

Mémoire sur la mécanique quantique et l'approche ondulatoire

Olivier Rousselle

Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, ENS-PSL, Collège de France, Paris, France



Annales de la Fondation Louis de Broglie



Note : ce document est une version condensée d'un mémoire de master soutenue à l'École Normale Supérieure de Paris, en septembre 2019

Résumé

L'interprétation de Copenhague a été le sujet de nombreuses critiques, notamment par De Broglie et Einstein ("Dieu ne joue pas aux dés"), car elle contredit les principes de causalité et réalisme.

Le but de cet essai est d'étudier la mécanique ondulatoire comme alternative à la mécanique quantique traditionnelle, dans la continuité des idées de Louis de Broglie : la théorie de l'onde pilote de De Broglie (où chaque particule est associée à une onde qui la guide), la théorie de De Broglie-Bohm, l'électrodynamique stochastique (où le caractère stochastique des particules est causé par l'énergie de champ du vide), et les analogies entre physique quantique et hydrodynamique.

Mots clés: mécanique ondulatoire – onde pilote – réalisme - électron

Abstract

The Copenhagen interpretation has been the subject of much criticism, notably by De Broglie and Einstein ("God doesn't play dice"), because it contradicts the principles of causality and realism.

The aim of this essay is to study the wave mechanics as an alternative to traditional quantum mechanics, in the continuity of the ideas of Louis de Broglie: the pilot wave theory of De Broglie (where each particle is associated with a wave which guides it), De Broglie-Bohm theory, stochastic electrodynamics (where the stochastic character of particles is caused by the energy field of the fluctuating vacuum), and the analogies between quantum mechanics and hydrodynamics.

Keywords: wave mechanics - pilot wave - realism - electron

Sommaire

1) La dualité onde-corpuscule et la théorie de la double solution (De Broglie).....	6
a) Thèse de doctorat de Louis De Broglie (1924)	7
b) Théorie de la double solution	13
c) Apport de De Broglie à la physique théorique et expérimentale.....	16
d) Critique de la théorie de De Broglie.....	16
2) La mécanique quantique et l'interprétation de Copenhague : notions fondamentales, paradoxes et critiques.....	17
a) Postulats et notions fondamentales de l'interprétation de Copenhague.....	19
b) Critiques et paradoxes de la mécanique quantique.....	20
3) Interprétation alternative de De Broglie-Bohm	24
a) Principes généraux.....	24
b) Expérience des fentes de Young.....	26
c) Développement ultérieur de la théorie de De Broglie-Bohm	28
4) Perspectives modernes de l'approche ondulatoire - analogies hydrodynamiques	29
a) Dualité onde-corpuscule à l'échelle macroscopique.....	29
b) Approche stochastique	32
5) Questionnements sur l'éther, l'espace et le temps.....	35
Conclusion et questionnements philosophiques	36
Références.....	38

Introduction

Qu'est-ce que le temps, qu'est-ce l'espace ? Qu'est-ce que la matière ? Ces questions n'ont cessé d'obséder les hommes au cours des siècles derniers.

Les plus grands esprits ont permis de faire avancer ces questions, avec un besoin profond de théoriser le monde, c'est à dire d'y trouver une unité face à la diversité des expériences sensibles. L'unification est au cœur de la démarche scientifique, et la physique révèle que des phénomènes en apparence très différents ont une origine commune: les mouvements terrestres et les mouvements célestes (Newton); l'électricité et le magnétisme (Maxwell); l'espace et le temps (Einstein)... Au cours des siècles derniers, la science nous apprend que le monde visible, la notion de matérialité, sont peut-être illusoire, et que les entités ont une essence ondulatoire. Cela a été montré pour la lumière, puis pour les particules de matière.

Le but de cet essai est d'étudier l'approche ondulatoire de la matière selon les idées des physiciens Louis de Broglie, David Bohm et d'autres savants, et aussi d'analyser son évolution au cours du XX^es. et sa portée contemporaine.

Les articles analysés ont une approche à la fois philosophique (questionnement des fondements), physique (raisonnements basés sur l'expérience) et mathématique (démarches rigoureuses). Les concepts seront illustrés à l'aide de schémas, et d'équations assez simples.

Nous analyserons la thèse de doctorat de Louis de Broglie, *Recherches sur la théorie des Quanta (1924)*, dans laquelle il montre que les particules de matière (électrons) possèdent un caractère ondulatoire. C'est la dualité onde-corpuscule appliquée à la matière, et le début de la mécanique ondulatoire. Ces idées révolutionnaires vaudront à De Broglie le prix Nobel en 1929, il « a levé un coin du grand voile » selon Einstein. Ensuite, nous étudierons la théorie de l'onde pilote de De Broglie qui découle de sa thèse et vise à donner une interprétation à la dualité onde-corpuscule. Dans cette vision, chaque particule est associée à une onde qui la guide, elle est à l'origine des phénomènes quantiques comme les interférences des électrons.

A partir des idées de Broglie et son postulat d'équivalence onde-matière, Erwin

Schrödinger formula sa célèbre équation d'onde en 1926. Un nouvel outil mathématique est introduit alors, la fonction d'onde ψ , qui caractérise la particule mais reste une notion abstraite. Le congrès de Solvay de 1927 marque la naissance de la mécanique quantique et l'interprétation de Copenhague où les probabilités, l'indéterminisme, le principe de superposition, jouent un rôle majeur. Selon la vision de Bohr, Heisenberg, Pauli,... il faut renoncer à vouloir comprendre la nature et se cantonner à l'observation.

L'interprétation de Copenhague a fait l'objet de nombreuses critiques, notamment par De Broglie et Einstein. Elle entraine en contradiction avec deux principes auxquels ils tenaient : la causalité (tout phénomène a une cause, il n'y a pas d'indéterminisme) et le réalisme (il existe une réalité indépendante de l'observation; la physique doit décrire la nature, et non uniquement notre relation à l'expérience). Ce qu'Einstein résuma par ses célèbres phrases : « Dieu ne joue pas aux dés » et « J'aime penser que la lune est là, même si je ne la regarde pas ».

La théorie de l'onde pilote de De Broglie fut abandonnée durant des dizaines d'années du fait de la remarquable efficacité de l'approche de Copenhague. Elle fut cependant reprise par David Bohm en 1952 pour donner ce que l'on appelle aujourd'hui la théorie de De Broglie-Bohm (également appelée « Bohmian mechanics»). Cette théorie déterministe est plus rigoureuse, plus complète, plus simple que l'onde pilote de De Broglie, elle introduit des variables cachées, et est fondée sur la non-localité. Elle est encore considérée de nos jours comme une alternative pertinente à l'interprétation de Copenhague, dans un souci de préservation du réalisme et de la causalité, et réalise les mêmes prédictions.

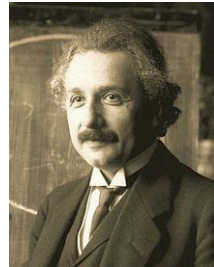
Nous verrons des faits modernes qui confirment l'intérêt de l'onde pilote, et les analogies de la mécanique quantique avec la physique statistique et l'hydrodynamique. En effet, en 2006, des chercheurs français ont montré qu'une gouttelette (analogue à la particule), dans un fluide en vibration, est associée à une onde (analogue à l'onde pilote) et cette expérience permet de reproduire la quasi-totalité des résultats quantiques (interférences, effet tunnel,...). Nous verrons également une interprétation moderne de la théorie de De Broglie-Bohm,

l'électrodynamique stochastique, où le caractère indéterminé des particules est provoqué par le champ d'énergie du vide fluctuant.

« La philosophie est écrite dans ce vaste livre qui se trouve ouvert en permanence sous nos yeux, que j'appelle univers » Galilée



Louis de Broglie (1892 - 1987)



Albert Einstein (1879 - 1955)

1) La dualité onde-corpuscule et la théorie de la double solution (De Broglie)

« Louis de Broglie a levé un coin du grand voile » Albert Einstein

De Broglie est un physicien français né en 1892 à Dieppe, il est issu de la maison noble De Broglie.

