de l'extérieur),  $v = \beta c$  la vitesse,  $p_0$  la pression et  $V_0$  le volume dans le système propre. Einstein définit la chaleur comme étant l'énergie totale moins le travail des forces extérieures et des forces d'inertie :

$$dQ = dE + p dV - v dG \quad (7)$$

et il introduit les formules (6) dans cette égalité en tenant compte de la contraction du volume et de l'invariance de la pression (qu'il a précédemment démontrée), ce qui lui donne aussitôt :

$$dQ = (dE_0 + p_0 dV_0) \sqrt{1-\beta^2} \quad \text{d'où} \quad dQ = dQ_0 \sqrt{1-\beta^2} \quad (8)$$

De l'invariance de l'entropie, il déduit celle de la température, comme nous le disions plus haut.

Il faut ajouter que Planck élaborait, à la même époque, la dynamique relativiste, en plein accord avec les résultats d'Einstein, mais il éprouva le besoin d'une vérification. Pour cela, il demanda à l'un de ses élèves, Karl von Mosengeil, d'appliquer ces lois au rayonnement noir [8]; Louis de Broglie le cite au chapitre VII. Mais Laue fait dans son livre une importante remarque, à savoir que Mosengeil a montré que : **La dynamique du rayonnement du corps noir peut se déduire de l'électrodynamique du vide sans utiliser explicitement le principe de relativité.** *Ce travail, poursuit Laue, joue ainsi un rôle dans l'histoire de la science parce que Planck avait besoin, pour fonder la dynamique des corps en mouvement, d'un corps d'épreuve complètement connu dynamiquement. Il a pu utiliser pour cela, en se basant sur la thèse de Mosengeil, le rayonnement du corps noir.* [7]

Cette vérification des raisonnements relativistes à partir de la théorie de Maxwell, laisse, dans les formules (5), peu de place à l'erreur. Malgré cela, on peut les trouver choquantes car on est tenté de dire : *la chaleur étant une forme de l'énergie, pourquoi n'aurait-elle pas la même variance :*

$$Q = \frac{Q_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad ? \quad (9)$$

Remarquons d'abord qu'on pourrait en dire autant de l'énergie cinétique, or on sait que c'est faux. En réalité, seule *l'énergie totale* se transforme suivant la loi (9) et les décompositions en *énergie cinétique + énergie potentielle*, ou *travail + chaleur*, ne sont pas covariantes car les différentes formes de l'énergie se transforment différemment. Laue, dans son traité, commence par établir la loi (5) sur la chaleur produite par effet Joule mais, sentant (il le dit lui-même) qu'elle peut paraître bizarre, il confirme son résultat par la démonstration plus générale que Louis de Broglie reproduit au chapitre VII. Mal lui en prit, car c'est précisément cette démonstration qui mit le feu aux poudres ! Bien que le raisonnement de Laue soit, en fait, irréprochable et qu'il soit confirmé comme nous venons de le voir, il est intéressant d'y ajouter un argument qualitatif très simple qui éclaire en même temps le problème de l'effet Joule.

Prenons un gaz enfermé dans une enceinte immobile dans un référentiel  $R_0$ . Il contient une certaine quantité de chaleur  $Q_0$  qui correspond à l'énergie d'agitation moléculaire. Soient  $(v_{kx}, v_{ky}, v_{kz})$  les composantes de la vitesse de la  $k$ -ème molécule dans le référentiel  $R_0$  et observons maintenant le gaz à partir d'un référentiel  $R$  par rapport auquel

l'enceinte est animée d'une vitesse  $v$  (par exemple le long de l'axe des  $z$ ). Dans le nouveau référentiel, les vitesses ( $v'_{kx}, v'_{ky}, v'_{kz}$ ) de la  $k$ -ème molécule seront :

$$v'_{kx} = \frac{v_{kx}\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta\beta_{kz}} \quad ; \quad v'_{ky} = \frac{v_{ky}\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta\beta_{kz}} \quad ; \quad v'_{kz} = \frac{v_{kz}+v}{1+\beta\beta_{kz}} \quad (10)$$

