

La Physique Française avant Louis de Broglie

CHIEKO KOJIMA

Nihon University, 5-2-1, Kinuta Setagayaku,
Tokio Japon 157-8570

Il va sans dire que nous pensons ici à Louis de Broglie (1882-1987) comme physicien français qui joua un rôle essentiel dans l'histoire de la Mécanique ondulatoire. La Fondation a déjà publié plusieurs livres de de Broglie parmi lesquels il y a sa thèse rééditée en 1992 [1] que les historiens des sciences considèrent la plus importante. Cette 3^{ème} édition de la Fondation comprend non seulement la thèse elle-même mais aussi trois articles de de Broglie en 1923 concernant l'onde de matière, le rapport de P.Langevin sur la thèse, et une partie de la lettre d'Einstein à Langevin en 1924. Par ailleurs, G.Lochak a écrit une biographie de Louis de Broglie [2], ses travaux scientifiques, sa conception de la science, sa manière de chercher et l'objet même de sa recherche. Ce livre n'est pas uniquement une biographie, il raconte l'histoire de la théorie des quanta et celle de la Mécanique quantique du point de vue des physiciens qui ont côtoyé de Broglie.

Parmi eux nous ne pouvons pas oublier Maurice de Broglie (1875-1960), l'expérimentateur international des Rayon X à cette époque, qui lui aussi contribua à la théorie des quanta. Les historiens des sciences citent souvent Maurice de Broglie dans le contexte des quanta de lumière, et insistent sur l'influence de Maurice sur Louis de Broglie [3]. C'est à dire que la recherche de Louis de Broglie dans le laboratoire de Maurice au début des années 20 le poussait à former l'idée de l'Onde de Matière. Bien sûr Louis de Broglie ne devait pas tout à son frère, mais nous pensons aux frères Broglie comme à des physiciens français qui contribuaient à la théorie des quanta

Pendant, 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[4]. Et sauf les travaux des frères de Broglie, peu de travaux français sont connus. Récemment, Martha Cecilia Bustamante a indiqué dans son article "Rayonnement et quanta en France 1900-1914" [5] que la théorie de Planck fit son apparition relativement tôt dans le milieu

scientifique parisien entre 1900 et 1914, et que les physiciens français ne sont pas restés en dehors de la problématique des quanta. Ici, nous envisageons l'époque entre 1911 et 1922, et nous expliquerons comment les physiciens français acceptaient la théorie des quanta à l'étranger et quelle sorte de théorie des quanta ils développaient en France.

Les points suivants seront discutés concrètement.

1. Physiciens français qui assistaient aux 1^{er} et 3^{ème} Conseil Solvay.
2. Conférences tenues par la société française de physique avant la Première Guerre mondiale.
3. Vue générale sur la théorie des quanta par Léon Bloch (1876-1947) après la Première Guerre mondiale.
4. Cours de P.Langevin (1872-1946) sur la théorie des quanta en 1919.
5. Recherches de Marcel Brillouin sur la théorie des quanta.

Et après avoir expliqué l'acceptation de la théorie des quanta en France ainsi que la physique française à cette époque, nous espérons que cet article va aider à éclaircir encore l'originalité des travaux scientifiques de Louis de Broglie.

1 Assistances au Conseil Solvay et ses rapports.

Au mois d'octobre 1911, le fameux 1^{er} Conseil Solvay sous le titre *La théorie du rayonnement et les quanta*, était tenu à Bruxelles. Il y avait 6 participants français comme H.Poincaré (1854-1912), M.Brillouin (1854-1948), M.Curie (1867-1934), J.Perrin (1870-1942), M.de Broglie et P.Langevin. La France ainsi que l'Allemagne avait les participants les plus nombreux qui étaient un quart de l'assistance totale [6]. Comme Langevin et Maurice de Broglie étaient responsables de la publication d'ensemble des rapports présentés au Conseil [7], les physiciens français pouvaient lire ces rapports les premiers dans le monde. Louis de Broglie était l'un de ceux qui était fasciné par la théorie des quanta écrite dans ces rapports, et il le dit comme suit: *Je lis ces textes difficiles avec enthousiasme, j'y découvre l'importance de cette nouvelle théorie des quanta que Planck avait introduite dans un éclair de génie en 1900 et qu'Einstein avait étendue sous une forme nouvelle en 1905 dans sa théorie des quanta de lumière* [8]. Selon le livre de G. Lochak, Maurice de Broglie dit que cette lecture provoqua en Louis de Broglie *un coup d'État intérieur* [9]. Il serait bien possible que les contemporains de de Broglie aussi s'intéressaient au 1^{er} Conseil Solvay. Les rapports suivants du Conseil Solvay étaient aussi édités en France et les physiciens français pouvaient avoir les informations aussitôt. Voici quels furent les participants français du 1^{er} au 3^{ème} Conseil Solvay.