Pendant la guerre, Louis de Broglie est affecté à la radiotélégraphie militaire et travaille à l'émetteur de la tour Eiffel. Après la guerre, il revient travailler au laboratoire de son frère, reprend ses études en science, et réfléchit longuement aux problèmes des ondes et des corpuscules. Il savait qu'Hamilton avait remarqué l'analogie entre les lois de la mécanique et la propagation des rayons lumineux, et se demandait si cette analogie aurait un contenu physique beaucoup plus profond. Après diverses études préliminaires, il publie sa thèse en 1924.

De Broglie faisait partie de ces personnes qui manient à la fois l'art de philosopher et de faire de la science. Il cachait, sous son caractère réservé, un intérêt universel pour toutes les activités humaines. Penseur essentiellement solitaire, en grande partie autodidacte, il avait une vision originale de la physique théorique.

Il ne s'intéressait qu'aux questions fondamentales, qu'à la recherche de la connaissance pure et désintéressée, se considérait comme un théoricien, préoccupé

par l'obtention d'un tableau d'ensemble qui permettent de comprendre de manière cohérente les phénomènes empiriques de la physique. La représentation concrète et imagée des phénomènes physiques est pour lui un des outils heuristiques les plus puissants du théoricien; « c'est elle qui révèle le sens véritable des formules, qui nous fait pénétrer dans la réalité physique profonde » indique De Broglie.

a) Thèse de doctorat de Louis De Broglie (1924)

Comme nous avons vu précédemment, la lumière revêt une double nature : elle est soit une onde dans certaines limites, soit un corpuscule (on parle de dualité onde-corpuscule).

Cela est bien résumé par De Broglie au début de sa thèse de doctorat :

« L'histoire des théories optiques montre que la pensée scientifique a longtemps hésité entre une conception dynamique et une conception ondulatoire de la lumière : ces deux représentations sont donc sans doute moins en opposition qu'on ne l'avait supposé. »

Inspiré par la dualité onde-corpuscule de la lumière, Louis de Broglie proposa de la généraliser à toutes les particules de matière microscopiques (comme l'électron).

Tout d'abord, dans sa thèse, De Broglie étudie l'onde de phase associée à une particule. Il se fonde sur les formules de la relativité, dont $E = mc^2$.

De Broglie formule l'hypothèse qu'à chaque morceau d'énergie, de masse propre m_0 (masse dans le référentiel où il est au repos), est lié un phénomène périodique de fréquence ν_0 tel que :

$$h\nu_0 = m_0c^2 \quad (1.1)$$

L'énergie de l'électron est répandue dans tout l'espace avec une très forte condensation dans une région de très petites dimensions dont les propriétés sont mal connues. La fréquence d'une onde plane monochromatique se transforme comme

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1.2)$$

Tandis qu'une fréquence d'horloge se transforme comme $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$.

De Broglie pointe là une contradiction, et propose de la résoudre en introduisant une vitesse de groupe et une vitesse de phase :

- Fréquence de groupe $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ et vitesse de groupe $V = \beta c (< c)$ du phénomène périodique lié au mobile.
- Fréquence de phase $\nu' = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ et vitesse de phase $V' = c/\beta (> c)$ de l'onde de phase associée. Cette onde ne transporte pas d'énergie et sa fréquence vérifie la relation $E = h\nu'$.

Cela signifie que la phase du phénomène périodique est invariante par changement de référentiel / par transformation de Lorentz : $\nu_0 t_0 = \nu' \left(t' - \frac{\beta x}{c} \right)$.

De plus, $V \cdot V' = c^2$.

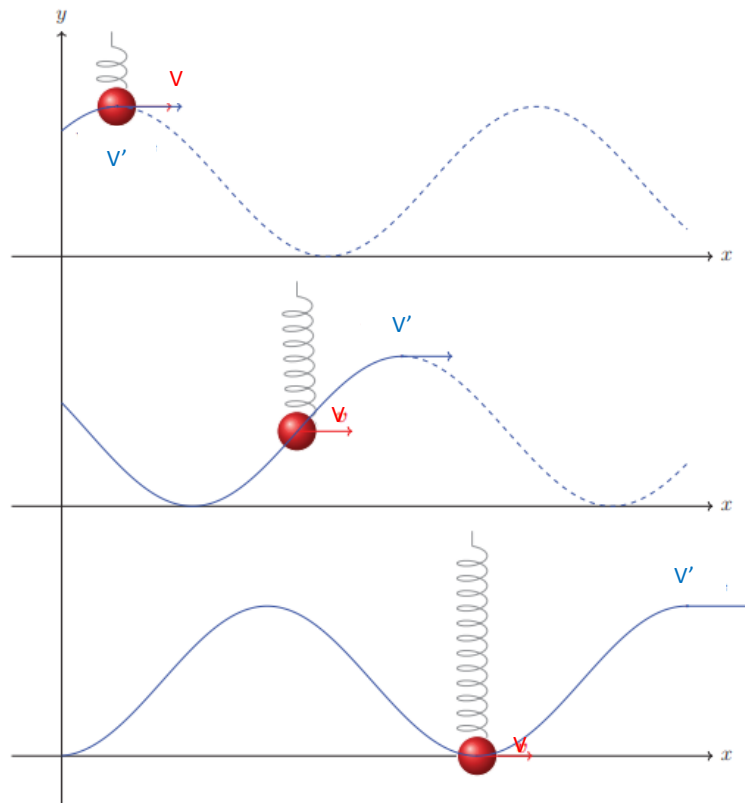


Fig. 1.1 : Représentation du corps se déplaçant à la vitesse V et de l'onde de phase se déplaçant à la vitesse V' . Les deux oscillations sont constamment en phase. Source : *Besson, 2018*

De Broglie indique : « La particule peut être assimilée à une petite horloge possédant une vibration interne qui est constamment en phase avec celle de l'onde ».

Comment une particule assimilée à une petite horloge peut-elle se déplacer dans son onde de façon à ce que sa phase interne reste constamment égale à celle de l'onde ?

La variation de la phase d'une onde plane monochromatique se déplaçant suivant l'axe des x s'exprime comme suit :

$$d\varphi = 2\pi \left(\nu dt - \frac{dx}{\lambda} \right) = 2\pi \left(\frac{\nu_0}{\sqrt{1-\beta^2}} dt - \frac{dx}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{h} \left(\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} dt - h \frac{dx}{\lambda} \right) \quad (1.3)$$

La variation de la phase interne d'une particule se déplaçant le long de l'axe des x s'exprime quant à elle comme suit :

$$d\varphi_i = 2\pi \nu_0 \sqrt{1-\beta^2} dt = \frac{2\pi}{h} m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2} dt$$

$$d\varphi = d\varphi_i ; \quad dx = V \cdot dt$$

$$\rightarrow \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2} = \frac{h}{\lambda} \frac{dx}{dt} = \frac{hV}{\lambda}$$

$$\text{De plus, } \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2} = \frac{m_0 V^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\rightarrow p = \frac{m_0 V}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{h}{\lambda} \quad (1.4)$$

De par ces raisonnements, De Broglie obtient les deux relations fondamentales de la mécanique ondulatoire :

$$E = h\nu ; \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (1.5)$$



Fig. 1.2 : Timbre poste, datant de 1994

Le caractère ondulatoire de la matière n'est observable que pour les objets microscopiques (comme l'électron), à l'inverse des particules macroscopiques.

En 1923, *Arthur Compton* découvre l'effet Compton (que nous avons décrit précédemment), où il introduit la longueur d'onde de l'électron : $\lambda_c = \frac{h}{mc}$. En

introduisant la fréquence, $\nu_c = \frac{c}{\lambda_c}$, la formule relativiste $E = mc^2$, on a : $E = h\nu_c$.