avec :  $\beta = \frac{v}{c}$  ;  $\beta_{kz} = \frac{v_{kz}}{c}$

On voit donc que, si la vitesse relative des deux référentiels tend vers la vitesse de la lumière, les vitesses transversales  $v'_{kx}$  et  $v'_{ky}$  de la molécule tendent vers zéro dans le référentiel  $R$ , tandis que la vitesse longitudinale  $v'_{kz}$  tend vers la vitesse de la lumière. Autrement dit, le mouvement de *toutes les molécules* se réduit à une même translation uniforme et l'énergie totale du gaz se réduit à son énergie cinétique de translation : dans le référentiel  $R$ , on ne voit plus de désordre. Donc, si un observateur du référentiel  $R_0$  voit une certaine quantité de chaleur  $Q_0$ , un observateur dont la vitesse par rapport à lui tend vers la vitesse de la lumière, voit une quantité de chaleur  $Q$  évanouissante.

Cette conclusion est en accord avec la loi (5), mais elle condamne une loi qui serait du type (9). On peut rapprocher cela du calcul de la chaleur de Joule que Laue donne dans son traité. Il se base sur le fait que, dans un conducteur, les trajectoires électroniques font un angle avec les lignes de courant (en raison des chocs), si bien que la force électrique d'univers n'est pas orthogonale aux lignes d'univers des électrons comme elle le serait dans le vide, ce qui se traduit par un travail égal à la chaleur de Joule. Et le calcul de Laue donne, pour cette chaleur, la loi (5). Mais on comprend pourquoi cette chaleur diminue pour l'observateur en mouvement : en effet, celui-ci tend à ne plus voir qu'un entraînement global qui aligne les mouvements et écrase l'angle entre les trajectoires, qui était responsable du phénomène.

Louis de Broglie a mainte fois discuté ces problèmes. Il serait long de tout reproduire et nous renverrons à la bibliographie. Nous ne donnerons qu'une seule démonstration, qu'il n'a pas publiée lui-même mais qui se trouve dans la contribution de l'un d'entre nous (G.L.) au livre jubilaire de 1973 [9]. Elle est intéressante car elle est reliée à ses idées sur la fréquence d'horloge. Il considère, en effet, la chaleur emmagasinée dans un cristal, qui se ramène à une énergie de vibration. Voici son texte:

*Considérons un corps contenant un grand nombre  $N$  d'oscillateurs harmoniques qui sont au repos dans le système propre  $R_0$  du corps et*



ont tous la même fréquence propre  $\nu_0$ . Dans  $R_0$ , chaque oscillateur a une énergie de la forme  $n h \nu_0$  où  $n$  est un nombre entier ou demi-entier, peu importe car il nous suffit que  $n$  soit un nombre invariant. L'énergie du corps dans  $R_0$  est :

$$W_0 = M_0 c^2 = \sum_{k=1}^N n_k h \nu_0 \quad (11)$$

et cette expression est valable même si les oscillateurs échangent constamment entre eux des quanta d'énergie  $h \nu_0$ . On peut dire que le corps contient uniquement une énergie d'agitation interne sans mouvement d'ensemble et l'on peut assimiler  $W_0$  à une chaleur interne  $Q_0$ . Mais envisageons maintenant le même corps dans un système de référence  $R$  où il est en mouvement avec la vitesse  $\beta c$ . Chaque oscillateur constitue une petite horloge dont la fréquence dans  $R$  est [voir formule (3)], en vertu du ralentissement relativiste des horloges en mouvement, et l'énergie contenue par le corps dans son intérieur sera, dans  $R$ , puisque  $N$  et  $n_k$  sont des invariants :

$$W_i = \sum_{k=1}^N n_k h \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} = M_0 c^2 \sqrt{1 - \beta^2} = Q_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (12)$$

Mais l'énergie globale du corps dans  $R$  est :

$$W = \frac{W_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{M_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{Q_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (13)$$

Les énergies  $W$  et  $W_i$  ne sont pas égales parce que l'énergie totale  $W$  est la somme de l'énergie interne  $W_i$  et de l'énergie de translation globale  $E_t$  dans  $R$ , de sorte que l'on a :

$$E_t = W - W_i = \frac{M_0 v^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (14)$$

d'où :

$$W = W_i + E_t = Q_0 \sqrt{1 - \beta^2} + \frac{M_0 v^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (15)$$

