

## Louis de Broglie, physicien indépendant <sup>1</sup>

CHIEKO KOJIMA

Université Nihon, faculté de commerce

Le physicien français Louis de Broglie (1872-1987), connu pour les ondes de matière, a d'abord étudié l'histoire à l'université. Il s'est orienté vers des études de physique sous l'influence de son frère Maurice de Broglie (1875-1960) qui poursuivait ses recherches expérimentales sur les rayons X. Quand Louis de Broglie a lu les rapports du premier Conseil de Physique Solvay de 1911<sup>2</sup>, compilés par son frère et Paul Langevin (1872-1946), la nouvelle théorie du quanta fut une révélation pour lui.<sup>3</sup> Pendant la première guerre mondiale, il a été affecté, pour son service militaire, à la radio télégraphie sans fil de la Tour-Eiffel. En 1919, il a commencé des recherches sur les rayons X dans le laboratoire de son frère. Pour la première fois en 1920, tardivement à l'âge de 28 ans, il a fait son article sur l'absorption des rayons X par la matière. C'était il y a 102 ans.<sup>4</sup> Depuis, jusqu'en 1922, il a poursuivi principalement ses recherches expérimentales sur les rayons X. Il a expliqué, dans un article en 1923, ses idées sur l'existence d'ondes associées aux corpuscules de matière.

Sur la théorie des quanta, Louis de Broglie s'est mis à l'écart de celle

---

<sup>1</sup>Cet article en version japonaise a été publié dans le journal de la société physique japonaise.

C.Kojima : 'Louis de Broglie, physicien indépendant', *le journal de la société physique japonaise*, Vol.75.No.8 (2020)pp.509-512.

<sup>2</sup> *Théorie du rayonnement et les quanta. Rapport et discussions de réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911* (Gauthier-Villars, 1912). Traduit et expliqué par Kazunari Ogawa (Edition université Tokai, 1983)

<sup>3</sup> L. de Broglie, *Certitudes et incertitudes de la science* (Albin Michel, 1966) pp.13-14

<sup>4</sup> Le de Broglie, *Comptes Rendus*, 170. 585 (1920) – Sur le calcul des fréquences limites d'absorption K et L des éléments lourdes.

de l'école de Copenhague.<sup>5</sup> De glorieuse ascendance noble, et célibataire toute sa vie, il a été considéré comme une personne qui vit au-dessus des affaires du monde. Georges Lochak (1930-2021), un de ses plus proches collaborateurs, est le seul physicien vivant qui l'a connu, pendant 30 ans, tant en public qu'en privé.<sup>6</sup> Dans le cadre de la transmission orale (oral history), l'auteur a eu l'occasion de s'entretenir avec Georges Lochak sur l'hypothèse décisive de Louis de Broglie, sur l'influence de ses recherches après la découverte de la mécanique ondulatoire et sur ses séminaires.<sup>7</sup> En s'appuyant sur les archives, cet article est une réflexion sur les particularités de Louis de Broglie qui fut en position minoritaire après la proposition de sa théorie des ondes de matière.

## 1. Deux hypothèses sur les ondes de matière et leurs modifications

### 1-1 Atome de lumière

Pour la première fois en 1923, quand Louis de Broglie a exposé ses idées sur les ondes de matière, il a attribué deux énergies à un mobile matériel de masse propre  $m_0$ . D'une part, d'après le principe de l'inertie de l'énergie, le mobile matériel doit posséder une énergie interne égale à  $m_0c^2$ . D'autre part, le principe des quanta conduit cette énergie interne à  $h\nu_0$ . Il a démontré que ces deux énergies sont égales.<sup>8</sup>

$$m_0c^2 = h\nu_0 \quad (1)$$

Ici,  $c$  est la vitesse de la lumière et  $h$  est la constante de Planck.

