

Notes prises par Louis de Broglie lors des cours de Paul Langevin au Collège de France sur la théorie des quanta (1ère partie)

CHIEKO KOJIMA

Nihon University, Tokyo, Japon

À partir de 1991, peu après la mort de Louis de Broglie, ses papiers et sa bibliothèque commencèrent d'être classés et rangés aux Archives de l'Académie des Sciences et dans la Bibliothèque de la Fondation Louis de Broglie. Ce travail fut achevé en 1993 [1]. Parmi ses manuscrits, on trouve les notes prises par de Broglie au cours de Langevin sur la théorie des quanta. Selon ces notes, Langevin donna une série de cours pendant les mois de mai et juin 1919 et pendant quelques mois, de 1924 à 1927. Comme il y avait peu d'occasions d'étudier la théorie des quanta en France [2], on peut considérer ces notes comme des documents importants pour connaître l'état de l'enseignement de la théorie des quanta à cette époque. Dans cette première partie, nous examinerons d'abord le contenu du cours de 1919, puis son influence sur de Broglie et la gestation de ses idées sur l'onde de matière. Les cours de 1924 à 1927 sont laissés pour la deuxième partie, dans laquelle je tenterai un commentaire historique sur son contenu et sur le rapport entre le cours de Langevin et la mécanique ondulatoire, ainsi que la mécanique des matrices.

1. La valeur des notes comme document historique.

L'existence du cours de Langevin est connue depuis longtemps et est mentionnée dans plusieurs livres, en particulier dans sa biographie [3]. Mais le contenu n'en était pas connu concrètement car Langevin ne le publia pas. Récemment, en se fondant sur les notes prises par de Broglie, une étude rapporte en bref que Langevin était bien informé des progrès de la théorie des quanta [4]. Cependant, on dit souvent que la France était isolée des centres de recherches sur la théorie des quanta (Danemark et Allemagne) et que l'étude des quanta y restait stagnante

[5]. On ne connaît, en général, pour toutes recherches sur la théorie des quanta effectuées par des Français, que celles de de Broglie et de L. Brillouin. Mais, outre ceux-ci, d'autres physiciens français s'y intéressaient, tels E. Bloch, L. Bloch, J. Becquerel, E. Bauer, M. Brillouin, M. de Broglie et Langevin, bien sûr, qui fut le premier d'entre eux à faire un cours sur la théorie des quanta [6]. Il est du reste remarquable que ce cours fût donné sitôt après la guerre. Etant donné que, pendant la guerre, on ne pouvait avoir directement aucune information étrangère, du moins par l'intermédiaire des revues françaises [7], les étudiants et les chercheurs français devaient attendre avec impatience le cours de Langevin qui fréquentait beaucoup de physiciens étrangers. Ils en ont donc sans aucun doute subi l'influence [8].

2. Le contenu du cours.

Les notes prises en 1919 ont 17 pages, intitulées *Résumé du cours de M. Langevin mai juin 1919*. Il n'y a pas de dates, mais ces notes ont dû être prises par de Broglie pendant deux mois. Nous en donnons ci-dessous les points essentiels, mais on ne saurait évidemment affirmer qu'il s'agit de la totalité du cours de Langevin car il est possible que de Broglie ait sélectionné les sujets qui l'intéressaient. Nous ne prétendons pas parler de toute la substance du cours de Langevin, mais seulement du reflet qu'en donnent les notes prises par de Broglie. Voici donc les principaux thèmes:

Théorie de Bohr:

La théorie de Bohr en 1913 [9] s'explique simplement. Quand l'atome se trouve dans un état quantique, seule une suite discontinue de valeurs de l'énergie d'un électron est possible, et selon les calculs de la différence d'énergie en cas de transition quantique, on obtient la loi de Balmer.