On retrouve ainsi une formule de thermodynamique relativiste que j'ai démontrée par de nombreux raisonnements. Il en résulte que, dans  $R$ , l'énergie de chaleur transportée par le corps dans son intérieur est :

$$Q = Q_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (16)$$

L'intérêt de ce mode de démonstration de la formule (15) est d'abord qu'aucun des points de la démonstration ne peut, me semble-t-il, être contesté et aussi qu'elle met bien en évidence la relation étroite qui existe entre la formule de transformation relativiste de la chaleur et le ralentissement des horloges en mouvement. [9]

Faisons deux remarques :

1) Louis de Broglie donnait à la formule (15) le nom de *formule de Planck-Laue*. Elle joue un rôle important en thermodynamique relativiste. On remarquera que le second terme de (15), qui est de nature cinétique, n'a pas l'expression relativiste d'une énergie cinétique : on l'appelle, pour cela, la *pseudo-énergie cinétique*.

2) Regardons maintenant la somme :

$$A_0 = \sum_k n_k h \quad (17)$$

qui figure dans (11). Elle est égale à l'action maupertuisienne de l'assemblée d'oscillateurs dans le système propre car c'est la somme des valeurs quantifiées des intégrales d'action des différents oscillateurs. Si les  $n_k$  sont grands, la chaleur  $Q_0 = W_0$  définie en (11) sera grande également. Dans ce cas, un échange, avec l'extérieur, d'un petit nombre  $\delta n_k$  de quanta d'énergie aura le sens d'une variation infinitésimale de l'action :

$$\delta A_0 = \sum_k \delta n_k h \quad (18)$$

En vertu de (11), cette variation de l'action définira, dans le référentiel propre, un échange d'une quantité infinitésimale de chaleur avec l'extérieur :

$$\delta Q_0 = \nu_0 \delta A_0 \quad (19)$$

Or, la fréquence et la chaleur obéissant à la même loi de variance relativiste – respectivement (3) et (16) – nous pouvons conserver la variation

de l'action dans le système propre en tant que quantité invariante relativiste et écrire (19) sous la forme suivante qui sera valable dans tous les référentiels et devient donc une loi covariante :

$$\delta Q = \nu_c \delta A_0 \quad (20)$$

Il faut remarquer que, dans cette formule,  $\delta Q$  et  $\nu_c$  sont écrits dans un référentiel quelconque, tandis que la valeur de  $\delta A_0$  doit être prise dans le système propre car l'action maupertuisienne n'est pas un invariant relativiste. Louis de Broglie a proposé de la remplacer par l'action hamiltonienne qui est invariante relativiste, mais cela soulève une difficulté car, contrairement à l'action maupertuisienne, l'action hamiltonienne n'est pas un invariant adiabatique. Or, la formule (19) est l'analogue quantique de la formule de Boltzmann pour les mouvements périodiques, qu'on verra au chapitre VI (nous avons donc montré ici que les deux formules se rejoignent en vertu du principe de correspondance de Bohr). La forme relativiste (20) a été proposée par Louis de Broglie en 1945 et se trouve plus loin, au chapitre VIII. Si nous mettons en parallèle la formule (20) avec la formule :

$$\delta Q = T \delta S \quad (21)$$

on voit aussitôt apparaître l'analogie :

Température – Fréquence ; Entropie – Action.

Cela suppose que l'action soit invariante adiabatique, comme l'entropie. C'est ce que prouve la formule de Boltzmann, mais seulement pour l'action maupertuisienne et non pour l'action hamiltonienne. Il reste donc un problème de mise en accord entre l'invariance relativiste et l'invariance adiabatique.