La fréquence de Compton de l'électron correspond donc à celle découverte par De Broglie relativement à l'énergie.

Dans une seconde partie, De Broglie développe ses idées en se fondant sur les principes de moindre action (Maupertuis, Hamilton) et le principe de Fermat

(propagation des ondes). Il vise à répondre à la question : « Quand un mobile se déplace dans un champ de force d'un mouvement varié, comment se propage son onde de phase ? ».

En 1744, Maupertuis a énoncé le principe de moindre action en ces mots : « L'action est proportionnelle au produit de la masse par la vitesse et par l'espace. Lorsqu'il arrive quelque changement dans la Nature, la quantité d'Action employée pour ce changement est toujours la plus petite qu'il soit possible. » Ce qui se traduit mathématiquement par la formule (due à Euler) :

$$\delta \int_A^B mV dl = 0 \Leftrightarrow \delta \int_A^B \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1 - \beta^2}} dl = 0 \quad (1.6)$$

$$\text{ou de façon générale } \delta \int_A^B \sum_i p_i dq^i = 0.$$

Un corps prend la direction qui lui permet de dépenser le moins d'action dans l'immédiat (ou d'acquérir le plus d'énergie dans l'immédiat). Les travaux de Maupertuis furent repris par Hamilton pour fonder la mécanique hamiltonienne.

On a les relations suivantes, utilisées par De Broglie dans sa thèse :

$$\text{Action : } S = \int_{t_1}^{t_2} L dt, \text{ avec } L = E_c - E_p \text{ le lagrangien}$$

$$\begin{aligned} \delta S = 0 &\rightarrow \delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0 \\ &\rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (\text{équation d'Euler-Lagrange}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Un siècle avant, Fermat avait avancé un principe similaire pour les rayons lumineux de l'optique géométrique (trajectoire telle que la durée du parcours soit minimale).

Le principe de Fermat permet de déterminer les rayons d'une onde de fréquence ν :

$$\delta \int_A^B \frac{\nu}{V} dl = \delta \int_A^B \frac{m_0 c^2}{h \sqrt{1 - \beta^2}} \frac{1}{c/\beta} dl = \delta \int_A^B \frac{m_0 \beta c}{h \sqrt{1 - \beta^2}} dl = 0 \quad (1.8)$$

De Broglie montre qu'il est possible de relier le principe de moindre action et le principe de Fermat, en utilisant la quadri-impulsion du corps pour le 1^{er} principe, et le quadrivecteur d'onde pour le 2^e.

$$E = \gamma m_0 c^2 = \hbar \omega, \text{ avec } h \text{ la constante de Planck et } \gamma \text{ le facteur de Lorentz}$$

$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{V} = \hbar \vec{k} \quad (1.9)$$

Généralisation : $p_i = \hbar k_i$, $i = 0,1,2,3$.

Louis de Broglie obtient là une formule relativiste, faisant intervenir des quadrivecteurs (avec 1 composante temporelle et 3 composantes spatiales).

Citons ici De Broglie : « Le principe de Fermat appliqué à l'onde de phase est identique au principe de Maupertuis appliqué au mobile : les trajectoires dynamiquement possibles du mobile sont identiques aux rayons possibles de l'onde ». Le mobile suit la trajectoire fixée par le principe de Fermat appliqué à l'onde. La nouvelle dynamique du point matériel libre est donc à l'ancienne dynamique ce que l'optique ondulatoire est à l'optique géométrique.

Enfin, De Broglie se penche sur l'étude du modèle quantique de l'atome.

Bohr avait montré que l'électron autour du noyau positif ne peut décrire que certaines trajectoires circulaires stables, les autres étant irréalisables dans la nature (*Bohr, 1913*). On peut associer des numéros à ces orbites ($n = 1,2,3,4, \dots$).

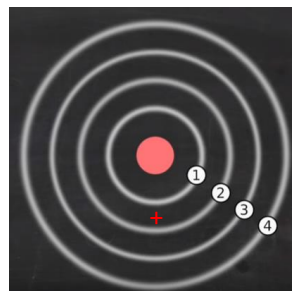


Fig. 1.3 : Modèle de Bohr : noyau positif au centre et orbites discrètes des électrons

De Broglie se demande comment comprendre ces états discrets et devine une ressemblance avec les ondes stationnaires. Il conçoit un électron tournant autour du noyau atomique comme étant lié à une onde.

Partant du principe de Fermat pour l'onde de phase de l'électron, il montre que les orbites stables sont celles dont la longueur l vérifie $l = n \cdot \lambda$ (condition de résonance), avec λ la longueur d'onde de l'onde de phase et $n \in \mathbb{N}$.

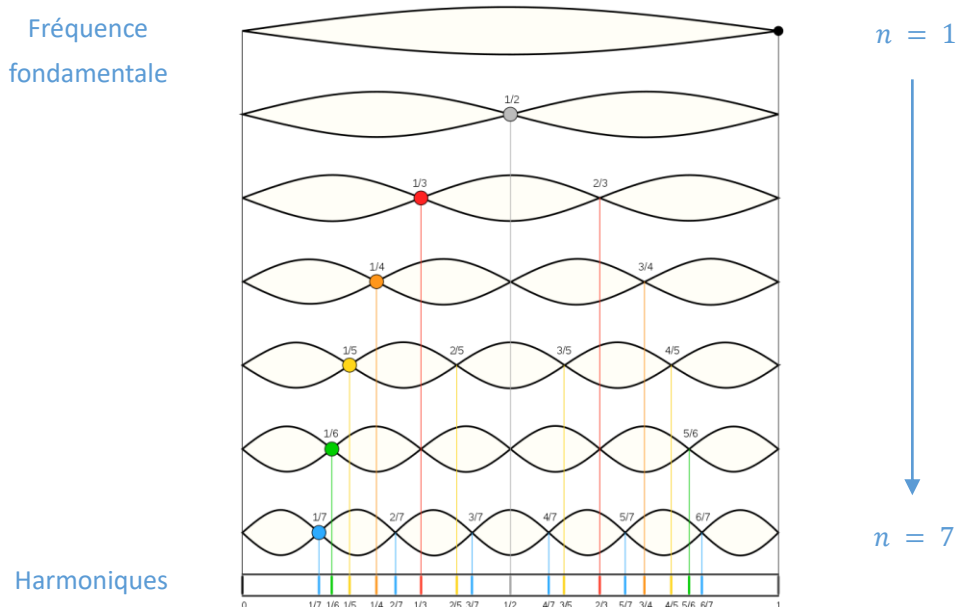


Fig. 1.4 : Ondes stationnaires (corde vibrante)

Nous voyons sur la figure précédente que les vibrations des ondes stationnaires sont « quantifiées » (ne prennent que certaines valeurs), ce qui explique intuitivement la quantification des orbites.

La condition de résonance se traduit de façon générale par la formule suivante :

$$m_0 \oint V dl = nh \quad (1.10)$$

Dans le cas des trajectoires circulaires de l'atome de Bohr (de rayon R), on a :

$$m_0 \oint V dl = 2\pi R m_0 V \quad (1.11)$$

Nous pouvons également introduire la vitesse angulaire ω : $V = \omega R$.

Avec ces formules, De Broglie retrouve alors la formule de Bohr, selon laquelle les trajectoires circulaires stables sont associées à un moment de la quantité de mouvement qui est un multiple entier de \hbar :

$$m_0 \omega R^2 = n\hbar \quad (1.12)$$

De Broglie permet ainsi d'expliquer, avec son approche ondulatoire, pourquoi certaines orbites de l'atome sont stables et donne une justification à la quantification. Les orbites quantifiées peuvent s'interpréter par la résonance de l'onde de phase sur la longueur d'onde des trajectoires circulaires.