Le 1^{er} : La théorie du rayonnement et les quanta
du 30 octobre au 3 novembre 1911

H.Poincaré M.Brillouin M.Curie J.Perrin M.de Broglie P.Langevin

Le 2^{ème} : La structure de la matière, Les Rapports et discussions [10]
du 27 au 31 octobre 1913

M.Brillouin M.Curie M.de Broglie P.Langevin

Le 3^{ème} : *Atomes et Electrons* [11] du 1er au 6 avril 1921

M.Brillouin M.Curie M.de Broglie J.Perrin P.Langevin

L.Brillouin (1889-1979)

Nous remarquons que tous étaient parisiens et que M.Brillouin, M.Curie et Langevin y étaient présents chaque fois. Les participants étaient comme des missionnaires sur la théorie des quanta en France.

2 Conférences tenues par la société française de physique de 1912 à 1914

Entre le 1^{er} Conseil Solvay et le déclenchement de la Première Guerre mondiale, la société française de physique a publié 2 rapports sur les conférences organisées par elle-même.

Rapports de 1912, Constitution de la Matière [12]

Pour la conférence de 1912, sous le titre Constitution de la Matière, Poincaré, M.Curie, Perrin et Langevin y étaient présents et leur titres d'articles sont comme suit. H.Poincaré: "Les rapports de la matière et de l'éther" [13], M.Curie: "Les rayonnements des corps radioactifs" [14], J.Perrin: "Les preuves de la réalité moléculaire" [15], P.Langevin: "Les grains d'électricité et la dynamique électromagnétique" [16]. Ils n'ont pas discuté directement la théorie des quanta. Parmi les participants de cette conférence, E.Bauer (1880-1963) seulement traita le sujet "Les quantités élémentaires d'énergie et d'action" [17] et il parla de la théorie du rayonnement de Planck et la théorie des chaleurs spécifiques d'Einstein. En 1922, Bauer écrivit un livre sous le titre *La théorie de Bohr* [18], d'après la conférence de la société française de physique en 1921, et ce livre était l'un de premiers livres français concernant la théorie des quanta. Selon l'article de Bustamante, les recherches de Bauer, commencés vers 1907, ont donné lieu à la première présentation détaillée de la théorie de Planck et à une mise au point générale des problèmes du rayonnement thermique [19]. Bustamante a apprécié beaucoup la thèse de Bauer en 1913[20], citant le rapport de sa thèse comme suit.

Sa contribution sur le rayonnement des flammes, c'est ce travail sur la question des quanta et le problème général du rayonnement thermique qui sera mis au premier rang dans la liste de ses contributions scientifiques [21]. L'autre participant de la même génération que Bauer, Eugène Bloch, (1878-1944) publia un article sous le titre "La théorie électronique des métaux" [22] et exposa son opinion sur la théorie des quanta dans son introduction. Bloch admettait le succès de la théorie de Planck et celle d'Einstein, mais il dit aussi que la théorie des chaleurs spécifiques d'Einstein n'était pas conciliable avec la théorie électronique des métaux. Il ajouta: *nous sommes aujourd'hui, semble-t-il, à un tournant de l'histoire des théories physiques*. Quatorze ans après, E.Bloch commença à donner le cours de la théorie des quanta à la Sorbonne [23]. Bauer et E.Boch sont des exemples de jeunes physiciens français qui s'intéressaient à la théorie des quanta à cette époque.

Rapports de 1913 à 1914, Physique moléculaire [24]

Concernant les conférences tenues de 1913 à 1914, sous le titre Physique moléculaire, trois participants du 1er Conseil Solvay y assistaient, c'étaient M.Curie, M.de Broglie et Langevin. Le titre de M.Curie était "Les radio-éléments et leur classification" [25], et celui de M. de Broglie était "Les progrès de nos connaissances concernant les rayons de Röntgen" [26], et leurs études ne se rapportaient pas directement à la théorie des quanta. Quant à Langevin, il raconta "La physique du discontinu" [27] en mentionnant la révolution dans la physique provoquée par quanta. Et il dit que *pour constituer cette Physique du discontinu qui s'impose aujourd'hui, nous devons nécessairement faire usage de raisonnements statistiques, nous servir constamment du calcul des probabilités qui est le seul lien possible entre le monde des atomes et nous, entre les lois élémentaires et nos observations*. Cet article était réédité dans le livre de Langevin *La physique depuis vingt ans* [28] en 1923. Nous trouvons ce livre dans la bibliothèque de Louis de Broglie et nous remarquons que de Broglie mit des notes "très intéressant!" sur cet article de Langevin. Langevin ne développa pas la nouvelle théorie des quanta mais il est certain qu'il désirait une théorie nouvelle tout à fait différente de la théorie classique. Au moins, Langevin était le physicien français qui croyait le plus à l'importance de la théorie des quanta à cette époque et c'était seulement l'article de Langevin qui traita la théorie des quanta dans les rapports de conférences de 1913 à 1914. Mais ce n'est pas parce que les physiciens français ne s'intéressaient pas à la théorie des quanta. Plutôt, ils pensaient qu'on pouvait appliquer les quanta d'énergie pour certains sujets limités, surtout pour le rayonnement. En 1913, Bohr interpréta l'absorption et l'émission de la lumière dans l'atome comme transition

d'un état stable d'énergie discrète de l'électron à un autre [29], et cette étude apporta une vue nouvelle pour la théorie des quanta. La théorie de l'atome de Bohr montrait que la théorie des quanta jouait un rôle essentiel dans la loi de matière. Mais avant que les physiciens français connaissent mieux la théorie de Bohr [30], la Première Guerre mondiale a éclaté, les physiciens étaient mobilisés et leurs études étaient interrompues.

