

Louis de Broglie, le grand voile et la réalité

O. COSTA DE BEAUREGARD

Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris

1. *Il a soulevé un coin du grand voile*, écrivit Einstein dans sa lettre du 16-11-24 à Langevin qui lui avait envoyé un exemplaire de la Thèse de Louis de Broglie [1]. Et en effet, cette découverte de l'onde de matière faite grâce à une relecture et à une recombinaison d'équations, avec un nouveau regard, compte parmi les plus impressionnantes prédictions de la physique mathématique. Aussi, le court mémoire de de Broglie, élégamment pensé et écrit, est-il un chef d'oeuvre qui fait date dans la littérature scientifique.

Il part d'un survol historique des concepts antagonistes d'onde et de particule en optique, jusqu'aux temps nouveaux des quanta et du photon d'Einstein, magistralement mis en évidence dans le *Laboratoire des rayons X* de Maurice de Broglie. On indique le rôle joué par la relativité.

Le chapitre 1 débute avec l'hypothèse de l'onde de matière et l'énigme d'une phase plus rapide que la lumière, résolu grâce au concept de vitesse de groupe et à une aide décisive de la relativité. Le chapitre 2 identifie les principes extrémaux de la mécanique et de l'optique et relie la quadrifréquence de l'électron à sa quadri-impulsion, à l'aide de la loi des quanta de Planck-Einstein. Tout cela d'un pas alerte.

Ensuite, les chapitres 3 et 4 relient la règle de quantification de Bohr-Sommerfeld à la résonance de l'onde de matière avec elle-même.

Le chapitre 5 suggère que le photon pourrait-être une vraie particule, avec une masse au repos extrêmement petite. Le chapitre 6 discute de la diffusion des rayons X et γ .

Le chapitre 7, intitulé *La mécanique statistique et les quanta*, discute de la théorie cinétique des gaz et du rayonnement du corps noir. Il

devrait attirer l'attention des historiens des sciences et être relu à la lumière des travaux postérieurs d'Einstein dans les mêmes domaines. Les statistiques et les quanta sont des mots qui résonnent d'une façon inquiétante et nous allons y revenir; mais auparavant, je dois rappeler comment Louis de Broglie est venu à la physique théorique car c'est assez inusuel.

2. Le Congrès Solvay de 1911 avait réuni les plus hautes sommités de la physique fondamentale; Maurice de Broglie, l'expérimentateur, en fut l'un des secrétaires et rapporta à Paris les notes du Congrès pour préparer les Comptes rendus. Son jeune frère Louis, son cadet de 18 ans, étudiait alors l'histoire et le droit. Maurice lui demanda son aide pour mettre en ordre les papiers et Louis fut fasciné par la nature des discussions. Grâce à ses connaissances historiques, il savait que Newton s'était représenté la lumière comme un flot de particules et qu'il avait utilisé un argument de périodicité pour expliquer les interférences qu'il avait observées. Plus tard, en développant le paradigme opposé de Huygens et de Young, Fresnel devait établir la théorie ondulatoire de la lumière.

Des preuves abondantes de l'équivalence de Planck-Einstein entre l'énergie et la fréquence se trouvaient dans les notes du Conseil Solvay et une intuition jaillit dans l'esprit de Louis: se pourrait-il que la quantification de l'énergie des oscillateurs soit une sorte de phénomène de résonance ? Se pourrait-il que les représentations de la lumière de Newton et de Fresnel soient toutes deux vraies ? Et se pourrait-il que le dualisme onde-particule existe aussi pour la matière ? Bien entendu, dans le *Laboratoire des rayons X* de Maurice de Broglie, ondes et particules, particules et ondes étaient des mots indéfiniment épelés et des concepts qui jouaient sans cesse l'un avec l'autre.

En conséquence, Louis de Broglie, âgé de 19 ans, abandonna tout le reste et se convertit à la physique fondamentale. Il s'inscrivit à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris pour devenir un membre à part entière de la confrérie. Il trouva alors plus qu'il n'avait espéré: l'analogie formelle entre l'optique géométrique et la mécanique analytique (remarquée par Hamilton) avec, cependant, l'enigme de la vitesse de phase au dénominateur du principe extrême de Fermat et la vitesse de la particule au numérateur du principe de Hamilton. Pour de Broglie, cela signifiait que sa conjecture avait un sens. De 1914 à 1918, il servit sous le Général Ferrié, dans la radio militaire à la Tour Eiffel. Juste une anecdote: il arriva ainsi qu'il fut le premier à connaître la nouvelle de la

capitulation allemande. 1918 le ramena à la physique, lisant ou écoutant Poincaré et Langevin, suivant ce qui se faisait dans le laboratoire de son frère. Alors commença ce que j'ai raconté plus haut et qui se terminait par les mots *les statistiques et les quanta*.