Théorie de Sommerfeld:

D'abord, la série de Balmer est acquise dans le cas de l'ellipse keplerienne par deux conditions de quantification, celles de la direction radiale et azimutale, puis la structure fine s'exprime en introduisant la relativité. Cette teneur correspond, au fond, à l'article de Sommerfeld de la fin de 1915 [10]. Après avoir critiqué les calculs de Sommerfeld avec lesquels le choix des variables et des limites d'intégration est insuffisant,

Langevin juge nécessaire d'introduire la fonction de Jacobi comme les travaux de P.S. Epstein [11] et K. Schwarzshild [12].

Théorie et fonction de Jacobi:

Eu égard aux études d'Epstein et de Schwalschild en 1916, qui établissent le rapport entre la condition de Sommerfeld et la fonction d'Hamilton-Jacobi, Langevin considère la condition de quantification comme suit: si la fonction de Jacobi se présente sous la forme d'une somme de fonctions de chacune des variables indépendantes, on doit écrire que l'intégrale est un multiple de la constante de Planck. Dans ce cas-là, il est nécessaire que l'équation d'Hamilton-Jacobi soit sous une forme particulière, ce qu'on appelle des variables séparables, pourtant Einstein sut mettre la théorie sous une forme plus générale en 1917 [13]. Langevin souligne que la condition générale d'Einstein $\int \sum_i p_i dq_i = nh$ est donc très satisfaisante puisqu'elle ne dépend pas du choix des variables.

Phénomène de Zeeman:

Etant tirée de l'équation d'une particule électrique dans un champ magnétique, la fonction d'Hamilton se transforme en variables séparables de r, θ, ϕ , en utilisant les coordonnées polaires; s'obtiennent trois conditions de quantification d'où l'effet Zeeman ordinaire s'explique. C'est un procédé de quantification spatiale qui ne diffère pas essentiellement de celui de Debye en 1916 [14].

Explication des cas de dégénérescence:

Dans le cas de dégénérescence, la trajectoire fermée a un nombre de dimensions moindre que celui des domaines de la fonction de Jacobi; alors si un système à f degrés de liberté est dégénéré d'ordre s , on ne doit avoir que $f-s$ conditions de quantification. Langevin considère qu'il faut faire abstraction de l'appareil analytique employé et chercher à serrer de plus près la réalité physique pour élucider les cas de dégénérescence.

Hypothèse adiabatique:

A propos de l'hypothèse adiabatique de P. Ehrenfest, Langevin dit que, pendant une transformation adiabatique, la trajectoire se déforme lentement et que si, au début de l'opération, la trajectoire était stable, elle le sera encore à la fin [15]. Il montre cette propriété pour le pendule. En modifiant très lentement la longueur du fil et l'accélération de la

pesanteur, on ne change pas le rapport entre l'énergie E et la fréquence du pendule ν , c'est à dire E/ν est un invariant adiabatique [16]. Puisqu'il utilise le mot "hypothèse adiabatique" [17], Langevin semble se référer à l'article d'Ehrenfest de 1916 [18], mais il n'en parle pas en détail.

Les sujets que Langevin traita se conforment principalement aux recherches jusqu'en 1917, et roulent sur les problèmes de la stabilité des états quantiques, notamment les études analytiques sur les conditions de quantification pour définir les niveaux quantiques, l'hypothèse adiabatique en tant que manière de trouver les conditions de quantification dans un système modifié, la théorie de la structure fine et l'effet Zeeman. Mais Langevin ne dit rien sur l'idée du principe de correspondance de Bohr [19], ainsi que sur les travaux qui concernent les transitions quantiques [20]. Sur ces points, le cours de Langevin ne contient pas toutes les recherches de cette époque sur la théorie des quanta, mais on ne saurait lui reprocher son ignorance de certaines informations, parce que même si les études sur le principe de correspondance et les transitions quantiques finirent par contribuer énormément au développement de la théorie des quanta, elles n'étaient encore connues que d'une minorité autour de Bohr. Cela étant, on peut dire que, étant donné les conditions historiques, le cours de Langevin était une riche source d'informations sur la théorie des quanta tout de suite après la première guerre mondiale. Toutefois, une question demeure: Langevin ne parle pas des recherches d'Einstein concernant la nature du rayonnement [21]. Or, dans l'article intitulé *Quelques récents progrès de la physique*, écrit par L. Bloch en 1918 [22], la note d'Einstein de 1917 sur le rayonnement [23] est citée en référence. Comme Langevin avait lu cet article de Bloch, il devait nécessairement connaître celui d'Einstein [24]. Quant aux autres travaux d'Einstein, également, on n'imagine pas qu'ils eussent échappé à Langevin qui aurait dû les remarquer, étant un familier de l'auteur. Il me paraît probable que les recherches d'Einstein sur la nature du rayonnement étaient inacceptables pour Langevin, comme pour la plupart des physiciens, et que c'est la raison pour laquelle il ne les traita pas dans son cours.