Dans son rapport de thèse, Paul Langevin apprécie « l'originalité et la profondeur des

idées [et] la coordination remarquable qu'elles permettent ». Il demande l'avis d'Albert Einstein, qui lui répondra quelques mois plus tard : « Le travail de Louis De Broglie m'a fait grande impression. Il a levé un coin du grand voile ».

En 1927, Davisson et Germer découvrent expérimentalement le phénomène de diffraction des électrons. De Broglie se verra attribué le prix Nobel en 1929.

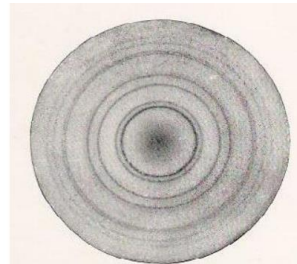


Fig. 1.5 : Figure de diffraction des électrons (*Davisson & Germer, 1927*)

Ces découvertes valurent la notoriété de De Broglie. Il est nommé maître de conférences à l'Université de Paris en 1928, à l'Institut Henri Poincaré; puis élu à l'Académie des Sciences en 1933 et à l'Académie française en 1944.

« Son apport à la connaissance du monde où nous vivons est si important, si bouleversant, si porteur d'images nouvelles » indiquait Jean Hamburger, directeur de l'Académie française, dans son hommage à Louis de Broglie.

b) Théorie de la double solution

Après la découverte des formules de dualité onde-corpuscule, De Broglie en propose une interprétation (*De Broglie, 1927*). La particule, considérée comme une petite horloge, est associée à une onde qui la guide; c'est l'onde pilote, onde physique réelle de faible amplitude. Il fait également intervenir une autre onde ψ , fictive, de nature statistique, probabiliste et normalisée.

En notant v l'onde physique réelle, on a : $\psi = Cv$. Les solutions v et ψ ont la forme d'une onde, la phase étant la même mais l'amplitude étant différente. C est un facteur de normalisation tel que $\int_V |\psi|^2 d\tau = 1$, V représentant le volume occupé par l'onde v . $|\psi|^2 d\tau$ donne la probabilité de trouver la particule dans l'élément de volume $d\tau$.

De Broglie qualifie cette théorie de « double solution » car v et ψ sont deux solutions de la même équation d'onde, l'équation de Schrödinger (que nous verrons après). La particule forme une petite région de grande concentration d'énergie, qui peut être approximée par une singularité en mouvement.

L'onde v suit l'équation suivante (où a est l'amplitude de l'onde et ϕ sa phase) :

$$v = a(\vec{x}, t) \exp\left(\frac{i}{\hbar} \phi(\vec{x}, t)\right) \quad (1.13)$$

Dans le cas d'une onde monochromatique, la vibration interne de la particule est en phase avec l'onde sur laquelle elle est portée.

De Broglie applique l'équation de Schrödinger à l'onde v :

$$i\hbar \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta v + U \cdot v.$$

Il obtient alors deux équations :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} - U - \frac{(\nabla \phi)^2}{2m} &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta a}{a} && \text{Équation de Jacobi généralisée} \\ \frac{\partial(a^2)}{\partial t} - \frac{1}{m} \operatorname{div}(a^2 \nabla \phi) &= 0 && \text{Équation de continuité} \end{aligned} \quad (1.14)$$

avec U le potentiel classique.

En partant de l'équation de Jacobi généralisée, avec $\phi = S$ et en négligeant le terme de droite ($\hbar \rightarrow 0$), on obtient $\frac{\partial S}{\partial t} - U = \frac{(\nabla S)^2}{2m}$. C'est l'équation de Jacobi de la mécanique classique.

Le terme de droite de l'équation de Jacobi généralisée s'interprète comme un potentiel quantique Q : $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta a}{a}$. Le potentiel quantique est l'expression de la réaction de l'onde sur le corpuscule, et la force quantique est : $\vec{F} = -\vec{\nabla} Q$. En prenant en compte cette force, le mouvement défini par la formule de guidage n'est plus rectiligne. Les obstacles agissent sur la particule à travers le potentiel quantique, produisant une déflexion.

De plus, on a :

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} = E, \quad \vec{p} = -\vec{\nabla} S &\rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial t} = E, \quad \vec{p} = -\vec{\nabla} \phi ; \\ \vec{p} = m\vec{V} &\rightarrow \vec{V} = -\frac{\vec{\nabla} \phi}{m}. \end{aligned} \quad \text{Formule de guidage} \quad (1.15)$$

La vitesse de la particule (à la position x, y, z et au temps t) est fonction de la variation de la phase locale à ce point.

On peut calculer la variation de phase de l'onde associée à la particule :

$$d\phi = \frac{\partial\phi}{\partial t} dt + \frac{\partial\phi}{\partial l} dl = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}\phi} \right) dt = \left(\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) dt = m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2} dt \quad (1.16)$$

La variation de la phase interne de la particule est : $d\phi_i = m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2} dt = d\phi$.

Ainsi, la vibration de la particule est constamment en phase avec celle de l'onde.

L'onde physique réelle doit inclure une petite région de très grande amplitude, singulière, qui est la particule. On la note u_0 . L'onde physique (u) est donc composée de cette région singulière, et de l'onde v d'amplitude très faible :

$$u = u_0 + v \quad (1.17)$$

Le mouvement de la singularité subirait l'influence de tous les obstacles qui influeraient sur la propagation du phénomène ondulatoire dont elle est solidaire, et ainsi expliquerait l'existence des interférences et de la diffraction.

Mais De Broglie n'a pas voulu essayer de décrire la structure interne de cette région singulière, c'est à dire la particule. Cette description impliquerait certainement des équations non-linéaires selon lui.

Pour résumé, la théorie de la double solution de De Broglie indique que la particule microscopique est guidée par son onde. Deux ondes entrent en jeu : l'onde pilote réelle centrée sur la particule et l'onde statistique prédite par la théorie quantique usuelle.

Il a proposé que l'onde pilote venait des oscillations internes de la particule à la fréquence de Compton $\nu_c = \frac{mc^2}{h}$, et qu'elle évolue selon l'équation de Klein-Gordon.

Il a souligné l'importance de l'harmonie des phases, par laquelle la vibration interne de la particule, vue comme une horloge, reste en phase avec celle de l'onde pilote. Selon sa conception, l'onde et la particule maintiennent un état de résonance.

c) Apport de De Broglie à la physique théorique et expérimentale

Le travail théorique de De Broglie constitue une réinterprétation des lois déjà connues à l'aide de nouvelles bases conceptuelles, et en une synthèse magistrale des concepts existants (synthèse entre la dynamique du point matériel et la théorie des ondes). Selon lui, la résolution des problèmes les plus importantes de physique ne peut intervenir qu'après avoir remis la théorie sur de meilleures bases. Ses idées influenceront les travaux de nombreux physiciens, comme ceux de Schrödinger comme nous le verrons après. Ses travaux ont suscité davantage l'intérêt de physiciens théoriciens français portés vers l'abstraction plutôt que de théoriciens plus proches de l'expérience, voire des expérimentateurs. Doté de qualités littéraires et philosophiques indéniables, il vulgarisa la mécanique ondulatoire et la physique quantique dans de nombreux écrits destinés au grand public. Il a également encadré des thèses de physique théorique, et ses idées influencent les travaux de ses élèves. Dans les années 1930 et 1940, De Broglie était connu dans la communauté scientifique, et contribua au rayonnement de la physique théorique française. (*Vila-Valls, 2012*).

Dans une optique de favoriser les idées nouvelles, la fondation Louis de Broglie a été créée en 1973. Elle a pour vocation de « participer au rayonnement de la pensée scientifique et humaniste de Louis de Broglie, de soutenir, de développer et de favoriser la recherche, notamment en physique théorique, en mathématiques, en histoire et philosophie des sciences ».

d) Critique de la théorie de De Broglie

Les idées de De Broglie ont cependant fait l'objet de nombreuses critiques de la part des autres physiciens, en France et à l'étranger.