3 Vue générale sur la théorie des quanta par Léon Bloch tout après la Première Guerre mondiale

Pendant la Première Guerre mondiale, les physiciens français ne pouvaient pas suffisamment prendre des renseignements sur des études à l'étranger dans les revues scientifiques françaises. Par exemple, dans le *Journal de Physique* de 1915 à 1919, il n'y avait pas de résumés sur des articles de l'étranger qu'on y trouvait avant. En 1918, Léon Bloch (1876-1947) a publié un article sous le titre "Quelques récents progrès de la physique (1914-1918)"[31] et montra un panorama de la théorie des quanta de 1914 à 1918. Cet article est utile pour savoir combien d'informations sur la théorie des quanta les physiciens français obtenaient à cette époque, mais cet article n'était pas du tout remarqué par des historiens des sciences. Léon Bloch est frère d'Eugène Bloch mentionné avant et après avoir changé ses études de la philosophie à la physique, il était préparateur suppléant à la Sorbonne. Il expliqua son ambition comme suit. "C'est celle de faciliter la reprise du travail d'après-guerre à nos camarades physiciens français. Il nous a semblé qu'il pourrait être utile de débayer la voie, même d'une façon imparfaite, à ceux d'entre eux qui chercheront plus tard à s'orienter parmi les résultats acquis. L'indication même succincte des problèmes posés, des solutions trouvées, des ordres d'idées encore en litige, pourra épargner dans certains cas un peu de temps". Et il a placé l'index bibliographique sur la théorie des quanta à la fin de son article.

Les sujets qu'il traita dans son article étaient larges, comme la dynamique générale et la théorie des quanta à plusieurs degrés de liberté, l'atome de Bohr et les séries spectrales, la structure des raies-spectrales, les spectres des rayons de Röntgen, l'effet Stark, le phénomène de Wien, le phénomène de Zeeman, les spectres de Rotation, le magnétisme, la photoélectricité, la radioactivité. Les études de Bohr, à commencer par l'atome de Bohr en 1913 puis son travail sur l'effet Stark de 1914 [32] et de 1915 [33] où il interpréta l'écart du spectre de l'hydrogène (la série de Balmer) y étaient souvent citées. Il mentionna aussi l'article de A.Sommerfeld sur la condition générale quantique de 1916 [34] où il expliqua la structure fine de l'atome en considérant la masse relativiste de l'électron. En bref, Bloch examinait très bien

les études de Bohr et Sommerfeld qui étaient dominants en théorie des quanta. Bloch cita aussi l'article d'Einstein sur la probabilité de transition de 1917 [35] dans l'Index bibliographique, même s'il ne le raconta pas en détail. Dans l'ensemble, Bloch résuma largement les études sur la théorie des quanta entre 1914 et 1918. Et son article nous apprend qu'il gardait les articles écrits à l'étranger pendant la Première Guerre mondiale.

D'un point de vue d'expérimentateur, Bloch maintenait que la théorie des quanta était très féconde pour analyser les résultats des expériences. Pourtant il indiquait que la théorie des quanta devrait progresser davantage. Par exemple, pour la condition quantique, Bloch expliqua celle de Wilson, Sommerfeld et Einstein et critiqua qu'elles ne pouvaient s'appliquer qu'aux systèmes avec séparation de variables. Alors il insista sur l'importance des études au système de non-séparation des variables et dit que le travail de Schwarzschild [36] devrait être très suggestif pour cela. Enfin, après avoir montré la difficulté de la théorie des quanta, Bloch encourageait les études des quanta en France. Il est difficile de trouver l'influence de cet article de Bloch, mais il était remarqué dans le rapport de la société française de physique en 1919, que l'article de Bloch était un excellent résumé [37]. Au moins, l'article de Bloch apportait les connaissances utiles aux physiciens français tout après la Première Guerre mondiale.

4 Cours de Langevin sur la théorie des quanta en 1919

Après la Première Guerre mondiale, Langevin fut le premier qui donna les cours sur la théorie des quanta au Collège de France. L'existence du cours de Langevin est connue depuis longtemps et mentionnée dans plusieurs livres [38], mais le contenu n'en était pas connu concrètement car Langevin ne le publia pas. 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, et ce travail fut achevé en 1993[39]. 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 au Collège de France. Comme il y a peu d'occasions d'étudier la théorie des quanta en France, on peut considérer ces notes comme des documents importants [40] pour connaître l'état de l'enseignement de la théorie des quanta en France à cette époque. Pour le cours en 1919, jusqu'à maintenant, il n'y a que les notes prises par de Broglie qui nous montrent le contenu du cours de Langevin. Quant aux cours de 1924 à 1927, la bibliothèque de l'Ecole Supérieure

de Physique et Chimie Industrielles de la Ville de Paris conserve les autres notes prises par des auditeurs de Langevin comme Bauer [41].

Ici, nous allons examiner le cours de Langevin en 1919. Comme j'ai déjà publié un article sur ce sujet dans les Annales de la Fondation, j'aimerais résumer mon article [42].