3. L'influence sur de Broglie.

(i) À propos de l'hypothèse des quanta de lumière.

La conception de l'onde matérielle de de Broglie en 1923 [25] est née du problème du dualisme de la lumière. Il est bien connu que de Broglie acceptait l'hypothèse des quanta de lumière, ce qui n'était

le cas de presque aucun de ses contemporains, et que cette hypothèse joua un rôle essentiel dans sa théorie. D'après l'opinion courante, ce serait sous l'influence de son frère, Maurice de Broglie [26] que Louis de Broglie aurait approuvé l'hypothèse des quanta de lumière. Certains indices suggèrent, plus généralement, qu'il y aurait eu, en France, une atmosphère favorable à cette hypothèse [27]. Mais selon des paroles prononcées par Langevin au troisième congrès Solvay en 1921 [28], d'après le livre de L. Brillouin en 1922 [29] et les souvenirs de Louis de Broglie [30], il semblerait plutôt qu'à Paris, comme ailleurs, les physiciens aient eu généralement une opinion négative au sujet de l'hypothèse des quanta de lumière [31]. Le cours de Langevin semble confirmer ce point de vue, puisqu'on n'y trouve pas un mot sur les quanta de lumière. Soulignons encore une fois que Langevin ne dit rien dans son cours des recherches d'Einstein sur le rayonnement et que l'idée des quanta de lumière ne semble donc pas avoir rencontré son accord. En somme, pour ce qui est de l'acceptation des quanta de lumière, il y a peu ou pas d'influence du cours de Langevin sur de Broglie.

(ii) *À propos de la condition quantique d'Einstein.*

J'ai mentionné que Langevin raconta la condition quantique d'Einstein [13] dans son cours, mais il en avait déjà parlé auparavant, le 21 mars 1919, dans une conférence devant la Société Française de Physique [32].

On peut noter à ce propos que, jusqu'à présent, cette condition quantique d'Einstein est peu exposée dans les ouvrages historiques sur la théorie des quanta. Même à l'époque, il semble qu'elle fût ignorée à Copenhague et à Munich [33]. Ainsi, on ne la trouve pas dans des livres fameux, concernant la théorie des quanta, comme ceux de A. Sommerfeld et M. Born [34]. Einstein n'ayant pu établir aucune relation entre sa condition et les résultats expérimentaux en spectroscopie, sa condition ne semble avoir suscité aucun intérêt. Cependant, en 1921, F. Reiche effleure la condition d'Einstein dans son livre sur la théorie des quanta [35]. De même, en examinant les travaux de Sommerfeld, Epstein et Schwarzschild, H. Kneser aborde celui d'Einstein dans l'étude analytique sur la condition quantique [36]. Quant à de Broglie, il parle à plusieurs reprises de la condition d'Einstein: dans la note où il formula l'idée de l'onde matérielle, dans sa célèbre thèse [37] et également dans d'autres travaux, dont des ouvrages sur la mécanique ondulatoire [38]. E. Schrödinger aussi la commente dans son deuxième article sur

la mécanique ondulatoire en disant que l'idée de la condition d'Einstein est celle, parmi toutes les conditions antérieures, qui est la plus proche des idées de de Broglie et des siennes et il signale que de Broglie s'est fondé sur cette condition [39]. D'ailleurs, depuis le milieu des années 70, le mot *EBK quantification* se mit à être d'usage pour la condition quantique dans les systèmes à variables non-séparables [40]. L'article d'Einstein est également souvent cité dans les travaux sur le chaos quantique des années 80 [41]. Il serait intéressant, à différents points de vue, de faire une étude historique de la condition quantique d'Einstein.