Tout d'abord, De Broglie donne une trajectoire et une vitesse précise aux photons et aux particules, alors que la mécanique quantique indique que ces entités n'ont pas de trajectoire bien définie. Beaucoup de physiciens mathématiciens, formalistes, comme Paul Dirac, ne virent même pas l'intérêt de ses travaux. Pour eux, l'essentiel

de la physique est dans les relations mathématiques et non pas dans les images intuitives.

La théorie de la double solution laisse en suspens de nombreuses questions et pose des problèmes : le lien exact entre la particule et l'onde, la nature et l'origine de l'onde, singularité au sein de l'onde,...

La théorie de la double solution, beaucoup plus complexe mathématiquement que la mécanique ondulatoire de Schrödinger, serait techniquement difficile à appliquer à un problème de physique atomique par exemple, et le bénéfice pour l'expérimentateur serait contestable.

Devant les difficultés théoriques de la théorie de la double solution et devant les objections adressées par les membres de « l'école de Copenhague », Louis de Broglie finira par renoncer à sa théorie et à accepter l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire pendant de nombreuses années.

2) La mécanique quantique et l'interprétation de Copenhague : notions fondamentales, paradoxes et critiques

La dualité onde-corpuscule peut s'interpréter de trois manières différentes :

- L'approche de Schrödinger qui consiste à nier la réalité du dualisme en contestant l'existence des corpuscules. Seules les ondes auraient une signification physique.
- L'approche de De Broglie où le corpuscule est une sorte de singularité au sein d'un phénomène ondulatoire étendu dont il serait le centre, comme nous avons vu précédemment.
- La dernière approche, qui consiste à ne considérer que les idées de corpuscule et d'onde continue et les regarder comme des faces complémentaires de la réalité au sens de Bohr. C'est l'interprétation orthodoxe de la mécanique ondulatoire, aussi appelé interprétation de Copenhague.

Inspiré par la dualité onde-corpuscule de De Broglie, le physicien viennois Erwin Schrödinger formula son équation d'onde, qui devint avec le temps l'essence même de la théorie quantique (Schrödinger, 1926). C'est l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t) \quad (2.1)$$

avec Δ l'opérateur Laplacien $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ et V le potentiel.

Cette équation concorde avec la formule classique de l'énergie :

$$E = E_c + E_p = \frac{p^2}{2m} + V, \quad \text{avec } E = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \text{ et } \vec{p} = -i\hbar \vec{\nabla} \quad (2.2)$$

L'interprétation physique de la fonction d'onde ψ fut apportée par Born en 1926 : le carré de cette fonction d'onde $|\psi|^2$ donne la densité de probabilité de trouver une particule.

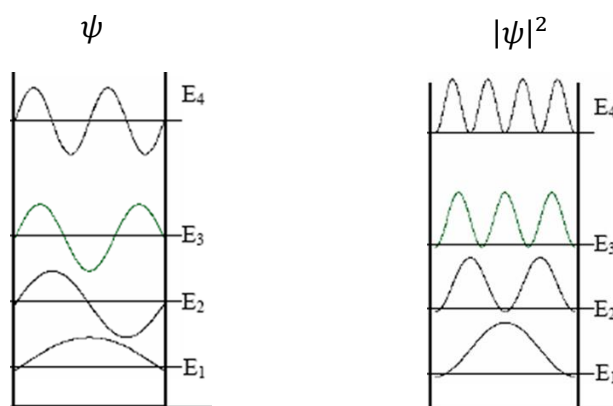


Fig. 2.1 : Exemple de fonction d'onde et de densité de probabilité
pour différents niveaux d'énergie

Une autre formulation de la mécanique quantique se développa : la mécanique matricielle, construite par Heisenberg, Born et Jordan en 1925, où les grandeurs physiques classiques sont remplacées par des observables associées à des matrices. Il fut démontré par Pauli et Schrödinger que ces deux formalismes, ondulatoire et matricielle, sont équivalents.

L'équation de Schrödinger fut généralisée au cas relativiste par Klein et Gordon, ainsi que Dirac pour les particules de spin $\frac{1}{2}$.

a) Postulats et notions fondamentales de l'interprétation de Copenhague

L'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, appelée interprétation de Copenhague, est née au congrès Solvay de 1927.

Les postulats de l'interprétation de Copenhague sont les suivants :

- L'état d'une particule quantique est entièrement contenue dans un vecteur d'état noté $|\psi(x, t)\rangle$. L'ensemble des états d'une particule se composent linéairement sur une base, c'est le principe de superposition :

$$|\psi\rangle = \sum_i \alpha_i |u_i\rangle, \text{ avec } \alpha_i \in \mathbb{C} \quad (2.3)$$

L'ensemble des états possibles d'un système définit ainsi un espace vectoriel, plus précisément un espace de Hilbert (noté \mathcal{H}).

- Toute grandeur physique mesurable A (comme la position, la quantité de mouvement, le spin) est décrite par un opérateur linéaire \hat{A} , appelé observable, agissant sur les vecteurs d'un espace de Hilbert \mathcal{H} .

La valeur moyenne de la mesure de l'observable \hat{A} est donnée par :

$$\langle \hat{A} \rangle = \sum_k a_k P(a_k) = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle \quad (2.4)$$

- L'évolution dans le temps de la fonction d'onde $\psi(x, t)$ est régie, dans le cas non-relativiste, par l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = \hat{H}(t) |\psi(t)\rangle, \text{ avec } \hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V \quad (2.5)$$

Dans le cas relativiste, il faut utiliser l'équation de Dirac.

- La mesure d'une grandeur physique A donne comme résultat une des valeurs propres a_n de l'observable \hat{A} :

$$\hat{A} |\psi\rangle = a_n |\psi\rangle \quad (2.6)$$

- La densité de probabilité est donnée par le carré de l'amplitude, $|\psi|^2$; la probabilité de trouver à l'instant t une particule dans le volume V est quant à elle donnée par : $P = \int_V |\psi(r, t)|^2 d^3r$.
- Réduction du paquet d'ondes : si la mesure de la grandeur physique A donne le résultat a_n , l'état du système immédiatement après la mesure est la projection normée de $\psi(x, t)$ sur le sous-espace propre associé à a_n .

Dans cette conception, l'onde et le corpuscule ne peuvent se représenter de manière

classique. On ne peut attribuer ni position, ni vitesse, ni trajectoire. La position et la vitesse se révèlent uniquement au moment de la mesure, avec des certaines probabilités. Le corpuscule n'est plus un objet bien défini dans le cadre de l'espace et du temps.

La fonction d'onde ψ caractérise complètement la particule quantique. Elle ne permet de prédire que des probabilités concernant les résultats des différentes mesures et évolue de façon régulière et prédictible selon l'équation de Schrödinger; dès que l'on effectue une mesure, elle effectue des sauts imprévisibles, non-déterministes, selon le postulat de réduction du paquet d'onde.

Pour un système de N particules, la fonction d'onde ψ se propage dans un espace des configurations à $3N$ dimensions, très différent de l'espace habituel.

La transition quantique-classique s'effectue par la procédure mathématique appelée « quantification canonique ». Les crochets de Poisson $\{p_i, q_i\} = \delta_{ij}$, $\{p_i, p_i\} = 0$, $\{q_i, q_i\} = 0$ sont remplacés par les commutateurs des opérateurs quantiques :

$$[p_i, q_i] = i\hbar, \quad [p_i, p_i] = 0, \quad [q_i, q_i] = 0 \quad (2.7)$$

Le formalisme quantique a pour conséquence les relations d'incertitude de Heisenberg. On ne peut pas connaître de manière précise à la fois la position et la quantité de mouvement d'un corpuscule, comme illustré par la formule suivante :

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.8)$$

La mécanique quantique déjoue notre sens commun et ne ressemble à rien de ce que l'on connaît dans la vie de tous les jours. Selon Bohr, il est impossible de transposer notre vision macroscopique dans le monde microscopique. La tâche de la physique n'est pas de comprendre la nature, mais de trouver une théorie qui colle avec l'expérience.

b) Critiques et paradoxes de la mécanique quantique

L'interprétation actuelle de la mécanique quantique fait jouer une part fondamentale au point de vue probabiliste. S'effondrent alors la réalité objective du monde et la

compréhension intuitive de la nature...