L'idée de Louis de Broglie fut d'appliquer ces formules à une seule particule, d'où le nom de *thermodynamique de la particule isolée* qu'il donna à sa théorie. On peut se demander comment on peut attribuer des propriétés thermodynamiques à une seule particule, ce qui heurte nos conceptions sur l'interprétation des grandeurs thermodynamiques en tant que grandeurs moyennes. On peut répondre de deux façons différentes. Ou bien on tourne le dos à ces interprétations, on revient à l'interprétation purement mécanique de la thermodynamique, au moins en ce qui concerne la structure interne des particules auxquelles on attribue ces grandeurs a priori : c'est ce que Louis de Broglie faisait implicitement au début ; ou alors, on suppose que la thermodynamique

provient d'un milieu extérieur caché, sorte d'éther subquantique qui serait responsable des propriétés quantiques que nous connaissons : c'est ce que fit Louis de Broglie plus tard, d'où le nom de *thermodynamique cachée* des particules qu'il employait également et le terme de thermostat caché qu'il donnait à cet éther.

En tout état de cause, il faut relier ces idées aux formes modernes de la mécanique quantique (car jusqu'ici, tout cela reste encore dans le cadre de la première théorie des quanta), et il faut tirer des conséquences physiques qui sortent du cadre de la dynamique hamiltonienne et de la thermodynamique des états d'équilibre pour décrire des phénomènes irréversibles tels que les transitions quantiques. Ce fut l'objet des travaux de Louis de Broglie et de ses élèves. Malheureusement, malgré des idées intéressantes, ces travaux n'ont pas su rendre opératoire cette théorie qui est, pour le moment, plus descriptive que prédictive. Est-ce par maladresse des auteurs ? Ou bien est-ce par manque d'un élément important, de même que la périodicité manqua aux ondes de Huygens jusqu'aux travaux de Fresnel ? Nous l'ignorons, mais il reste, dans l'esprit de ceux qui ont travaillé à cette théorie de Louis de Broglie, une certaine impression d'harmonie et de logique interne qui suggère qu'elle devrait être vraie. C'est, en tout cas, ce que pensait Louis de Broglie qui, à la fin de sa vie, considérait la thermodynamique cachée comme faisant partie intégrante de la mécanique ondulatoire. L'avenir dira s'il avait raison.

## Références

- [1] L. de Broglie, *Savants et découvertes*, Albin-Michel, Paris (1951).
- [2] L. de Broglie, *Continu et discontinu en physique moderne*, Albin-Michel, Paris (1941).
- [3] R. Dutheil et G. Lochak, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **16**, 109 (1991).
- [4] L. de Broglie, *Recherches sur la théorie des quanta*, Thèse, 1924, Paris ; réédition Fondation Louis de Broglie, Paris, 1992.
- [5] M. Planck, *Sitzungber. preuss. Akad. Wiss.*, XXIX (1907) ; *Phys. Zeitschr.*, **9**, 828 (1908) ; *Verh. d. D. Phys. Ges.*, **6**, 728 (1908) ; *Ann. d. Phys.*, **26**, 1 (1908) ; *Phys. Zeitschr.* **11**, 922 (1910).
- [6] A. Einstein, *Jahrb. d. Radioaktivität u. Elektronik*, **4**, 441 (1907).
- [7] M. von Laue, *Die Relativitätstheorie*, Vieweg, Braunschweig (1919) ; traduction française : *La théorie de la relativité*, Gauthier-Villars, t. I, 1922, t. II, Paris (1926).
- [8] K. von Mosengeil, *Dissertation*, Berlin, 1906 ; *Ann. d. Phys.*, **22**, 867 (1907).