Selon G. Lochak, la formulation de cette condition a été, sans doute, l'un des premiers raisonnements physiques qui reposait entièrement sur la géométrie d'un espace abstrait de configuration, idée extrêmement nouvelle et audacieuse à l'époque. L'influence de l'article d'Einstein sur l'évolution de la mécanique quantique s'exerça non pas à travers la théorie de Bohr-Sommerfeld à laquelle il était consacré, mais principalement à travers la mécanique ondulatoire dont il constitue l'une des sources essentielles [42]. O. Darrigol dit que grâce au cours de Langevin, de Broglie connut la condition d'Einstein qui marchait bien avec l'idée de l'onde dans laquelle l'action joue le rôle d'une phase [43]. Cependant, on ne peut certainement pas dire que la condition d'Einstein a suggéré l'idée de l'onde car l'idée géniale était précisément de reconnaître que l'action joue le rôle d'une phase. Lorsque de Broglie s'est posé la question de définir des règles de quantification (dans le cadre de l'optique géométrique), il a imposé une condition de résonance sur l'onde, à savoir que la phase change d'un nombre entier de fois 2π le long d'une trajectoire fermée. Alors, comme il avait auparavant découvert l'équivalence entre les principes de Maupertuis et de Fermat, il a compris que cette condition équivalait à dire que l'action doit changer de nh , ce qui lui faisait retrouver la condition d'Einstein [44]. Il faut donc examiner attentivement les notes de de Broglie sur le cours dans lequel Langevin expose la condition d'Einstein, et les remettre dans leur contexte historique, pour comprendre ce que signifiait pour de Broglie l'acceptation de cette condition.

Remerciements.

Je voudrais avant tout exprimer ma gratitude envers Christiane Demeulenaere-Douyère¹, Anne-Sylvie Guénoun² et Georges Lochak³

¹ Conservateur en chef des Archives de l'Académie des sciences.

² Conservateur de la Bibliothèque des Archives de l'Académie des sciences.

³ Directeur de la Fondation Louis de Broglie.

qui, en me donnant accès aux documents, ont permis cette étude. Je voudrais également témoigner ma reconnaissance envers Georges Lochak qui non seulement a révisé mon manuscrit, mais m'a donné des conseils très significatifs. Enfin, je présente mes remerciements à Sigeko Nisio et Eisui Uematsu pour leurs suggestions convenables.

Notes bibliographiques.