Bien que la mécanique quantique soit parfaitement en accord avec l'expérience, elle a fait l'objet de débats animés entre philosophes et scientifiques au cours du XX^es. La physique quantique décrit-elle la réalité ou bien uniquement la perception que nous avons du monde ? Les principes probabilistes sont-ils intrinsèques ou bien sont-ils des conséquences de fondements que nous ne comprenons pas ? Existe-t-il une réalité parfaitement déterminée et descriptible dans le cadre de l'espace-temps par des variables cachées ?

Certains scientifiques contemporains, comme Einstein et Schrödinger, n'ont pas accepté l'interprétation probabiliste de Copenhague.

L'interprétation de Copenhague est fondée sur deux postulats peu compatibles :

- La mesure de Von Neumann, qui correspond à une réduction du vecteur d'état. C'est un processus discontinu et aléatoire. Cette interprétation fait jouer un rôle spécial à l'observateur.
- L'évolution de la fonction d'onde ψ est basée sur l'équation de Schrödinger. Cette équation est continue et déterministe.

John Von Neumann a démontré un théorème, portant le nom de théorème d'incompatibilité, qui montre que la forme des lois de probabilité de la mécanique quantique est incompatible avec l'existence de paramètres cachés. Il s'avéra par la suite que cette preuve n'était en fait relative qu'à une classe restreinte de telles variables. Le raisonnement de Von Neumann n'est pas applicable à la théorie de l'onde pilote de De Broglie par exemple.

Le principe de superposition est à l'origine de ce qu'on appelle le problème de la mesure quantique, avec le paradoxe du chat (ni mort, ni vivant) imaginé en 1935 par Schrödinger. Dans cette expérience de pensée, un chat est enfermé dans une boîte avec un dispositif qui tue l'animal dès qu'il détecte la désintégration d'un atome d'un corps radioactif. Si les probabilités indiquent qu'une désintégration a une chance sur deux d'avoir eu lieu au bout d'une minute, la mécanique quantique indique que, tant que l'observation n'est pas faite (ou plus précisément qu'il n'y a pas eu de réduction du paquet d'onde), l'atome est simultanément dans deux états : intact et désintégré.

Ainsi, le chat serait simultanément dans deux états (mort et vivant), jusqu'à ce que l'ouverture de la boîte (observation) déclenche le choix entre les deux états.

Cette situation d'un chat en état de superposition peut nous sembler grotesque. De plus, un animal a-t-il un niveau de conscience lui permettant de savoir s'il est vivant et de réduire le paquet d'ondes ? Est-il capable à lui seul de forcer l'émergence classique d'un résultat unique, ou peut-il être mis dans un état quantique où il serait à la fois mort et vivant ?

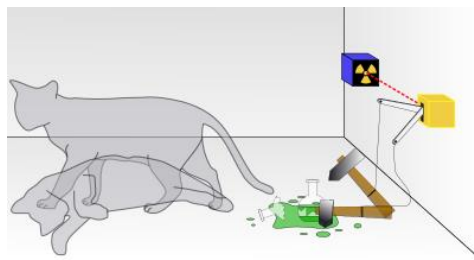


Fig. 2.2 : Illustration du chat de Schrödinger

Un autre problème de l'interprétation usuelle est que si l'on trouve des expériences en contradiction avec elle, on peut toujours introduire des opérateurs et champs afin que la théorie soit en accord avec l'expérience, sans requérir de changement fondamental dans l'interprétation physique. Les expériences ne peuvent pas vraiment la contredire, on a une sorte de « trap ».

Enfin, évoquons des critiques faites à l'égard de théories développées à partir de la mécanique quantique : la théorie quantique des champs et l'électrodynamique quantique.

Dans la théorie quantique, l'électron est une particule élémentaire, ponctuelle. L'équation de Dirac relativiste a conduit au développement de la théorie quantique des champs, unification de la mécanique quantique et de la relativité restreinte. Une partie essentielle est l'électrodynamique quantique, qui régit les interactions électromagnétiques entre lumière et les particules chargées (comme l'électron). Elle a été développée par Richard Feynman et d'autres (Dyson, Schwinger,...), à partir de la mécanique quantique et de l'idée de particule ponctuelle. Elle a été désignée par Feynman comme « perle de la physique » (Feynman, 1987) pour ses prédictions très

précises dans la détermination théorique de quantités telles que le facteur de Landé g .

Feynman a également développé les diagrammes de Feynman, dont le but est représenter de façon plus intuitivement et imagée les interactions lumière – matière dans l'espace-temps (Feynman, 1987) :

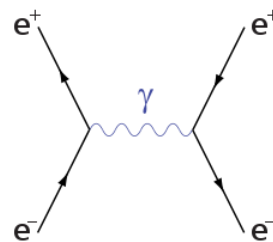


Fig. 2.3 : Exemple de diagramme de Feynman

La théorie quantique des champs indique que des particules / antiparticules se créent en permanence à partir des fluctuations électromagnétiques du vide. L'électron est ainsi entouré en permanence de ces particules /antiparticules virtuelles, on parle de polarisation du vide. De plus, un électron peut émettre un photon qui est ensuite réabsorbé par l'électron lui-même; on parle de self-énergie de l'électron.



L'évaluation des processus de la polarisation du vide et de la self-énergie de l'électron, par les calculs électrodynamiques perturbatifs, conduit à des intégrales divergentes. Toutes les théories des champs connues dans les années 1960 ont comme propriété que les interactions deviennent infinies à des échelles de distance suffisamment petites. Là constitue une limite importante à ces théories des champs basées sur la mécanique quantique traditionnelle et sur l'idée de particule ponctuelle.

Ces infinis des calculs ont cependant pu être éradiqués par une procédure appelée renormalisation, mais est considérée par certains physiciens comme une véritable « escroquerie » (aux dires même de Feynman). En effet, cette théorie implique de négliger des infinis qui apparaissent dans les équations, ce qui ne peut avoir de sens mathématiquement. Comme l'indique Dirac lui-même, initiateur de

l'électrodynamique quantique : « La renormalisation est juste une procédure d'interruption. Il devrait y avoir un changement fondamental dans nos idées ».

La mécanique quantique a triomphé de bien des difficultés. Cependant, selon Franck Laloë (2018), les responsables de ce succès ont parfois été trop loin, tant dans leur désir de convaincre que dans leurs convictions propres, affirmant que leur point de vue était le seul compatible avec l'expérience. Selon eux, aucune description plus fine ne serait jamais possible; en particulier, il était prouvé que la Nature était fondamentalement indéterministe. Bohr ne semble pas avoir réalisé l'impact de sa position, et que la frontière qu'il voulait établir entre macroscopique et microscopique n'est pas facile à maintenir.

Selon mathématicien français René Thom, « la mécanique quantique est incontestablement le scandale intellectuel du siècle. La science a renoncé à l'intelligibilité du monde. » ; il est persuadé qu' « il y a une dynamique sous-jacente à la mécanique quantique » (Thom, 1991).

Selon De Broglie, la science a toujours cherché à établir des liens de causalité entre les phénomènes, et cette causalité n'a plus lieu d'être dans l'interprétation de Copenhague. Il faut selon lui revenir à une théorie qui n'est pas fondamentalement probabiliste, mais où les probabilités émergent de phénomènes de causalité. Dès lors, les probabilités refléteraient notre ignorance partielle de l'état du monde physique.

3) Interprétation alternative de De Broglie-Bohm

a) Principes généraux

La théorie de l'onde pilote fut reprise par David Bohm, qui proposa une version améliorée de cette théorie, plus complète et plus simple (Bohm, 1952). 25 ans après avoir abandonné sa théorie de la double solution, De Broglie prend connaissance des travaux de Bohm avec enthousiasme.

