

Notes prises par Louis de Broglie lors des cours de Paul Langevin au Collège de France sur la théorie des quanta (2ème partie)

CHIEKO KOJIMA

Nihon University, Tokyo, Japon

Dans la première partie, en résumant le contenu du cours de 1919, nous avons vu que Langevin avait donné l'essentiel des informations sur la théorie des quanta connues à cette époque [1]. Comme je l'ai indiqué, l'existence du cours de Langevin en 1919 était assez connue, bien que son contenu n'ait jamais été cité concrètement. Quant au cours de 1924 à 1927, on n'en a presque jamais parlé jusqu'à maintenant. Comme c'était l'époque de la création de la mécanique quantique, les historiens des sciences ne s'y sont pas intéressés parce que le cours de Langevin n'y contribua pas directement. Dans cette deuxième partie, nous allons voir dans quelle mesure Langevin traita de la nouvelle mécanique quantique en train de se constituer. A cette époque, en France, de Broglie avait soutenu sa thèse sur l'onde de matière [2] et Langevin la connaissait puisqu'il en avait été rapporteur [3]. Nous verrons comment il traita la théorie de de Broglie dans son cours de 1924 à 1927 et nous examinerons son attitude envers la nouvelle théorie.

1. Les périodes de cours.

Première série

année	mois	nombre
1924	décembre	4
1925	janvier	4
1925	février	1
1925	mars	4
1925	mai	2
total		15

Deuxième série

année	mois	nombre
1925	décembre	3
1926	janvier	5
1926	février	6
1926	mars	1
total		15

Troisième série

année	mois	nombre
1927	janvier	6
1927	février	7
1927	mars	5
total		18

2. Le contenu des cours.

Examinons maintenant le contenu des cours en les résumant brièvement. ■

Comme de Broglie mettait la date de chaque cours, le contenu de ses notes est probablement très proche du contenu réel de l'ensemble des exposés. N'oublions pas, cependant, que nous ne donnons qu'un résumé des notes prises par de Broglie à ce cours.

(i) 1924-25.

Au premier cours, après avoir indiqué: *Difficulté due au rayonnement*, Langevin donne des titres brefs tels que : *Action d'une onde sur l'atome*, *Absorption d'énergie ou émission supplémentaire*, *Rayonnement noir*, *Niveaux d'énergie de Bohr*, *Loi des fréquences*, *Principe de correspondance de Bohr*, *Rayonnement d'Einstein*. Plus loin, après la question; *La discontinuité s'étend-t-elle au rayonnement ?*, on trouve une note brève: *Bohr critique non*. Pour l'hypothèse des quanta de lumière, il y a: *Bohr et moi (de Broglie)*.

Ensuite, il commence par parler de la théorie électronique du rayonnement, de Lorentz. Il s'agit de l'interaction entre le rayonnement et l'électron en tenant compte de la relativité.

A la fin de janvier 1925, Langevin expose le point de vue de Lorentz sur l'effet Zeemann, pour l'atome de Thomson [4]. Puis il décrit l'expérience de Rutherford, les déviations brusques des rayons α comme fondement de l'atome de Bohr [5]. Il y revient au début de mars et expose cette expérience en détail. A cet endroit, on ne peut pas savoir ce qu'est l'atome de Bohr, car Langevin ne parle que de l'instabilité des trajectoires électroniques dans le cadre de la théorie classique.

Même si l'on trouve des expressions concernant la théorie des quanta telles que: *Difficulté de la loi du rayonnement noir* ou *Loi de Planck*, c'est en fait l'équation de Lagrange, les principes de Maupertuis et de Hamilton en mécanique analytique, qui sont minutieusement exposés, comme fondements de la dynamique. Après l'exposé général, Langevin applique la méthode analytique au mouvement de l'électron avec trois degrés de liberté sur la trajectoire de Kepler, en utilisant la relativité, et il calcule les intégrales d'action pour les coordonnées polaires. En posant, d'après la théorie des quanta, que les mouvements possibles sont ceux pour lesquels les intégrales d'action sont des multiples entiers de la constante de Planck, il obtient l'énergie quantifiée de l'électron. En outre, il décrit le cas où il existe un champ magnétique, c'est à dire l'effet Zeemann.