---

<sup>5</sup> Dans l'histoire de la recherche sur l'interprétation de Copenhague, chaque physicien interprète différemment la mécanique quantique. A ce jour, le point de vue dominant est que l'interprétation commune dite « de Copenhague » n'existe pas. D. Howard, *Philosophy of Science* 71, 669 (2004) ; Kohei Morita, *Recherche sur l'histoire scientifique de science philosophie* 8, 77 (2014). Dans le présent article, « l'école de Copenhague » désigne la position qui accepte le principe de complémentarité comme une caractéristique de la description des phénomènes par la théorie quantique. Elle est définie par l'expression « interprétation de Copenhague ».

<sup>6</sup> Lochak a rédigé la biographie de de Broglie. La traduction est publiée au Japon. G. Lochak, *Louis de Broglie* (Flammarion, 1991) : traduit par Hiroshi Utagaza « Louis de Broglie » (Kokudo sha, 1995)

<sup>7</sup> Dans le domaine de l'histoire scientifique consacré à la recherche orale (dit Oral History), AHQP (Archives for the History of Quantum Physics) possède d'importantes archives liées à l'histoire de la physique quantique. AHQP rassemble les documents depuis le début des années 1960, car il est nécessaire de les archiver pendant que les physiciens qui contribuent à la formation de la théorie quantique, sont vivants. A ce jour, compte tenu de la disparition importante des successeurs formés par les fondateurs de la théorie quantique, il est également crucial de les interviewer.

<sup>8</sup> L. de Broglie, *Comptes Rendus* 177, 507 (1923) – Ondes et quanta.

On peut dire que la formule (1) est un point de départ des ondes de matière, mais elle était déjà le résultat essentiel contenu dans son mémoire de 1922 sur les quanta de lumière. De Broglie a considéré le rayonnement noir en équilibre comme « des atomes de lumière », et la masse des atomes de lumière est supposée égale à  $m = \frac{h\nu}{c^2}$ .<sup>9</sup> C'est-à-dire qu'il a appliqué la formule des « quanta de lumière » d'Albert Einstein (1879-1955) au domaine des corpuscules matériels. En attribuant une masse du corpuscule à la formule, il l'a considérée comme « atome de lumière ». Il a ainsi trouvé que la quantité d'énergie obtenue par la relativité correspond à l'énergie de l'onde. Considérant « atome de lumière » comme de la matière, il est parvenu ainsi en 1923 à la formule (1). Autrement dit, son idée hardie, d'attribuer une masse à un atome de lumière, l'a conduit à la formule (1).

## 1.2 Energie interne et accord de phase avec l'onde de fréquence

De Broglie a considéré  $\nu_0$  de sa formule ? comme un phénomène périodique de fréquences internes du corpuscule. En reposant sur le principe de relativité restreinte, le corpuscule se meut par rapport à l'observateur fixe à une vitesse  $\nu = \beta c$  ( $\beta < 1$ ). En appliquant à ce mouvement la transformation Lorentz, on obtient  $\nu_1$ .

$$\nu_1 = \nu \sqrt{1 - \beta^2} = \left( \frac{m_0 c^2}{h} \right) \times \sqrt{1 - \beta^2} \quad (2)$$

De même, pour la masse des corpuscules, la transformation Lorentz donne  $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ . Avec cette équation et  $m_0 c^2 \nu_0$ , il est parvenu à  $\nu$ .

$$\nu = m_0 c^2 / h \sqrt{1 - \beta^2} \quad (3)$$

Avec ces deux fréquences différentes (2) et (3), de Broglie a supposé que la fréquence (3) se propage dans la même direction que le corpuscule à la vitesse  $c/\beta$  (plus vite que la lumière). Il a considéré cette fréquence comme une onde fictive associée au mouvement du corpuscule. En plus, il a démontré que si au temps  $t = 0$ , il y a accord de phase entre des fréquences internes du corpuscule  $\nu_1$  de (2) et l'onde fictive  $\nu$  de (3). Cet accord de phase subsistera au temps facultatif  $t$ . Il a considéré que cet accord de phase conduit à la coexistence d'ondes aux corpuscules. Ainsi, il a prouvé que la relation entre les ondes et les corpuscules reliant

<sup>9</sup> L. de Broglie, Journal de Physique, série VI, t III 422 (1922) – Rayonnement noir et quanta de lumière.

l'énergie du corpuscule interne à la fréquence de l'onde correspondante, établit une sorte de pont entre ces ondes et ces corpuscules.