Nous résumons ici les postulats de cette théorie :

- La fonction d'onde ψ est considérée comme un champ réel et objectif, et non comme une entité purement mathématique
- Il existe des particules qui ont des coordonnées bien définies et qui évoluent de façon déterministe.
- La vitesse des particules est $v = \frac{\nabla S}{m}$, et la fonction d'onde est $\psi = Re^{iS/\hbar}$.
- La particule réagit au potentiel classique $V(x)$ et également à un potentiel quantique additionnel : $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R}$.

Le principe d'incertitude est vu comme une limite pratique à la précision à laquelle position et quantité de mouvement peuvent être simultanément mesurées, émanant de perturbations du système.

En 1954, Bohm publie avec le physicien français Jean-Pierre Vigié une version stochastique où est introduit un 5^e axiome : le champ ψ est dans un état de fluctuations aléatoires et chaotiques telle que la valeur ψ constitue une moyenne de ces fluctuations; les fluctuations proviennent d'un niveau sous-jacent, de la même manière que les fluctuations du mouvement brownien proviennent d'un niveau atomique plus profond (*Bohm & Vigié, 1954*). En 1952, Bohm démontre que pour certains cas, l'action de ces forces chaotiques font tendre le système vers la distribution de Born $|\psi|^2$, sans parvenir cependant à généraliser.

Vigié, assistant de De Broglie, perçoit dans la théorie de la double solution un moyen de rapprocher la mécanique ondulatoire et la théorie de la relativité générale. L'ambition de De Broglie était alors de renouveler pour la physique quantique et la relativité générale ce qu'il avait entrepris jadis pour l'optique et la mécanique. Mais il n'y parvint pas...

L'enjeu et l'intérêt de la théorie de De Broglie-Bohm est de faire reposer la physique microscopique sur de meilleures bases, qui expliquent tout aussi bien les prédictions quantiques que la théorie usuelle.

Nous allons étudier maintenant la théorie de De Broglie-Bohm à travers une

expérience « cruciale » de la mécanique quantique : les fentes de Young.

b) Expérience des fentes de Young

L'expérience des fentes de Young a pendant longtemps été l'expérience cruciale dans l'interprétation de la dualité onde-corpuscule et de la mécanique quantique.

Selon Feynman, elle aborde le point fondamental du comportement mystérieux des objets quantiques sous son aspect le plus étrange. C'est un phénomène qu'il est impossible à expliquer de façon classique et qui contient le cœur de la mécanique quantique.

L'expérience de la double fente a été réalisée pour la lumière (expérience de Young), puis avec des électrons (Jönsson). Dans l'expérience de Jönsson de 1961, un canon à électrons émet un à un dans le plan horizontal, à travers un trou de quelques millimètres, des électrons à une vitesse de $1,8 \cdot 10^8$ m/s. Une plaque percée de 2 fentes horizontales larges de $0,2 \mu\text{m}$ est installée à 35 cm de la source d'électrons. L'impact de chaque électron apparaît sur l'écran au fur et à mesure que l'expérience se déroule. Au bout de quelques milliers d'impacts, la répartition des impacts des électrons fait apparaître une figure d'interférence.

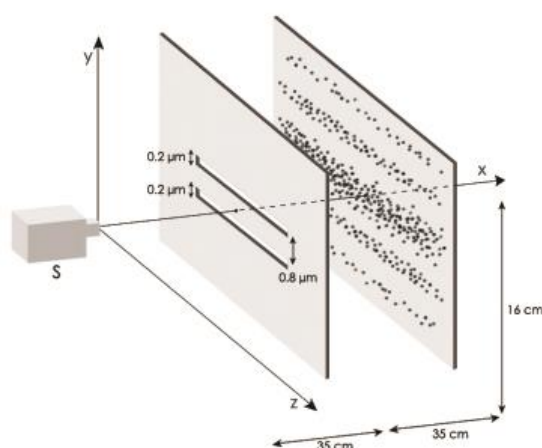


Fig. 3.1 : Expérience de Jönsson

L'électron se comporte comme un corpuscule à son arrivée sur l'écran, de par son impact. Le caractère ondulatoire d'un électron se révèle statistiquement.

Dans l'interprétation de Copenhague, l'électron est soit une onde soit un corpuscule (Ou exclusif). Durant l'expérience, l'électron est une onde, et est un corpuscule seulement lors de son impact sur l'écran. L'électron-onde passe par les 2 fentes à la fois.

Dans l'interprétation de De Broglie-Bohm, l'électron est à la fois onde et corpuscule, l'onde guidant le corpuscule. Ici, l'électron-onde passe ici également par les deux fentes à la fois, mais l'électron-corpuscule ne passe que par l'une des fentes. Les particules ont une position initiale et suivent une trajectoire dont la vitesse est donnée par $v(x, t) = \frac{\nabla S(x, t)}{m}$.

M.&A. Gondran (2014) ont réalisé des simulations des trajectoires bohmiennes des électrons, et ont obtenu des résultats en accord avec l'expérience, dans les cas de la diffraction et des fentes de Young. Dans le cas des fentes de Young, le principe est de tirer au hasard les positions initiales des électrons dans le paquet d'ondes initial. Sont représentées ci-dessous 100 trajectoires quantiques d'électrons traversant une des deux fentes.

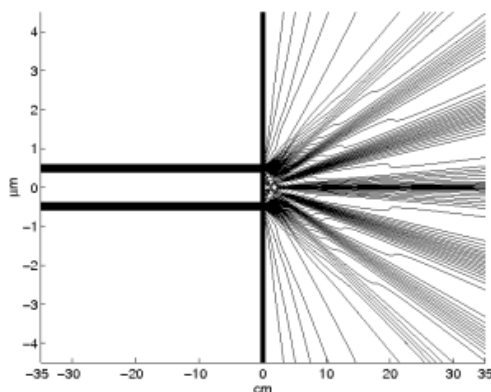


Fig. 3.2 : Trajectoires bohmiennes des électrons - expérience des fentes de Young

Le phénomène d'interférences a été mis en évidence avec des objets quantiques mésoscopiques individuels comme les fullerènes (C_{60} , C_{70}), par des chercheurs de l'université de Vienne en 1999.



Fig. 3.3 : Molécule de fullerène C_{60}

Il est difficile de refuser une réalité physique à la molécule de fullerène, plus précisément de lui refuser une position dans l'espace et une trajectoire passant par une seule fente. La découverte de la dualité onde-corpuscule et du phénomène d'interférences pour ces macromolécules est donc un bon argument en faveur de la d'une approche réaliste de la physique quantique et en défaveur de l'interprétation de Copenhague.

c) Développement ultérieur de la théorie de De Broglie-Bohm

La théorie de De Broglie-Bohm est un sujet toujours actif de nos jours. Un problème fréquemment entendu à propos de cette théorie est qu'elle n'est pas relativiste. En effet, la formule de guidage a la vitesse de chaque particule définie en termes de la fonction d'onde et de ses dérivées spatiales évaluées au point de configuration du système entier à N-particules à cet instant. La vitesse d'une particule dépend donc des positions instantanées des autres particules.

Cependant, des travaux récents ont montré que cette théorie peut être compatible avec l'invariance de Lorentz (*Dürr et al., 2004*), et même peut être étendue à la théorie quantique des champs (*Dürr et al., 2013*).

4) Perspectives modernes de l'approche ondulatoire - analogies hydrodynamiques

a) Dualité onde-corpuscule à l'échelle macroscopique

Tout d'abord, nous allons étudier une expérience menée en premier lieu par des chercheurs français (*Couder & Fort, 2006*). L'expérience est la suivante : prenons un fluide de densité ρ , tension superficielle σ dans un bain de hauteur H , subissant un mouvement de vibration vertical d'amplitude A_0 et de pulsation ω . Cette vibration produit des ondes, appelées ondes de Faraday (*Faraday, 1831*), ce sont des ondes stationnaires non-linéaires.