- [1] On trouvera des détails sur les archives de Louis de Broglie dans les articles suivants: G. Lochak: *Le testament de Louis de Broglie pour ses papiers scientifiques et sa bibliothèque* Ann. de Fond. L. de Broglie, vol.18, n°4, (1993) 355-357. C. Demeulenaere-Douyère: *Les archives de Louis de Broglie*, ibid. 359-361. A.S. Guénoun, G. Lochak: *La bibliothèque de Louis de Broglie*, ibid. 363-367.
- [2] D. Pestre: *Physique et physiciens en France 1918-1940*, EAC, (1984) 104-119.
- [3] Le cours de Langevin est mentionné dans les ouvrages suivants: L. de Broglie: *Savants et Découvertes*, Albin Michel, (1951) 262-265. M. Jammer: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, (1966) p.246. A. Langevin: *Mon père*, EFR, (1971) p.87. J. Mehra: *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer-Verlag, vol.1, part 2, (1982) p.580. Réf. [2] p.55, p.119. B-B. Vincent: *Langevin*, Belin, (1987) p.161, p.164. G. Lochak: *Louis de Broglie*, Flammarion, (1991) p.75.
- [4] O. Darrigol: *Strangeness and soundness in Louis de Broglie's early works*, Physis (1993) p.314.
- [5] Réf.[3] Mehra: p.578-581.
- [6] Le cours d'E. Bloch, sur la théorie des quanta, ne commença en Sorbonne qu'en 1926 (Réf. [2] p.104) et celui de L. de Broglie, à l'Institut Henri Poincaré, débuta en 1928; voir: M.A. Tonnelat: *Louis de Broglie*, Seghers, (1966) Réf. [3] Lochak: p.147.
- [7] Ainsi, de 1915 à 1919, les sommaires d'articles étrangers ont disparu du Journal de Physique.
- [8] Becquerel, Bauer, L. Brillouin et F. Perrin suivaient le cours de Langevin. Réf. [2] p. 119.
- [9] N. Bohr: *On the Constitution of Atoms and Molecules*, Phil. Mag., 26, (1913) 1-25, 476-502, 857-875.
- [10] A. Sommerfeld: *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, Ann. d. Phys., (4) 51,(1916) 1-94, 125-167.
- [11] P.S. Epstein: *Zur Theorie des Starkeffectes*, Ann.d.Phys., 50, (1916) 489-520. *Sur Quantentheorie*, ibid., 51, (1916) 168-188
- [12] K. Schwarzschild: *Zur Quantenhypothese*, Sitz. d. preuss. Akad., (1916) 548- 568.
- [13] A. Einstein: *Zum Quantensatz von Sommerfeld und Epstein*, Verh. d. D. Physik. Ges., (1917) 82-92.
- [14] P. Debye: *Quantenhypothese und Zeeman-Effekt*, Phys.Zeits., 17, (1916) 142-153.

- [15] La trajectoire stable signifie la stabilité des états quantiques.
- [16] Langevin mentionne que c'est Einstein qui a le premier démontré ce problème pour le pendule. Il est probable qu'il pense à la discussion entre Lorentz et Einstein au congrès Solvay en 1911: Théorie du rayonnement et les quanta: Rapports et discussions du réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911, Gauthier-Villars, Paris, (1912) p. 450.
- [17] Le terme d'hypothèse adiabatique *Adiabatenhypothese* a été employé pour la première fois par Einstein en 1914: A. Einstein: *Beiträge zur Quantentheorie*, Verh. d. D. Phyk. Ges., 16, (1914) 820-828, voir p.826.
- [18] P. Ehrenfest: *On adabatic change of a system in connection with the quantum theory*, Proc. Amsterdam Akad., 19, (1916) 576-597.
- [19] N. Bohr: *Om Brintspektret*, Fysisk Tidsskrift, 12, (1914) 97-114.
- [20] N. Bohr: *On the Quantum Theory of Line Spectra*, D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Sdrifter, Naturvidensk. og. Mathem. Afd., 8 Raekke, IV 1, Nr.1-3, (1918-22). H. A. Kramers : *Intensities of Spectral Lines*, D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Sdrifter, Naturvidensk. og. Mathem. Afd., 8 Raekke, III.3, (1919) 1-103
- [21] A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Ann. d. Phys., (4), 17, (1915) 132-148. *Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems*, Phys. Zeits., 10, (1909) 185-193. *Quantentheorie der Strahlung*, Phys. Zeits., 18, (1917) 121-128.
- [22] L. Bloch: *Quelques récents progrès de la physique 1914-1918*, Revue générale des sciences, mars, (1918) 166-175, avril, (1918) 198-208.
- [23] Réf.[21] *Quantentheorie der Strahlung*, Phys. Zeits., 18, (1917) 121-128.
- [24] Dans le rapport de la société française de physique, Langevin cite l'article de Bloch qu'il qualifie d'excellent résumé.
- [25] L. de Broglie: *Onde et quanta*, Comptes Rendus, 177, (1923) 507-510.
- [26] Les travaux de M. de Broglie et son appui à l'hypothèse des quanta de lumière se trouvent en détail dans: B. Wheaton: *The Tiger and the Shark*, Cambridge, (1983) 263-283.
- [27] Voir Réf. [3] Mehra: p.580 et Réf. [26] p. 263; si l'ambiance n'était pas générale, c'était celle du laboratoire de M. de Broglie Réf. [3] Lochak: p. 76.
- [28] Atomes et électrons : Rapports et discussions du conseil de Solvay tenu à Bruxelles du 1ère au 6 avril 1921 , Gauthier-Villars, Paris, (1923) p.124
- [29] L. Brillouin: *Théorie des quanta et l'atome de Bohr*, Les Presses Universitaires de France, (1922) pp.108-109.
- [30] L. de Broglie se souvient que Langevin n'était pas favorable aux quanta de lumière. Réf [3] L. Broglie: pp.262-263.
- [31] Réf. [4] p.320-321
- [32] Réf. [24]
- [33] Réf. [4] p.331
- [34] A. Sommerfeld: *Atombau und Spectrallinien*, Braunschwig, (1921). M. Born: *Vorlesungen über Atommechanik*, Springer, (1925).
- [35] F. Reiche: *Die Quantentheorie: Ihr Ursprung und ihre Entwicklung*, Springer, (1921).