### 1.3 Modification des hypothèses de de Broglie

Ses découvertes sur l'association d'ondes aux corpuscules contribuent à la naissance de la mécanique ondulatoire. Pour cela le rôle d'Einstein n'est pas négligeable.<sup>10</sup> Les théories de de Broglie sur l'association d'ondes aux corpuscules en 1923 ont été réunies sous forme d'une thèse soutenue en 1924.<sup>11</sup> Un des jurys Langevin envoya ces copies à Einstein qui décrit dans son article «Théorie quantique du gaz idéal monoatomique», paru en février 1925 (statistique Bose) les rapports étroits avec ses théories. Einstein cita la thèse de de Broglie, et proposa d'interpréter des phénomènes d'interférence à l'aspect ondulatoire transposés dans ses équations de fluctuation d'énergie.<sup>12</sup> L'article d'Einstein allait inciter Erwin Schrödinger (1887-1961) à examiner le contenu de la thèse de de Broglie, et l'amener à publier en janvier 1926 « La quantification envisagée comme problème de valeurs propres (volume I) » sur la mécanique ondulatoire.<sup>13</sup> Dans ses mémoires, il a laissé de côté les deux résultats mentionnés ci-dessus qui avaient initialement guidé de Broglie. Après la découverte de la mécanique ondulatoire, les idées novatrices de de Broglie ont été ensevelies dans l'histoire. Néanmoins, comme le chapitre suivant le montre, même après la formation de la mécanique ondulatoire, ses recherches reposent toujours sur les deux hypothèses.

## 2. Recherches après la découverte de la mécanique ondulatoire

### 2.1 5ème Conseil de Solvay en 1927

Schrödinger a attribué aux particules de matière un aspect ondulatoire, et il a démontré que cette formulation est équivalente à celle de la mécanique matricielle. Ensuite, la théorie de transformation d'Ernst Pascale Jordan (1902-1980) et celle de Paul Dirac (1902-1984) conduiront à la naissance de la mécanique quantique. On sait bien que le 5ème Conseil de Physique Solvay voit s'affronter Einstein et Niels Bohr (1885-1962) sur l'interprétation de la mécanique quantique.

<sup>10</sup> C. Kojima, Journal de la société de physique du Japon 60, 814 (2005)

<sup>11</sup> L. de Broglie, Ann. Phys. 3 (10), 22 (1925) – Recherches sur la théorie des quanta

<sup>12</sup> A. Einstein : S. B. Preuss. Akad. Ziss. phys-math. Klasse 13, 3 (1925) – Quantentheorie des einatomigen idealen Gases (Zweite Abhandlung).

<sup>13</sup> Dans le volume II, Schrödinger, en citant la thèse de de Broglie, écrit que ce dernier l'a fortement influencé. E. Schrödinger, Ann. Phys. 79(4). 489 (1926) – Quantisierung als Eigenwertproblem II.

A Solvay, de Broglie a exposé sa théorie de l'onde pilote, appelée également dualité onde-corpuscule.<sup>14</sup> Mais la théorie qu'il proposait était loin d'être admise, sauf par Einstein.<sup>15</sup> Sa théorie de l'onde pilote provient de ses idées sur les ondes de matière. Son idée de l'association d'ondes aux corpuscules a été gardée dans l'onde pilote. Il a interprété les deux solutions reliées à l'onde de Schrödinger (son équation) et à l'onde définissant le corpuscule représenté par une singularité, ce qui permet ainsi de constater l'accord des phases. Quant à l'interprétation de Copenhague, la dualité onde-corpuscule est considérée comme le principe de complémentarité entre les points de vue ondulatoire et corpusculaire. De ce fait, la théorie de l'onde pilote présentée par de Broglie reçut un accueil réservé. Déçu, il abandonna cette théorie pendant longtemps.