3. En 1926 (c'est incroyable comme les choses allaient vite en ce temps là) Born, bientôt suivi par Jordan, proposa *l'interprétation statistique du dualisme onde-particule*, recette de calcul efficace mais objet de disputes qui se poursuivent féroce­ment jusqu'à nos jours. Dès 1927, au Cinquième Conseil Solvay, où Louis de Broglie [2] présenta son interprétation réaliste de la mécanique ondulatoire, Einstein [3] avait perçu la gravité du défi. Sa sensibilité et celle de de Broglie étaient très proches sur ce point, je puis en témoigner.

Le petit apologue de de Broglie [4] sur une boule et deux boîtes, très semblable à l'argument d'Einstein [3] au Conseil Solvay, est le suivant : si, à Berlin, on enferme une boule dans l'une de deux boîtes, qu'on expédie respectivement à Atlanta et à Capetown, chacun des deux destinataires, quand il ouvre sa boîte, en infère aussitôt ce que l'autre a trouvé. Bien que ce raisonnement zigzague dans l'espace-temps, le long de ABC ou de CBA, la causalité physique progresse en avant vers A et C, venant de B où, pour ainsi dire, les dés sont jetés.

Mais la recette de Born-Jordan dit quelque chose d'autre, qui est paradoxal : en B, c'est une superposition d'amplitudes et non une somme de probabilités qui est en jeu, si bien que ce qui apparaît en A et en C ne peut pas avoir pré­existé en B ! Ainsi, l'hypothèse apparemment innocente de Born que l'intensité de l'onde mesure la probabilité de présence lance un défi inattendu au concept même de réalité physique ; encore pire, peut-être, il laisse entrevoir une possibilité de rétrocausalité ! L'argument EPR [5] de 1935 soulève à nouveau ces problèmes.

La *non-séparabilité* est le vocable à la mode de cette phénoménologie qui peut s'exprimer sous une forme concise, qui est Lorentz et CPT invariante, et peut être testée dans des *expériences à décision différée*. Souvent je me demande comment Einstein et de Broglie auraient réagi devant des expériences à décision différée.

4. Comme Einstein, de Broglie était un réaliste consacré, ainsi que des citations de lui le montreront clairement. Elles sont tout à fait en accord avec les idées qu'il avait exprimées en 1927 au Conseil Solvay. Les citations suivantes sont de 1963 et 1964:

Depuis plus de trente ans, les physiciens théoriciens se sont, en grande majorité, ralliés à une interprétation de la physique quantique et de la mécanique ondulatoire qui dérive des idées introduites naguère par M. Bohr et ceux qui l'ont suivi (Ecole de Copenhague). Cette interprétation paraît s'adapter d'une manière parfaite aux formalismes élégants et précis actuellement utilisés en mécanique quantique, formalismes dont les prévisions sont généralement très exactement vérifiées par l'expérience.

Bien qu'après mes premiers travaux sur la mécanique ondulatoire j'aie formulé au sujet du dualisme des ondes et des particules des idées tout à fait différentes de celles que l'Ecole de Copenhague commençait à répandre, j'ai été bientôt arrêté dans cette voie par de grandes difficultés et j'ai finalement admis l'interprétation devenue aujourd'hui orthodoxe que j'ai ensuite longtemps enseignée. Mais depuis une dizaine d'années, revenant à mes conceptions primitives, je suis arrivé à la conviction que les formalismes usuels, bien qu'en apparence rigoureux et conduisant à des conclusions exactes, ne donnent pas une vue profonde et véritablement explicative de la réalité physique aux très petites échelles.
[7]