On voit, d'après les intertitres du cours de 1924-1925, que Langevin concentre son attention sur la nature de rayonnement et, dès le premier cours, pose la question de la discontinuité du rayonnement, mais il exprime aussitôt des doutes au sujet de l'hypothèse des quanta de lumière. Dans la première partie [1], j'étais arrivée à la conclusion que si Langevin ne disait rien de la théorie d'Einstein sur la nature du rayonnement [6], c'est qu'il refusait tout simplement les quanta de lumière. On voit qu'à la fin de 1924, la discontinuité du rayonnement reste toujours non crédible à ses yeux. En effet, Langevin considérait le rayonnement, dans son cours, comme uniquement constitué d'ondes électromagnétiques classiques. Mais la situation était devenue différente. J'ai déjà cité un petit commentaire de Langevin sur l'opinion de Bohr qui critiquait les discontinuités du rayonnement. Le sens des quelques mots: *L'hypothèse des quanta de lumière-Bohr et moi (de Broglie)*, semble être: le premier la dénie et le second l'affirme. Langevin expose donc deux avis contraires – Bohr contre Einstein et de Broglie – à égalité. Or on sait qu'il fût membre du jury de la thèse de de Broglie, soutenue en Sorbonne le 25 novembre 1924 (juste avant ce cours), et qu'il en appréciait l'originalité dans son rapport [3]. Il semble donc que ce soit à la suite de cette thèse [2],

qui développait l'hypothèse des quanta de lumière, que Langevin aurait commencé à changer d'avis. En outre, le 16 décembre 1925, tout de suite après le commencement du cours, il reçoit la fameuse lettre d'Einstein [7] dans laquelle celui-ci considère la thèse de de Broglie comme étant d'une grande valeur. Finalement, Langevin prit en considération les quanta de lumière qu'il avait ignorés jusque là. Pourtant, dans son cours, il ne toucha ni à l'interprétation du rayonnement, par de Broglie, ni à la discontinuité du rayonnement. Il en est de même pour les titres mentionnés au premier cours comme le *Principe de correspondance de Bohr*, dont il ne parlait pas. Quant à la théorie des quanta, il la traita au mois de mai seulement. Il est possible qu'il fit exprès de choisir d'autres problèmes avant la théorie des quanta pour éviter des répétitions du cours de 1919. En tout cas, le cours de 1924 à 1925 donnait peu de nouvelles idées sur la théorie des quanta, développées depuis 1919.

(ii) 1925-26.

Le cours commença au mois de décembre 1925 par le magnétisme. Au premier cours, on voit des mots comme *Loi de Curie*, *Traitement statistique de Langevin*, *Magnéton de Weiss*, *Théorie d'Ehrenfest*, *Théorie de Thomson* et *Pas de magnétisme des quanta*. Outre cela, Langevin traitait la précession de Larmor, l'aimantation à saturation de K. Onnes etc. Tout relevait du magnétisme classique et, à la fin de janvier, il n'avait toujours pas parlé de la théorie des quanta. Ce n'est qu'après que commence le discours sur la quantification, avec l'exposé de l'expérience de Stern et Gerlach [8] et l'application à certains métaux, comme Ag, Cu, et Au, montrant que le phénomène est bien en accord avec la théorie de la quantification azimutale, selon laquelle le moment magnétique est quantifié dans certaines directions.

A partir du mois de février, Langevin développe, d'après A. Sommerfeld [9], l'idée qu'il est nécessaire d'introduire deux nombres quantiques, c'est à dire le nombre principal n et le nombre azimutal k pour déterminer les séries spectroscopiques, et qu'il faut avoir le nombre interne j pour les multiplets. Il donne des tableaux pour connaître la valeur des nombres internes j , par exemple, en même temps qu'une valeur de k (terme s), $j = 0$ pour le singulet, $j = 1$ pour le triplet et $j = 2$ pour le quintuplet etc.

Il donne aussi des tableaux pour les nombres internes j avec lesquels on peut obtenir les déplacements de raies selon le règle de Runge [10] dans le cas Zeemann. Puis il raconte l'étude de A. Landé qui cherchait

les nombres quantiques pour la raie D de Na [11]. Suivent encore des tableaux montrant les nombres quantiques pour les effets Paschen-Bach. En mars, Langevin parle de l'expérience de E. Beck [12] concernant les mesures d'Einstein-de Haas sur le rapport gyromagnétique.