Comme mentionné ci-dessus, Langevin était toujours présent au Conseil Solvay et il s'intéressait à la théorie des quanta. Alors 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. En effet, outre de Broglie, Bauer, Léon Brillouin, J. Becquerel suivaient le cours de Langevin [43].

Les sujets que Langevin traita se rapportent principalement aux recherches jusqu'en 1917, et portent 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, ainsi que sur les travaux qui concernent les transitions quantiques [44]. 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 [45]. Or, dans l'article intitulé *Quelques progrès récents de la physique*, écrit par L. Bloch en 1918 mentionné ci-dessus, la note d'Einstein de 1917 sur le rayonnement est citée en référence [46]. Comme Langevin avait lu cet article de Bloch, il devait nécessairement connaître celui d'Einstein. Quant aux autres travaux d'Einstein, on n'imagine pas non plus 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. Concernant la théorie corpusculaire du rayonnement, c'est-à-dire les quanta de lumière d'Einstein,

selon les notes de cours de Langevin, il niait les quanta de lumière en 1919, il en doutait encore fortement dans le cours de 1924 à 1925, et il les admettait entièrement en 1927 [47]. Donc, on voit que Langevin, pendant longtemps, ne voulut pas accepter la théorie corpusculaire de la lumière. Et cela est à l'opposé de Maurice et Louis de Broglie.

Considérant l'article de Bloch et le cours de Langevin, on peut dire que la situation française était plutôt favorable aux recherches sur la théorie des quanta. Pourtant, même si les deux montraient les études à l'étranger pédagogiquement, ils ne développaient pas la théorie des quanta elle-même. Par contre, il y avait une théorie des quanta en France qui essayait d'expliquer l'atome de Bohr d'une manière très unique que nous allons voir.

5 Les études sur la théorie des quanta par Marcel Brillouin de 1919 à 1922

(i) *Le précurseur de la Mécanique ondulatoire*

Marcel Brillouin est père du fameux physicien français Léon Brillouin (1889-1979). M. Brillouin fit ses études à l'École Normale Supérieure, puis devint professeur à l'E.N.S., finalement il fut professeur de physique mathématique au Collège de France. Langevin et E. Bloch étaient ses étudiants [48]. Selon l'article de Bustamante, Poincaré et Brillouin étaient promoteurs en France de théories nouvelles au début de 20^{ème} siècle [49]. Et Langevin écrivit que *Brillouin était en précurseur de la Mécanique ondulatoire, et montra comment il est possible dans deux voies différentes, de retrouver le discontinu des quanta par une théorie d'essence continue* [50]. Brillouin participa aux trois premiers Conseil Solvay et était l'un des physiciens français qui pouvaient obtenir l'information sur la théorie des quanta. Quelques historiens ont déjà touché un peu aux travaux de Brillouin comme précurseur de la Mécanique ondulatoire [51]. En fait, de Broglie cita l'article de Brillouin de 1919 dans le premier article de l'Onde de Matière de 1923 [52], en plus, de Broglie a mis des notes au bas de la première page de l'article "Nouvelle dynamique des quanta" publié dans les rapports du fameux 5^{ème} Conseil Solvay en 1927 comme suit. *En commençant cet exposé, il nous paraît juste de souligner que M. Marcel Brillouin a été le véritable précurseur de la Mécanique ondulatoire* [53]. Mais l'idée de l'onde de Brillouin n'était pas très bien comprise, parce qu'elle inclut beaucoup d'hypothèses compliquées.

(ii) *La théorie de Brillouin*

Brillouin essayait de prouver l'état stable de l'électron dans l'atome de Bohr et supposait un champ particulier dans ses articles de 1919 à 1922 [54]. Voici l'explication de ce champ particulier dans son article de 1919, sous le titre "Actions mécaniques à hérédité discontinue par propagation".

Considérons une particule qui se meut dans un milieu élastique avec une vitesse u , beaucoup plus grande que la célérité ω des ondes élastiques. Supposons que, soit par des vibrations propres, soit comme conséquence du déplacement dans le milieu, la particule émette à chaque instant des ondes émanant de sa position instantanée comme centre. Si la trajectoire est périodique, la particule sera rejointe à chaque instant un nombre fini de fois par les ondes qu'elle a émises au cours de son mouvement antérieur.

L'onde émise au passage par le point M_k rejoindra la particule au moment de temps τ_k où elle atteint sa position actuelle r_k , si l'on a

$$r_k = \omega \int_{M_k}^M \frac{ds}{u} = \omega \tau_k \tag{1}$$

A chaque position du point réel sont associées, si u est beaucoup plus grande que ω , un nombre fini de positions-antérieures M_k du même point dont les ondes atteignent le point réel au temps. Cela constitue bien un champ à hérédité, mais discontinue.

Supposons en particulier que l'énergie du point mobile dans le champ d'une de ses positions antérieures soit

$$\phi = \pm \frac{B^2}{r_k} \tag{2}$$

L'équation 1) qui détermine cette position pourra s'écrire

$$\phi \int_{M_k}^M \frac{ds}{u} = \frac{B^2}{\omega} \tag{3}$$

Le premier membre est une action, qui joue un rôle dans le mouvement du point, et l'équation 3) montre que cette action a une valeur constante. Cette démonstration est a priori et la théorie d'un champ à hérédité semble ne pas être bien-fondée, mais Brillouin continuait à garder cette idée.