- [36] H. Kneser: *Untersuchung zur Quantentheorie*, Math. Ann., 84, (1921) 277- 302.
- [37] Réf. [25] p.509. L. de Broglie: *Recherches sur la théorie des quanta*, Ann. de Phys., (10) 3, (1925) 22-128, voir pp.62-69; réédition en fac simile, Fondation Louis de Broglie, Paris, 1992.
- [38] L. de Broglie: *Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire*, Hermann, Paris, (1930). *Sur le système spectral des rayons Röntgen et la structure de l'atome*, J. de Phys., 5,(1924) 1-19. *Les principes de la nouvelle mécanique ondulatoire*, J. de Phys., 7, (1926) 321- 337.
- [39] E. Shrödinger: *Quantisierung als Eigenwertprobleme II*, Ann. d. Phys., (4), 79, (1926) 489-527, voir p.495.
- [40] I.C. Percival: *Vibrational Quantization of Polyatomic Models*, Mol. Phys., (GB) 31, No.1 ,(1976) 97-114 Dans EBK, E correspond à Einstein, B à Brillouin et K à J.B. Keller.
- [41] M.V. Berry, M. Tabor: *Calculating the Bound Spectrum by Path Summation in Actionangle Variables*, J. Phys. A: Math. Gen., vol,10, No. 3, (1977) 371-397 R.A. Maucus: *Molecular Behavior in the Quasi-periodic and Stochastic Regimes*, Ann. N.Y. Acad. Sci., 375, (1980) 169-182 C.G.M. Saslavsky: *Stochasticity in Quantum Systems*, Phys. Rep. 80, No.3, (1981) 157-250 W.P. Reinhardt: *Classical Chaos, the Geometry of Phase space and Semiclassical Quantization*. dans R.E. Mickens ed. *Mathematical Analysis of Physical System*, VNR, (1985) 169-245 T.P. Grozdanov: *Semiclassical Quantization via Adiabatic Invariance of Cas-sical Action Variables*, Phys. Rev., A. vol.3, (1986) 55-67
- [42] G. Lochak: *A propos de deux mémoires d'Einstein sur la géométrie de l'espace de configuration en mécanique classique*, Ann. de F. L. de Broglie vol.11, n°4, (1986) 253-259. Réf. [3] Lochak : p.73.
- [43] Réf. [4] p.331-2.
- [44] La contribution de la condition d'Einstein au développement de la mécanique ondulatoire est expliquée dans le livre récent: G. Lochak : *La Géométrisation de La Physique*, Flammarion, (1994) 111-119.

(Manuscrit reçu le 29 août 1995)