Le cours de 1925 à 1926 tourne donc autour du magnétisme. Dans la première moitié, Langevin parle de la théorie classique, comme dans le cours de 1924 à 1925, ainsi que du magnétisme qui est sa spécialité. Dans la seconde moitié, il explique les déterminations des nombres quantiques pour la séparation des raies par effet Zeemann. Historiquement, en 1925, l'effet Zeemann anomal fut expliqué par Uhlenbeck et Goudsmit en introduisant l'idée de spin [13] mais Langevin ne le dit pas. A propos du spin, Langevin mentionne l'hypothèse de Compton sur le pivotement des électrons. Cela devait correspondre à l'étude sur les rayons X par Compton, en 1921, où il pensait que les électrons tournaient [14]. L'explication de l'effet Zeemann était dans le cours de 1919, mais sans être encore liée au nombre interne. Dans le cours de 1925 à 1926 Langevin prend en considération les études de Sommerfeld [15] et de Landé [11] sur le nombre interne et l'effet Zeemann faites dans les années 20.

(iii) 1927.

Dans le cours en 1927, nous voyons d'abord la double nature du rayonnement, on trouve des expressions comme *Einstein, quanta de lumière-Raison très forte* par exemple. Langevin parle du calcul (datant de 1909 !) des fluctuations d'énergie dans le rayonnement par Einstein [16] et indique qu'on y trouve deux termes. Etant donné que l'un s'obtient par la théorie corpusculaire et l'autre par la théorie électromagnétique, il insiste sur une synthèse indispensable. Jusqu'à la fin du cours, en janvier, il calcule la densité d'énergie dans le rayonnement noir et traite de la démonstration de la loi de Rayleigh, ainsi que du résonateur de Planck. Dans le cours de février, Langevin parle beaucoup de statistique et indique la statistique de Bose-Einstein [17]. Après quoi il revient au problème de la nature du rayonnement, expose la théorie des quanta de lumière d'Einstein et la probabilité de passage entre les divers états possibles [6]. Finalement, il passe à l'effet Compton [18] où l'on trouve des collisions élastiques relativistes entre électrons et quanta de lumière.

L'essentiel du cours de 1927 est la théorie corpusculaire du rayonnement, c'est à dire les quanta de lumière d'Einstein. Nous avons déjà vu que pendant le cours de 1919, Langevin n'a pas touché à la théorie du rayonnement d'Einstein et que, dans le cours de 1924-1925, il doutait

encore fortement de la théorie corpusculaire du rayonnement. Grâce à cela, nous pouvons connaître le changement d'opinion de Langevin au sujet des quanta de lumière. En 1919, il niait l'hypothèse ; de 1924 à 1925, il ne pouvait plus l'ignorer, probablement sous l'influence de la thèse de de Broglie ; en 1927, il l'admettait entièrement. C'est probablement l'expérience sur l'effet Compton, dont Langevin parle en détail dans son cours, qui fut l'une des raisons définitives qui lui ont fait accepter la théorie des quanta de lumière [19]. En France, les premiers physiciens qui acceptèrent, dès 1922 (ou avant), la théorie corpusculaire de la lumière furent Maurice et Louis de Broglie [20] mais on voit que Langevin, pendant longtemps, ne voulut pas l'accepter et ce n'est qu'en 1927 que la théorie du rayonnement d'Einstein entra pour la première fois dans son cours.

3. Les rapports avec la mécanique ondulatoire et la mécanique des matrices.

Maintenant, nous comprenons pourquoi Langevin ne parla presque pas de la mécanique ondulatoire et de la mécanique des matrices. Par exemple, au début de 1927, l'expression *Calcul des matrices-(Heisenberg)* est écrite mais Langevin ne raconte pas le calcul en question. Contrairement au cours de 1919 qui exposait les récents progrès de la physique à cette époque, celui de 1924 à 1927, ne permet pas de connaître le processus de formation de la nouvelle mécanique. Si on se limite, quant au contenu du cours, à la théorie des quanta, celle-ci n'apparaît que deux fois dans le cours de 1924-1925. Et puis, il est quand même un peu tard pour traiter du nombre interne en 1924 ou 1925, ou la théorie du rayonnement d'Einstein en 1927, l'année du cinquième congrès Solvay, dont le sujet fut l'interprétation de la mécanique quantique [21]. Les cours de 1924 à 1927 ne donnaient plus les dernières nouvelles du développement de la physique.