Quant à l'article de 1920, "Actions héréditaires discontinues et équations différentielles qui en résultent", il supposa l'onde sonore comme l'onde que la particule émet. Et il donna un exemple simple comme suit.

Supposons le mobile animé d'une vitesse v uniforme sur une circonférence de rayon R . Entre deux positions du mobile séparé par un angle $2\alpha < 2\pi$, il s'écoule un temps,

$$t_k = \frac{2\alpha + 2k\pi}{v} R \quad (4)$$

avec k entier suivant le nombre de tours complet accompli par le mobile en les passages considérés aux deux positions.

D'autre part, le temps de parcours de la corde par le trouble aérien est

$$t' = \frac{2R \sin \alpha}{V} \quad (5)$$

Alors, si le mobile rejoint les ondes qu'il a émises, c'est à dire que $t_k = t'$, l'équation d' α est comme suit.

$$\sin \alpha_k = \frac{V}{v} (\alpha_k + k\pi) \quad (6)$$

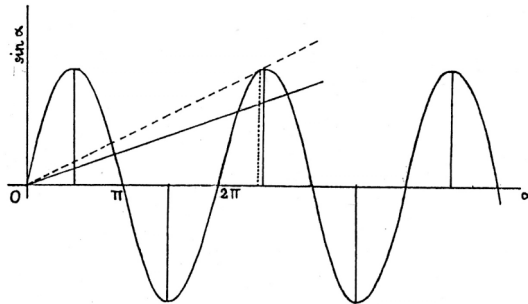


Figure 1

Voir la figure 1 dans cet article et on peut savoir que le nombre de solution dépend du rapport de $\frac{V}{v}$.

La figure 2 montre que ce rapport est 4 et la figure 3 montre que le rapport est 5. Brillouin ne dit pas comment ces figures s'écrivent, mais il est probable que Brillouin supposa l'onde de choc. Par exemple, la figure 2 est un cas où la vitesse de mobile est 4 fois plus grande que celle de l'onde qu'il émet. Pour l'onde de choc, si l'on fixe le rapport de vitesse de mobile à celle d'onde, on peut avoir l'angle du front d'onde par rapport à la direction de mobile.

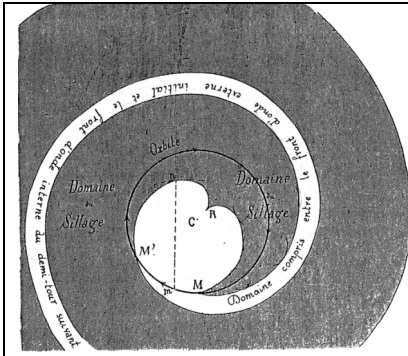


Figure 2

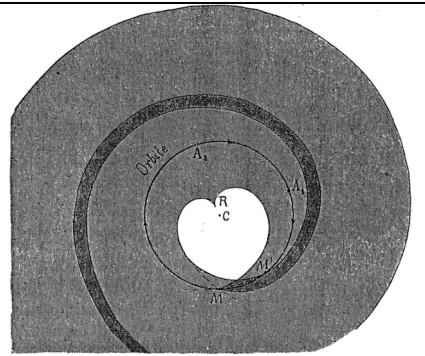


Figure 3

Et si l'on écrit ce front d'onde avec l'ordinateur sous la même condition de la figure 2, on trouve la figure 4. Et si l'on écrit ce front d'onde sur un ordinateur sous la même condition de la figure 3, on trouve la figure 5.

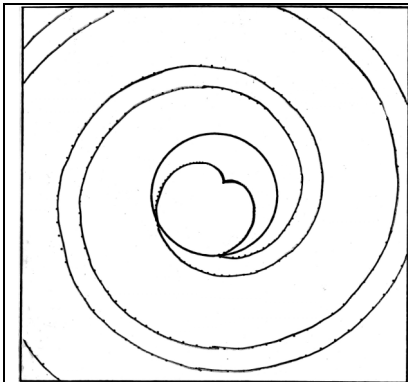


Figure 4

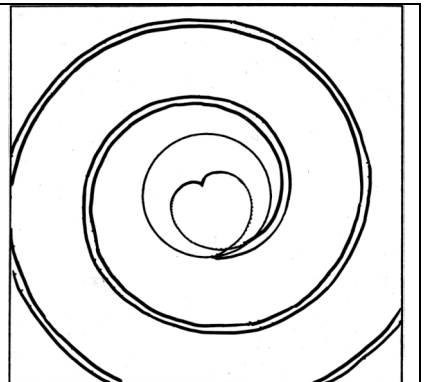


Figure 5

Ces figures s'accordent avec les figures de Brillouin, si bien que Brillouin imaginait une onde de choc en supposant un mobile qui faisait le mouvement circulaire en émettant des ondes sphériques

Dans l'article de 1920 "Action à hérédité discontinue et raies spectrales", il posa une hypothèse: *La loi de variation de la célérité est entièrement commandée par le noyau positif, ou plus étroitement la célérité est une fonction déterminée de la distance au centre du noyau, indépendante de l'électron.* Selon son champ à hérédité, la vitesse d'onde devient beaucoup plus lente et il dit que la constante de Balmer et l'ordre de grandeur des rayons permettent de fixer à environ 1/100 à 1/1000 de la vitesse de la lumière de l'atome.