- [9] G. Lochak, in *Louis de Broglie, sa conception du monde physique*, Gauthier-Villars, Paris (1973).
- [10] L. de Broglie, *Remarques sur la formule de Boltzmann relative aux systèmes périodiques*, C. R. Acad. Sci., **223**, 298 (1946).
- [11] L. de Broglie, *Sur la variance relativiste de la température*, Cahiers de physique, 1 (1948).
- [12] L. de Broglie, *Energie libre et fonction de Lagrange. Application à l'électrodynamique et à l'interaction entre aimants et courants permanents*, Portugaliae Physica, **III**, 1 (1949).
- [13] L. de Broglie, *La thermodynamique de la particule isolée*, C. R. Acad. Sci., **253**, 1078 (1961).
- [14] L. de Broglie, *Nouvelle présentation de la thermodynamique de la particule isolée*, C. R. Acad. Sci., **25**, 807 (1962).
- [15] J. Andrade e Silva et G. Lochak, *La thermodynamique de la particule isolée et la description des transitions quantiques*, C. R. Acad. Sci., **254**, 4260 (1962).
- [16] G. Lochak, *Sur le second principe de la thermodynamique et la stabilité asymptotique au sens de Liapounov*, C. R. Acad. Sci., **254**, 4436 (1962).
- [17] F. Fer, *Le théorème de Boltzmann sur les mouvements périodiques*, J. Phys. Rad., **23**, 973 (1962).
- [18] L. de Broglie, *Quelques conséquences de la thermodynamique de la particule isolée*, C. R. Acad. Sci., **255**, 1052 (1962).
- [19] G. Lochak, *Sur la théorie non linéaire des transitions quantiques*, C. R. Acad. Sci., **256**, 3601 (1963).
- [20] L. de Broglie, *Sur l'introduction de l'énergie libre dans la thermodynamique cachée des particules*, C. R. Acad. Sci., **257**, 1430 (1963).
- [21] L. de Broglie, *Sur la théorie des foyers cinétiques dans la thermodynamique de la particule isolée*, C. R. Acad. Sci., **257**, 1822 (1963).
- [22] L. de Broglie, *La thermodynamique cachée des particules*, Ann. Inst. Henri Poincaré, **I**, n°1, 1 (1964).
- [23] L. de Broglie, *La thermodynamique de la particule isolée (ou thermodynamique cachée des particules)*, Gauthier-Villars, Paris (1964).
- [24] L. de Broglie, *Sur la transformation relativiste de la quantité de chaleur et de la température et thermodynamique de la particule isolée*, C. R. Acad. Sci., **262**, 1235 (1966).
- [25] L. de Broglie, *Sur la formule  $Q = Q_0\sqrt{1 - \beta^2}$  et les bases de la mécanique ondulatoire*, C. R. Acad. Sci., **257**, 1822 (1963).
- [26] L. de Broglie, *Sur la dynamique des corps à masse propre variable et la formule de transformation relativiste de la chaleur*, C.R. Acad. Sci., **264**, 1173 (1967).
- [27] L. de Broglie, *Sur l'équation  $\Delta W = \Delta Q + \Delta L$  en thermodynamique relativiste*, C. R. Acad. Sci., **265**, 437 (1967).
- [28] L. de Broglie, *Sur les discussions relatives à la formule  $Q = Q_0\sqrt{1 - \beta^2}$  et la définition de la pression en thermodynamique relativiste*, C. R. Acad. Sci., **265**, 589 (1967).
- [29] L. de Broglie, *Thermodynamique relativiste et mécanique ondulatoire*, Ann. Inst. Henri Poincaré, **IX**, n°2, 89 (1968).

- [30] L. de Broglie, *La thermodynamique relativiste et la thermodynamique cachée des particules*, Int. J. Theor. Phys., **I**, n°1, 1 (1968).
- [31] P.Y.Z. Chu, *Lagrange function, de Broglie's model and relativity*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **18**, 25 (1993).
- [32] G. Lochak, *About a recent paper of P.Y.Z. Chu, an old formula of Planck and Laue, and de Broglie's hidden thermodynamics*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **18**, 345 (1993).
- [33] G. Jeverdan, *Sur une idée de Louis de Broglie concernant la relation entre l'action et l'entropie en microphysique*, in *Courants, Amers, Ecueils en Microphysique* (p. 205) Bibliothèque des Annales de la Fondation Louis de Broglie, Paris (1993).

Travaux historiques récents sur les analogies entre la mécanique et le thermodynamique :

- [34] G. Bierhalter, *Von L. Boltzmann bis J.J. Thomson : die Versuche einer mechanischen Grundlegung der Thermodynamik (1866-1890)*, Archives for History of Exact Sciences, **44** (1), 25, (1992).
- [35] G. Bierhalter, *Das Hamiltonsche Prinzip und J.J. Thomsons Versuch einer mechanischen Grundlegung der Thermodynamik*, Centaurus, **36**, 102 (1993).