Il est également remarquable que Langevin n'explique ni le principe de correspondance de Bohr ni le problème des sauts quantiques entre des états stables, ce qui était déjà le cas dans le cours de 1919. Entre temps, en France, on pouvait les étudier dans le livre de L. Brillouin [22], en 1922, puis dans une partie du cours d'E. Bloch à la Sorbonne en 1926-1927 et 1928-1929 [23].

En fait, Langevin ne traitait que des sujets particuliers qui l'intéressaient personnellement et son cours ne contenait pas toute la théorie des quanta. En songeant au fait que Langevin mit si longtemps à accepter

l'hypothèse des quanta de lumière, on aperçoit en lui un côté conservateur qui allait contre le développement de la physique. D'une part, il fut novateur pour répandre la relativité [24], mais d'autre part, il était sceptique au sujet de la nouvelle mécanique – aussi bien la mécanique ondulatoire que la mécanique des matrices – en train de se construire. Pour vérifier ce point, il reste encore à examiner les idées de Langevin sur la mécanique quantique en tenant compte des discussions dans les rapports du congrès Solvay [25].

4. L'esprit de mesure de Langevin contre la théorie de de Broglie.

Langevin ne traitait ni de la mécanique quantique ni de la thèse de de Broglie dans son cours. Mais il parla, en 1927, de la statistique de Bose-Einstein. Il raconta comment Einstein avait calculé, en 1925, les fluctuations de l'énergie d'un gaz idéal selon cette statistique et comment il avait montré dans cette étude que la fluctuation était composée d'un terme qui s'obtient par la distribution de Maxwell et d'un autre qui correspond à l'interférence des ondes [26]: comme Langevin l'exposa dans son cours, on peut donc être certain qu'il connaissait l'article d'Einstein. Or c'est dans cet article qu'Einstein souligna pour la première fois l'importance de lier une onde à un corpuscule, en citant de Broglie. En outre, c'est cet article qui provoqua l'intérêt de Schrödinger pour la thèse de de Broglie [27]. Et malgré cela, Langevin ne dit rien sur la mécanique ondulatoire. C'est d'autant plus curieux qu'il avait émis un jugement positif sur la thèse de de Broglie [3] et que de Broglie lui-même assistait à son cours. Pour Langevin, l'idée de l'onde matérielle paraissait sans doute encore plus audacieuse que celle des quanta de lumière. Il avait dû obstinément tenir cette onde pour une simple hypothèse jusqu'à ce qu'il ait connu l'expérience de diffraction des électrons faite en 1927 par Davisson et Germer [28], puis celle de J.P. Thomson [29]. Pourtant, bien que Langevin ne crût pas à l'existence de l'onde de matière, il avait contribué au départ de la mécanique ondulatoire en aidant de Broglie à nourrir ses réflexions. Après tout, c'est à travers le cours de Langevin que de Broglie était remonté à Einstein [30]. Certains témoignages, comme celui de P. Kapitza [31], par exemple, portaient à croire que Langevin avait fortement soutenu la théorie de de Broglie. Mais d'après les notes prises par de Broglie à son cours, il semble donc qu'il n'en parlait pas. Il serait donc intéressant de revoir le jugement que Langevin portait sur la thèse de de Broglie et la raison pour laquelle il l'envoya à Einstein.

Ce problème sera examiné en une autre occasion, dans le contexte plus général de l'accueil fait à l'idée de de Broglie.