Dans les articles de 1921-1922, "Atome de Bohr. Fonction de Lagrange circumnucléaire", il chercha la fonction de Lagrange sous le champ à hérédité, en supposant que le domaine circumnucléaire est caractérisé par une vitesse de propagation des ondes beaucoup plus petite, 10^{-3} à 10^{-4} ou 10^{-5} . Il dit aussi que cette remarque qualitative lui paraissait inéluctable.

(iii) Cours de Brillouin au Collège de France

Pourquoi Brillouin établissait le rapport entre l'onde et l'atome de Bohr à cette époque? Aux Archives de l'Académie des Sciences, il y a un résumé des leçons de Brillouin au Collège de France [55]. Selon ce résumé, de 1914 à 1919, Brillouin donnait le cours de physique du globe, et de 1919 à 1920, le sujet de cours était *Capillarité* et il traitait par exemple, les vibrations des cylindres, la propagation des ondes capillaires le long de la surface libre plane d'un liquide pesant, et la théorie des gouttes liquides pesantes. De 1920 à 1921, le sujet était *Propagation des ondes* et traitait comme les ondes dans les fluides indéfinis-Sources, les ondes sphériques dans l'espace infini, les ondes émises par une sphère en mouvement, la réaction de l'air sur la sphère. De 1922 à 1923, le sujet était *Grandes déformations des solides isotropes, Plasticité-Rupture*, celui de 1923 à 1924 était *La propagation des séismes et la constitution interne du globe*. Donc en même temps qu'il publiait les articles sur les quanta, il faisait le cours sur la propagation des ondes en général. Alors cette situation devait lui faire appliquer l'onde classique à la théorie des quanta. Cependant, il n'y a pas de remarque sur la théorie de quanta de Brillouin dans son résumé de cours.

(iv) La théorie de Brillouin dans le contexte de la Mécanique ondulatoire

Brillouin introduisait un champ à hérédité pour expliquer l'atome de Bohr mais cela restait une hypothèse. En considérant la nature de l'onde que Brillouin appliquait, l'influence de Brillouin sur de Broglie dont les historiens

des sciences parlait devrait être très limitée. C'est à dire que l'idée de Brillouin qui imagine une situation où l'onde coïncide avec le mobile devrait ressembler au principe de l'accord des phases de de Broglie. Le principe de l'accord des phases veut dire que la vibration interne de la particule reste constamment en phase, au point où elle se trouve, avec la vibration de l'onde. Mais l'onde de Brillouin n'était pas du tout l'Onde de Matière, et la nature physique de l'onde de Brillouin était tout à fait différente de celle de de Broglie. En plus, le but de la théorie de Brillouin était de montrer seulement l'atome de Bohr tandis que celui de de Broglie était d'unifier l'image de corpusculaire et ondulatoire, et au cours de cela, de Broglie trouva les lois quantiques de Bohr. Brillouin lui-même considérait que sa théorie était une façon transitoire, et il dit à la fin de son article de 1922 : *Mais peut-être est-ce par une troisième voie toute différente que réussira un jeune chercheur audacieux* [56]. Cela s'était passé tel qu'il l'avait dit, l'année suivante, de Broglie publia 3 notes qui annonçaient une nouvelle vision du monde, une idée de l'Onde de Matière. Mais, M.Brillouin pensait que *ce jeune chercheur audacieux* devrait être son fils Léon Brillouin. Car dans l'aperçu des travaux scientifique en 1921, après avoir résumé ses travaux sur la théorie des quanta, M.Brillouin écrivit que: *Il suffit d'étendre à l'ensemble des vibrations matérielles et électromagnétiques du milieu solide-éther, des propositions depuis longtemps classiques en optique pure. Une partie des raisonnements a été depuis, repris, transformé et un résultat incomplet a été complété par mon fils aîné, dans un travail important et très pénétrant, par des méthodes tout à fait différentes des miennes* [57].

Jusqu'à maintenant, j'envisageais l'hypothèse des quanta de lumière par de Broglie au cours de la formation de l'idée de l'Onde de Matière, mais il faut ajouter l'influence de la relativité : il est bien connu que de Broglie utilisa la relativité dans sa théorie de l'Onde de Matière. Pourtant, Brillouin ne mentionna rien de la relativité, loin de là, il utilisa le mot *l'éther du vide* dans son article de 1922.

La théorie des quanta de Brillouin ne porta pas beaucoup de fruits, mais elle nous raconte comment un physicien important à cette époque interprétait la théorie des quanta. Il devrait être intéressant de rechercher la théorie de Brillouin elle-même qui est un exemple d'une façon classique contre une théorie nouvelle. Le fils de Brillouin, Léon Brillouin, contemporain de de Broglie aussi publia un livre sous le titre *Théorie des quanta et l'atome de Bohr* [58] en 1922 que nous ne pouvons pas ignorer dans l'histoire de la théorie des quanta en France. Ce travail sera examiné en une autre occasion, dans le contexte plus général de la formation de l'idée de de Broglie et les études française de ses contemporains.