Depuis environ douze ans, j'ai repris une tentative d'interprétation de la mécanique ondulatoire que, sous les noms de théorie de l'onde - pilote, puis de théorie de la double solution, j'avais proposé sans succès en 1926-1927 peu de temps après ma thèse de doctorat. Des réflexions prolongées sur ce sujet me conduisent maintenant à affirmer que l'interprétation actuellement admise de la mécanique quantique n'apporte pas véritablement d'explication raisonnable de certains faits expérimentaux essentiels et incontestables et que, par suite, elle doit être révisée en rétablissant la constante localisation du corpuscule dans l'espace au cours du temps, en rendant à l'onde qui l'accompagne le caractère d'une réalité physique et en postulant l'existence entre l'onde et le corpuscule d'une liaison appropriée.[8]

Compte tenu des événements survenus depuis lors, dont, en premier lieu, bien sûr, l'apparition du théorème de Bell [9], je suis certain que ces mots évoquent aux oreilles de certains des sonorités bienvenues et familières. Peut-être même les mânes d'Einstein, de Schrödinger et de Bell les entendent-elles et s'en réjouissent. Mais beaucoup savent que ma religion est différente. Mes commentaires personnels au sujet de ces deux citations seraient les suivants : comme Einstein, de Broglie tient pour indubitable que la particule possède une réalité permanente, alors

qu'il me semble que le formalisme et l'expérience assimileraient plutôt cette *seconde quantification* à des gouttes tombant d'une pipette.

Quant à l'onde, j'y verrais plutôt une information se propageant de façon covariante à travers ce que nous formalisons comme l'espace-temps. Je peux certifier que pour de Broglie les argumentations purement formelles étaient a priori suspectes et que pour lui la covariance explicite de l'espace-temps était beaucoup moins importante qu'une foi inébranlable dans l'hypothèse de la **réalité microscopique**. Comme on peut le remarquer, ses mots *localisation dans l'espace au cours du temps* ne sont pas du style de ceux utilisés, disons, dans les formalisations covariantes de Schwinger ou de Feynman: je peux témoigner que l'avènement de celles-ci (et leurs similarités avec les idées que je défendais auprès de lui sans grand succès) fut pour lui très inattendu.

5. Lorsque j'ai commencé à travailler avec Louis de Broglie en novembre 1940, il enseignait *l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique*, qu'il comprenait en profondeur. Elle était alors exprimée dans le formalisme non relativiste de Schrödinger-Heisenberg, privilégiant le temps et l'énergie vis à vis de l'espace et de l'impulsion. De Broglie voyait là un indice d'un *conflit essentiel entre la relativité et les quanta* que sa *mécanique ondulatoire de 1924* avait si harmonieusement unifiés. Curieusement, il résistait fortement à l'idée d'essayer une nouvelle fois ce qui avait alors réussi – et qui allait réussir à nouveau: s'appuyer sur l'invariance explicite de l'espace-temps.

Peut-être une raison de sa réticence était-elle (comme cela ressortait des discussions que nous avons eues sur le paradoxe E.P.R.) que l'interprétation covariante de *l'interférence des probabilités* mène tout droit au concept de rétrocausalité, ce qui était tout simplement impensable pour Einstein et pour Louis de Broglie ainsi que leurs écrits le montrent. Pour eux, réalisme et causalité retardée étaient également incontestables.

6. *Bref survol des autres travaux de de Broglie*. La théorie du photon massif de de Broglie [10] précède les formalismes du spin 1 de Proca et de Petiau–Duffin–Kemmer. Son livre [11] sur ce sujet est d'une lecture très intéressante. En électrodynamique quantique, l'utilisation transitoire de la masse au repos du photon aide à la discussion des problèmes de self-énergie [12]. Il permet aussi l'utilisation de la condition de Lorentz sous forme opératoire [11] [12].

De Broglie construit son photon de spin 1 par *fusion* de deux particules de spin 1/2; par la suite il a étendu cette méthode à des états de spins plus élevés.

En 1951, les travaux de Vigier [13] et de Bohm [14] persuadent de Broglie que ses anciennes réflexions, qu'il avait exposées au 5-ème Congrès Solvay, pouvaient être physiquement valables. Réorientant ses pensées, il consacre à partir de ce moment beaucoup de temps à réfléchir dans cette direction, soit sous la forme de la *théorie du guidage* soit sous la forme plus élaborée d'une onde portant une singularité. Une *seconde génération de collaborateurs* se rassemble alors autour de lui. John Bell [15] a de nombreuses fois affirmé sa sympathie pour cette approche. Je renvoie pour cela aux synthèses de de Broglie.