## 2.2 Mécanique ondulatoire du photon (des années 1930 jusqu'au début 1950)

Dans les années 1930, à la recherche d'une équation des ondes du photon à identique à celle des ondes des corpuscules, de Broglie a introduit l'idée que le photon serait équivalent à la fusion de deux particules neutres de Dirac. De Broglie a considéré le photon comme une paire formée par les neutrinos et les antineutrinos. Il a pensé que le photon avait une masse comme écrit dans sa théorie de 1922.<sup>16</sup> On dirait que ces idées ont influencé la théorie de la particule composite de Fermi-Yang.<sup>17</sup> Le photon possédant la masse a été considéré comme une hypothèse particulière de de Broglie.

## 2.3 Onde pilote, retour à la théorie de la dualité onde-corpuscule (après 1952)

En 1952, année du soixantième anniversaire de de Broglie, David Bohm (1917-1992) a présenté l'interprétation causale sur la mécanique quantique, en opposition à celle de Copenhague, de Broglie ayant déjà développé la théorie de l'onde pilote.<sup>18</sup> De ce fait, de Broglie est revenu

<sup>14</sup> L. de Broglie, « Nouvelle dynamique des quanta », *Electron et photon, rapport et discussion du V<sup>e</sup> de conseil de la Physique Solvay* (Gauthier-Villars, 1928) pp. 105-141.

<sup>15</sup> L. de Broglie, *Nouvelle perspectives en microphysique* (Albin Michel, 1956) pp. 232-237.

<sup>16</sup> De Broglie a réuni ses théories dans son livre suivant. L. de Broglie, *Une nouvelle théorie de la Lumière, la Mécanique ondulatoire du photon* (Hermann, 1940).

<sup>17</sup> T. Takabayashi, « Fondateurs du physique moderne » (Misuzu shobou, 1985) p. 238

<sup>18</sup> D. Bohm, *Phys. Rev.* 85, 166 (1952) – A Suggested Interpretation of the

sur sa théorie en 1927 et, avec l'équation non linéaire, a essayé de traiter la transition quantique comme un processus physique réel. C'est-à-dire qu'il est revenu à ses idées quand il a proposé la théorie des ondes de matière : le corpuscule doit rester en phase avec une onde qui l'environne, l'accord des phases impliquant une relation bien définie entre la propagation de l'onde et le mouvement du corpuscule. Il a ainsi proposé une conception claire de l'espace-temps de la réalité physique qui soit indépendante de l'observateur.<sup>19</sup>

### 3. Séminaire de de Broglie

Même après la découverte de la mécanique ondulatoire, de Broglie a poursuivi ses propres hypothèses « atome de lumière » et « assimilation de l'énergie interne à ses ondes de phase ». En ce qui concerne la mécanique quantique, son interprétation était différente de celle de Copenhague. Existait-il une école qui soutint les idées de de Broglie en France ? En 1929, il a obtenu le prix Nobel de physique, et a été accueilli en 1933 à l'Académie des sciences, dont il devint en 1942 secrétaire perpétuel jusqu'en 1975. On a l'impression que son rôle fut crucial dans la communauté scientifique en France.

Cependant, lors d'un entretien avec l'auteur, Lochak a raconté que « de Broglie était toujours minoritaire ». Il restait isolé parce que, depuis le retour à son ancienne interprétation, ses recherches étaient différentes de celles de l'interprétation de Copenhague. En effet, en 1954 quand Lochak était étudiant, des physiciens français, malgré les apparences, lui conseillèrent pour son avenir, et sur un ton confidentiel, de ne pas suivre les idées de Broglie.

Désormais, on donne les noms des élèves de de Broglie qui ont suivi ses cours à l'institut Henri Poincaré jusqu'en 1962, date de sa retraite. Ses premiers cours débutés en 1928 se trouvent dans « *Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire* » (Hermann, 1930), et sont traduits également en japonais.<sup>20</sup> A son séminaire, ouvert en 1931 à l'institut Henri Poincaré, se trouvent ses deux plus brillants élèves, à savoir Marie-Antoinette Tonnelat (1912-1980) et Olivier Costa de Beauregard (1911-

---

Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. I ; Phys. Rev. 85, 180 (1952) – A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. II.