En terminant cet article, je voudrais exprimer ma gratitude envers la Fondation qui m'a donné l'occasion de présenter ce sujet historique à l'occasion du colloque: 80 ans de l'Onde de Matière et 30 ans de la Fondation Louis de Broglie. Je présente mes remerciements à Sigeko Nisio et Eisui Uematsu pour leurs suggestions précieuses.

Références

- [1] L.de Broglie:*Recherche sur la théorie des quanta*, 3^{ème} édition, Fondation Louis de Broglie,(1992)
- [2] G.Lochak:*Louis de Broglie*, Flammarion (1992)
- [3] B.Wheaton: *The Tiger and the Shark*, Cambridge, (1983) pp.263-283
- [4] J.Mehra: *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer-Verlag, vol.1. part 2,(1982)pp.578-581, ibid. vol.5. part1, (1987)pp. 265-273
D.Pestre: *Physique et physiciens en France 1918-1940*, Editions des Archives Contemporaines,(1984)pp.111-112, pp.114-115
- [5] M.C.Bustamante: "Rayonnement et quanta en France:1900-1914", *Physis*, vol.XXXIX,(2002)pp.63-107
- [6] B.Bensaude-Vincent: "Paul Langevin and the French Scientists at the Solvay Conferences",*The Solvay Councils and the Birth of Modern Physics*, Birkhäuser Verlag,(1999)pp.35-47
- [7] *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)
- [8] L. de Broglie:*Certitudes et incertitudes de la Science*, Albin Michel, Paris (1966) pp.13-14
- [9] Référence [2] p.60
- [10] *La structure de la matière, Les Rapports et discussions du Deuxième Conseil de Physique Solvay*, Gauthier-Villars, Paris,(1921)
- [11] *Atomes et Electrons, Les Rapports et discussions du Troisième Conseil de Physique Solvay*, Gauthier-Villars, Paris, (1923)
- [12] *Constitution de la Matière, conférences faites en 1912*, Gauthier-Villars, Paris (1913)
- [13] H.Poincaré: "Les rapports de la matière et de l'éther", ibid., pp.357-370
- [14] M.Curie: "Les rayonnements des corps radioactifs", ibid., pp.272-331
- [15] J.Perrin: "Les preuves de la réalité moléculaire", ibid., pp.1-53
- [16] P.Langevin: "Les grains d'électricité et la dynamique électromagnétique", ibid., pp.54-114
- [17] E.Bauer: "Les quantités élémentaires d'énergie et d'action", ibid., pp.115-147

- [18] E.Bauer:*La théorie de Bohr*, Hermann, Paris, (1922)
- [19] référence [5] p.73
- [20] E.Bauer: “Recherches sur le rayonnement”, *ACP*, 8ème série, tome XXXIX (1913)pp.373-454
- [21] référence [5] p.84
- [22] E.Bloch: “La théorie électrique des métaux”, *Constitution de la Matière, conférences faites en 1912*, Gauthier-Villars, Paris, (1913), pp.148-191
- [23] Selon la référence [4] Pestre: p.104, il commença le cours sur la théorie des quanta à partir de 1926. E.Bloch : *L'ancienne et la nouvelle théorie des quanta*, Hermann, Paris,(1930)
- [24] *Physique moléculaire, conférences faites en 1913-14*, Gauthier -Villars, Paris, (1914)
- [25] M.Curie: “Les radio-éléments et leur classification”, *ibid.*, pp.100-126
- [26] M.de Broglie:“Les progrès de nos connaissances concernant les rayons de Röntgen”, *ibid.*,pp.47-73
- [27] P.Langevin: “La physique du discontinu”, *ibid.*,pp.1-46
- [28] P.Langevin:*La physique depuis vingt ans*, Gaston DION, Pairs (1923) pp.189-264
- [29] N.Bohr: “On the Constitution of Atoms and Molecules” *Phil.Mag.*, **26**, (1913) pp.1-25, pp.476-502, pp.857-875
- [30] Considérant que Sommerfeld a développé la théorie de Bohr du 1915 au 1916, il est difficile de penser que la théorie de Bohr était introduite en France avant le Première Guerre mondiale.
L’adaptation de la théorie de Bohr en Allemagne et la relation entre la théorie de Bohr et Sommerfeld sont traités l’article ci-dessous.
Sigeko Nisio: “The Formation of the Sommerfeld Quantum Theory of 1916”, *Jap. Stud.Hist.Sci.*, No.12, (1973)pp.54-60
- [31] L.Bloch:“Quelques récents progrès de la physique (1914-1918)”, *Revue générale des sciences*, mars, (1918) pp.166-175, avril, (1918) pp.198-208
- [32] N.Bohr: “Effet des champs électrique et magnétique sur les raies spectrales”, *Phil.Mag.*, t.XXVII, (1914)p.506
- [33] N.Bohr: “Sur les séries spectrales de l’hydrogène et la structure de l’atome”, *Phil.Mag.*,t.XXIX,(1915)p.332
- [34] A.Sommerfeld: “Théorie des quanta de rayonnement et la structure de l’atome”, *Ann.der Phys.*, t.LI,Partie I , II, et III (1916) p.1.p.44,p.125
- [35] A.Einstein: “Théorie des quanta et rayonnement”, *Phys. Zeitsch.*, t.XVIII,(1917)p.121
- [36] K.Schwarzschild: “Sur l’hypothèse des quata”, *Berl. Ber.*, (1916) p.548