7. Souvenirs personnels. Louis de Broglie fut professeur de physique théorique à l'Institut Henri Poincaré, donnant un cours régulier de mécanique quantique dont le sujet variait chaque année; ce cours était souvent édité ensuite et nous avons trouvé dans ces livres nombre de nos connaissances.

A l'Institut Henri Poincaré, Louis de Broglie avait un bureau où il nous recevait pour discuter, soit seul, soit en petit groupe. Nous lui soumettions nos travaux qu'il lisait très soigneusement, nous les rendant couverts de notes manuscrites. Comme il connaissait beaucoup de physique classique et quantique et qu'il y avait beaucoup réfléchi, nous apprenions beaucoup de lui à notre tour et profitions de son aide pour mettre nos travaux sous forme publiable.

Il dirigeait bien sûr un séminaire, le mardi après-midi, dont les conférenciers provenaient aussi bien de son groupe que de l'extérieur.

Je ressens beaucoup de reconnaissance pour les soins attentifs qu'il prodiguait à chacun d'entre nous et pour la grande qualité et la profondeur de vue de l'enseignement qu'il nous donnait.

Bien sûr, de temps en temps, un différent pouvait survenir; s'il arrivait que nous ayons raison, il pouvait s'ensuivre une longue discussion, pas à pas, pour convaincre Louis de Broglie; j'ai gardé le souvenir vivace de quelques cas de ce type.

Et s'il arrivait que les positions respectives soient inconciliables, alors on se trouvait dans une position difficile: tout dialogue scientifique, même sur d'autres sujets, devenait impossible. C'est ce qui m'est arrivé en 1951, quand Louis de Broglie revint ouvertement au paradigme du déterminisme caché de la mécanique quantique, et que je persistai dans

la dérivation des conséquences logiques d'un formalisme explicitement quantique et relativiste. Il m'a néanmoins offert des exemplaires de ses livres, amicalement dédicacés de sa main: c'est d'eux que j'ai tiré les citations ci-dessus.

Cette sorte de péripétie arrive inévitablement dans la recherche scientifique, où chacun fait confiance à ses propres hypothèses tant qu'elles ne sont pas invalidées par les faits.

En définitive, avoir été élève de Louis de Broglie a été pour moi une expérience merveilleuse, et je me rappelle cette époque avec beaucoup d'émotion.

Références

- [1] L. de Broglie, *Recherches sur la Théorie des Quanta*, Ann. de Phys. 3, 22-128 (1925); réimpression Ann. Fond. Louis de Broglie, Paris, 1992.
- [2] L. de Broglie, *Nouvelle dynamique des Quanta* dans "Electrons et Photons", Rapports et discussions du Cinquième Conseil Solvay, Gauthier Villars, Paris, p. 105, (1928).
- [3] A. Einstein, intervention orale, cf. [2], p. 253-256.
- [4] L. de Broglie, cf. [14], p.28-30.
- [5] A. Einstein, B. Podolsky & N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777, (1935).
- [6] O. Costa de Beauregard, Phys. Rev. Lett. **50**, 867, (1983).
- [7] L. de Broglie, cf. [14], p. VII.
- [8] L. de Broglie, cf. [15], p. V.
- [9] J.S. Bell, Physics, **195**, (1984).
- [10] L. de Broglie, *Une Nouvelle Conception de la Lumière, et Nouvelles Recherches sur la Lumière*, Hermann, Paris (1934, 1936).
- [11] L. de Broglie, *Mécanique Ondulatoire du Photon et Théorie Quantique des Champs*, Gauthiers-Villars, Paris (1949).
- [12] J.M. Jauch and F.Rohrlich, *The Theory of Photons and Electrons*, Addison Wesley, Cambridge, Mass (1955).
- [13] J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1987.
- [14] L. de Broglie, *Une Tentative d'Interprétation Causale et NonLinéaire de la Mécanique Ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris, (1953).
- [15] L. de Broglie, *Etude Critique des Bases de l'Interprétation Actuelle de la Mécanique Ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris, (1963).
- [16] L. de Broglie, *La Thermodynamique de la Particule Isolée*, Gauthier-Villars, Paris (1964).
- [17] L. de Broglie, *La Réinterprétation de la Mécanique Ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris (1971).