<sup>19</sup> De Broglie a réuni ses théories dans son livre suivant. L. de Broglie, *Une tentative d'interprétation causale et nonlinéaire de Mécanique ondulatoire* (Gautier-Villars, 1956)

<sup>20</sup> Ecrit par Louis de Broglie, traduit par Kei Watanabe « Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire » (Librarie Iwanami, 1934)

2007). Des physiciens renommés sont invités à faire des conférences, à commencer par Einstein, Max Born (1882-1970), Dirac, etc. Depuis que de Broglie est revenu à son ancienne théorie, Bohm et Takehiko Takabayashi (1919-1999) ont assisté à ses séminaires. Lochak, impressionné par la compétence de calcul de Takabayashi, a utilisé l'expression « mystère asiatique ».<sup>21</sup>

Après sa retraite, de Broglie a continué à organiser des séminaires destinés à un petit groupe au bureau du secrétaire perpétuel à l'Académie des sciences. Lochak a assisté à tous les séminaires. Il a raconté ses souvenirs à l'auteur comme ci-dessous.

« Je ne pense pas que l'école de de Broglie, équivalente à celle de Copenhague, a existé. Cette dernière se concentre sur une idée commune de la mécanique quantique. En revanche, de Broglie n'a pas réuni son groupe autour d'une idée précise. Lors du séminaire à l'institut Henri Poincaré, il a écouté plusieurs sujets, et n'a pas imposé ses idées aux différents intervenants. Les autres séminaires organisés jusqu'en 1975 au bureau du secrétaire perpétuel avec environ 6 participants sont mes plus beaux souvenirs. S'y trouvent les membres les plus proches de de Broglie et des invités. De Broglie leur a demandé leur avis sur ses interrogations et nous avons pu librement prendre la parole. Ce ne fut pas une question d'accord entre nous. »

D'un point de vue différent, ce séminaire a fait l'objet de critiques comme celle d'être fermé aux autres. De Broglie, à plus de 80 ans, a pensé qu'un lieu où on discute, où on expose librement ses résultats était nécessaire, et cela, sans avoir à appartenir à une grande organisation de recherche.

Sans créer son école, de Broglie s'est consacré à ses propres recherches. En 1973, au cinquantième anniversaire de la présentation de la théorie des ondes de matière, le centre de recherche Fondation Louis de Broglie (FLB) a été créé à Paris avec l'argent du prix Nobel.<sup>22</sup> A partir de 1933, l'Académie des sciences a sélectionné environ 3 000 de ses ouvrages, dont quelques 1 200 ouvrages scientifiques stockés à la Fondation Louis de

---

<sup>21</sup> Lochak et d'autres expliquent les projets de de Broglie à partir de 1952 dans le livre suivant ; J. Andrade e Sukva et G. Lochak, *Quanta, grains et champs* (Hachette, 1969). Il est traduit par Takehiko Takabayashi et Masaya Aramaki « Quanta » (Heibon sha, 1969)

<sup>22</sup> L'adresse officielle se trouve à l'Académie des Sciences, 23 Quai de Conti 75006 Paris, mais l'adresse réelle est au 23, rue Marsoulan, 75012 Paris. Dans les Annales de la Fondation Louis de Broglie, le vol 42 numéro 1 en 2017 est consacré au 90e anniversaire de l'onde pilote formulée par de Broglie.

Broglie. Le premier directeur de la Fondation Louis de Broglie était Louis Néel (1904-2000) prix Nobel de physique, et le deuxième, René Thom (1923-2002). A partir de 2001, Lochak fut le poste de troisième directeur. Dans ce petit établissement de recherche, j'espère que la volonté de de Broglie se transmettra de génération en génération.

Je ne sais pas comment remercier M. Lochak qui m'a acceptée à la Fondation comme boursière du gouvernement français en 1991. La rencontre avec M. Lochak est le trésor de ma vie.