- [37] Société Française de Physique, *Procès-verbaux et résumé des communications* n°126(1919)p.5
- [38] L.de Broglie:Savants et Découvertes, Albin Miches, (1951) pp.262-265, M.Jammer: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*,McGraw-Hill,(1966)p.246,A.Langevin : *Mon père*, EFR, (1971)p.87,référence[4]Mehr:p.580, Pestre:p.55. p.119, B.Bensaude-Vincent:*Langevin*, Belin,(1987)p.161, p.164, référence [2] p.75
- [39] Voici les articles sur la bibliothèque de Louis de Broglie.
G.Lochak: “Le testament de Louis de Broglie pour ses papiers scientifique et sa bibliothèque”,*Ann.de.F.L.de Broglie*, vol.18, n°4,(1993) pp.355-357, C. Demeulenaere-Douyère: “Les archives de Louis de Broglie”, *ibid.*,pp.359-361,A.S.Guénoun,G.Lochak: “La bibliothèque de Louis de Broglie”, *ibid.*,pp.363-367
- [40] Archives de l’Académie des Sciences:*Inventaire détaillé du fonds Louis de Broglie* (42J),Paris (1992)
- [41] Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de Ville de Paris: *Inventaire du fonds Paul Langevin*,Paris,(1983)
- [42] C.Kojima: “Notes prises par Louis de Broglie lors des cours de Paul Langevin au Collège de France sur la théorie des quanta (1ère partie)”, *Ann.de.F.L de Broglie*, Vol21, n°1,(1996)pp.81-89, “Notes prises par Louis de Broglie lors des cours de Paul Langevin au Collège de France sur la théorie des quanta (2ème partie)”*ibid.* Vol21, n°3, (1996)pp.335-343,
- [43] référence [4] Pestre: p.119
- [44] N.Bohr: “On the Quantum Theory of Line Spectra”, *D.Kgl.Danske Vidensk.Selsk.Scrifler, Naturvidensk.og Mathem.Afd.*,**8** Raekke, IV.1,(1918)pp.1-36, pp.37-100
- [45] A.Einstein: “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, *Ann.d.Phys.*,(4), **17**, (1905)pp.132-148,“Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems”, *Phys.Zeits.*,**10**,(1919)pp.185-193, Quantentheorie der Strahlung”, *Phys.Zeits.*,**18**, (1917)pp.121-128
- [46] référence [31] p.208
- [47] L’idée de Langevin sur l’hypothèse des quanta de lumière sont traitée dans la référence [42], 2ème partie.
- [48] référence [5] p.71
- [49] [49] *ibid.*, p.75
- [50] P.Langevin:*Jubilé scientifique de Marcel Brillouin* (Allocution prononcées à la cérémonie du 17 déc.1935), Paris, Gauthier- Villars,(1936)p.24

- [51] référence [3] pp.287-288, référence [4].Mehra: p.590, référence [38] M.Jammer: p.242, O.Darrigol: “Strangeness and Soundness in Louis de Broglie’s Early Works”, *Physis*, Vol.**XXX**, (1993)p.327, “Les premiers travaux de Louis de Broglie”*La découverte des ondes de matière*, Lavoisier,Paris (1994)p.46
- [52] L.de Broglie:“Onde et quanta”, *Compte Rendus*, **177**, (1923)p.507
- [53] L.de Broglie: “Nouvelle dynamique des quanta”, *Rapport et discussions du V^e Conseil de Physique Solvay*, Gauthier-Villars (1928) p.105.
- [54] M.Brillouin:“Actions mécaniques à hérédité discontinue par propagation”, *Compte Rendu*, **168**(1919) pp. 1318-1320, “Actions héréditaires discontinues et équations différentielles qui en résultent”, *Congrès Int.de Math.Strasbourg* (1920) pp.526-533, “Action à hérédité discontinue et raies spectrales”, *Compte Rendue*, **171** (1920) pp.1000-1002, “Atome de Bohr. Fonction de Lagrange circum-nucléaire”, *Compte Rendue*, **173**(1921) pp.639-641, “Atome de Bohr. Fonction de Lagrange circumnucléaire”, *J.de Physique*, **3** (1922) pp.65-73
- [55] *Trente ans d’enseignement au Collège de France, 1900-1931, Résumé des leçon de chaque année scolaire*. Archives de l’Académie des Sciences.Dossier Marcel Brillouin.
- [56] référence [54] M.Brillouin:(1922) p.73
- [57] *Aperçu des Travaux scientifiques publiés par Mr.Brillouin, Professeur de physique Mathématique au Collège de France, Oct-Nov. 1921*
- [58] L.Brillouin:*Théorie des quanta et l’atome de Bohr*, Press Universitaire de France (1922)

Manuscrit reçu le 26 avril 2004.