Références

- [1] C. Kojima, Annales de la Fondation Louis de Broglie, 21, n°1, 1996, p.81.
- [2] L. de Broglie: *Recherches sur la théorie des quanta*, Ann. de Phys., (10), 3, (1925) 22-128
- [3] Le rapport de Langevin sur la thèse de de Broglie est reproduit dans: L. de Broglie: *Recherches sur la théorie des quanta*, Edition de la Fondation Louis de Broglie, Paris (1992).
- [4] Le modèle de Thomson est mentionné comme *image électrique* et *l'atome et la sphère*.
- [5] E. Rutherford: *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*, Phil. Mag., (6), 21. (1911).
- [6] A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Ann. d. Phys., (4), 17, (1905) 132-148, *Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems*, Phys. Zeits., 10, (1909) 185-193, *Quantentheorie der Strahlung*, Phys. Zeits. , 18, (1917) 121-128.
- [7] La partie de ce manuscrit dans laquelle Einstein donne son appréciation sur de Broglie est reproduite dans l'ouvrage [3], p. 136.
- [8] O. Stern und W. Gerlach: *Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld*, Ann. d. Phys., 9, (1922) 349-355.
- [9] A. Sommerfeld: *Allgemeine spektroskopische Gesetze, insbesondere ein magneto-optischer Zerlegungssatz*, Ann. d. Phys., 63, (1920) 221-263.
- [10] C. Runge: *Über die Zerlegung von Spektrallinien im magnetischen Felde*, Phys. Zeits. , 8, (1907) 232-237.
- [11] A. Landé: *Über den anomalen Zeemaneffekt*, Phys. Zeits. , 5, (1921) 231-241, 7, (1921) 398-405, *Termstruktur und Zeemaneffekt der Multipletts*, ibid. 15, (1923) 198-205, 19, (1923) 112-123.
- [12] E. Beck: *Zum experimentellen Nachweis der Ampèreschen Molekularströme*, Ann. d. Phys., 60, (1919) 109-148.
- [13] G.E. Uhlenbeck und S. Goudsmit: *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons*, Die Naturwissenschaften, 13, (1925) 953- 954.
- [14] A.H. Compton: *The magnetic electron*, Jour. Franklin Inst., 192 (1921) 145- 155.
- [15] A. Sommerfeld: *Über die Deutung verwickelter Spektren (Mangan, Chrom, usw.) nach der Methode der inneren Quantenzahlen*, Ann. d. Phys., 70, (1923) 32-62, *Zur theorie der Multipletts und ihrer Zeemaneffekte*, ibid. 73, (1924) 209-277.
- [16] Voir réf. [6] et: A. Einstein: *Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems*, Phys. Zeits., 10, (1909) 185-193.
- [17] S.N.Bose: *Plank's Gesetz und Lichtquantenhypothese*, Zeits.f.Phys., 26, (1924) 178-181

- [18] A. H. Compton: *A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements*, Phys. Rev., 21, (1923) 483-502
- [19] H. Konno indique qu'en 1924, l'effet Compton n'était pas encore l'expérience définitive qui prouvait l'existence des quanta de lumière pour les physiciens qui s'opposaient aux quanta de lumière. H. Konno: *Bohr et des quanta de lumière*, LIBER, No.10, Beppu Univ., (1989)
- [20] B. Wheaton: *The Tiger and the Shark*, Cambridge, (1983) 263-283
- [21] *Électrons et Photons*: Rapports et discussion du cinquième conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927, Gauthier-Villars, Paris, (1928)
- [22] L. Brillouin: *Théorie des Quanta et l'Atome de Bohr*, Les Presses Universitaires de France, (1922).
- [23] E. Bloch: *L'Ancienne et Nouvelle Théorie des Quanta*, Hermann, (1930).
- [24] B. Bensaude-Vincent: *Langevin*, Belin, (1987) 61-80.
- [25] Après la mort de Lorentz, Langevin fut élu Président du Conseil Solvay et il le fut en 1930 et en 1933. A. Langevin: *Paul Langevin et les congrès physique Solvay*, La Pensée, Revue du Rationalisme moderne, n°129, n°130, (1966).
- [26] A. Einstein: *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, Sitzsb. preuss. Acad. Wiss., (1925) 3-14.
- [27] Le 23 avril 1926, Schrödinger écrivit une lettre à Einstein dans laquelle il le remercia d'avoir attiré son attention sur la thèse de de Broglie, grâce à la référence [26]. K. Pribram: *Schrödinger, Planck, Einstein, Lorentz, Briefe zur Wellenmechanik*, Springer Verlag, (1963)
- [28] C. J. Davisson and L. H. Germer: *Diffraction of a electron by a crystal of nikel*, Phys. Rev., 30, (1927) 705-740.
- [29] G. P. Thomson: *The diffraction of cathode rays by thin films of platinum*, Nature, 120, (1927) 802.
- [30] Le détail de cette histoire se trouve dans: G. Lochak: *Louis de Broglie*, Flammarion, (1992) 108-110.
- [31] P. Biquard: *Langevin*, Seghers, (1969) 76-77.

(Manuscrit reçu le 29 août 1995)