Fig. 4.1 : Ondes de Faraday (*Bush, 2015*)

Ils ont découvert qu'une gouttelette millimétrique suspendue sur cette surface de fluide vibrant peut avoir une auto-propulsion à travers une interaction résonnante avec sa propre fonction d'onde. On parle de «marcheur», guidé par sa fonction d'onde. Plus précisément, en considère le coefficient $\gamma = A_0\omega^2$, les expériences du marcheur fonctionnent pour $\gamma < \gamma_F$ (seuil de Faraday); au-delà, le système est instable.

La particule oscille à une certaine fréquence notée ν_F , cette fréquence dépend de la fréquence de vibration du fluide et également de la tension superficielle σ de ce fluide.



Fig. 4.2 : «Marcheur» (*Bush, 2015*)

Les expériences menées ont montré que ce système gouttelette + fluide vibrant permet de reproduire les effets de la mécanique quantique : diffraction d'une simple particule (Couder & Fort 2006), effet tunnel, orbites quantifiées (Fort et al. 2010), états de spin,... La gouttelette est associée à une onde, et cette onde va guider la particule (onde pilote). Par exemple, nous illustrons ci-dessous les résultats pour les expériences de diffraction.

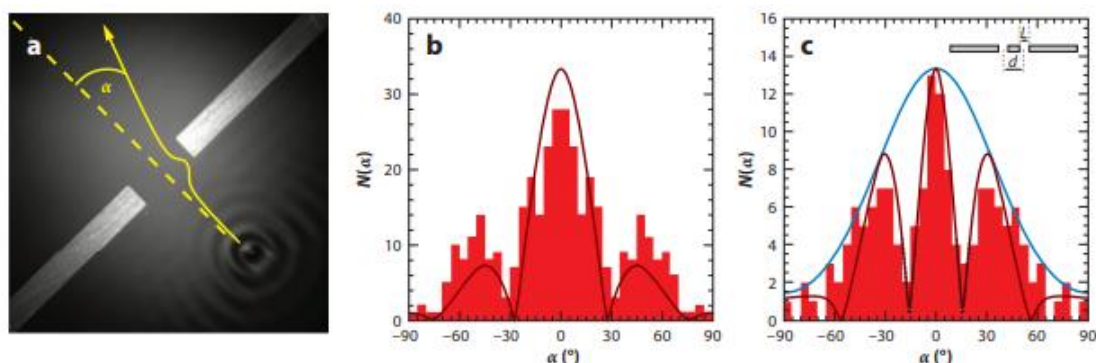


Fig. 4.3 : Diffraction d'une particule (Bush, 2015).

- (a) Particule et son onde passant à travers une fente;
 (b) Histogramme de répartition des particules en fonction de l'angle α - simple fente (diffraction);
 (c) Histogramme - double fente (interférences)

Le processus de la double fente est le suivant : tandis que le marcheur passe par l'une ou l'autre fente, son onde pilote passe par les deux; donc le marcheur «sent» effectivement la seconde fente par l'intermédiaire de son onde pilote. Si l'on ne peut observer directement le marcheur, on ne peut prédire la trajectoire finale du marcheur. Ces expériences de Couder et Fort suggèrent de plus que la dynamique de l'onde pilote est suffisamment complexe pour être chaotique, avec un angle de déflexion α sensible au point de passage de la fente et à la phase de rebond.

Tout cela montre que les résultats des expériences quantiques n'ont rien d'étrange, étant donné que l'on peut les reproduire à l'échelle macroscopique. Ce sont des phénomènes essentiellement ondulatoires.

En examinant le comportement d'une gouttelette «libre» sans influence extérieure, on observe qu'elle a un comportement très aléatoire, analogue à un mouvement brownien. Mais à cause de l'onde dont elle est associée, on observe au bout d'un certain temps que la particule va plus aller au niveau de certaines orbites : on

retrouve alors une distribution similaire à la fonction d'onde de la mécanique quantique.

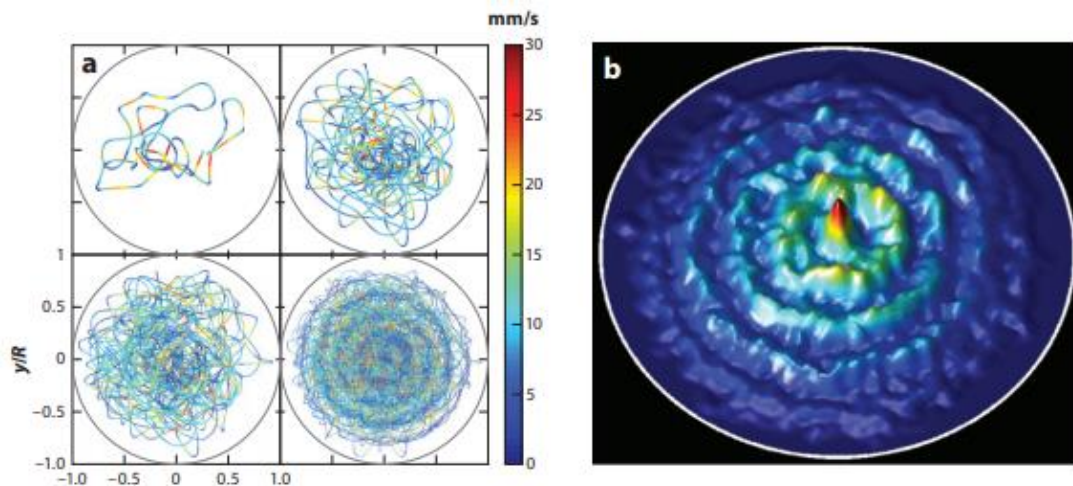


Fig. 4.4 : Trajectoire de la particule formant une fonction d'onde statistique

Source : *Bush, 2015*. Expérience « Coral »

L'analogie entre phénomènes quantiques et hydrodynamique a également été mise en évidence à travers d'autres phénomènes : effet Casimir (*Denardo et al., 2009*), superfluides, condensats de Bose-Einstein.

Nous avons là un système de dualité onde-corpuscule à l'échelle macroscopique. Les propriétés de la gouttelette et de son onde pilote sont visibles. Le système du marcheur ressemble à la conception de l'onde pilote De Broglie et Bohm, selon laquelle la particule microscopique bouge en résonance avec sa propre onde. Il est cependant plus proche de la théorie de la double solution de De Broglie : dans cette théorie, comme dans le système hydrodynamique, on a une onde pilote réelle et une onde statistique; dans la mécanique bohmiennne, l'onde de guidage est une onde statistique.

De Broglie n'a jamais spécifié l'origine physique ni la forme géométrique de l'onde pilote. Il a proposé qu'elle était liée linéairement à l'onde statistique dans le champ lointain, mais était non-linéaire dans les environs de la particule. Il a évoqué une singularité au niveau de la position de la particule.

Deux facteurs clés du système du marcheur sont absents de la conception De Broglie :

- Le marcheur interagit avec un champ existant (l'interface) et il n'y a nul besoin d'une singularité;
- La relation entre l'onde réelle et l'onde statistique émerge à travers la dynamique chaotique de l'onde pilote.

b) Approche stochastique

La mécanique bohémienne a été étendue pour incorporer l'influence d'un domaine sub-quantique stochastique, tout d'abord avec les travaux de Bohm et Vigier (1954) que nous avons décrit précédemment.

Puis, Edward Nelson a montré qu'en considérant un système classique stochastique (processus de Wiener) de masse m avec un coefficient de diffusion \hbar/m , on obtient l'équation de Schrödinger (Nelson, 1966). Ici, l'évolution de la fonction d'onde n'est plus donnée par un postulat, mais déduite d'autres postulats plus fondamentaux (mouvement brownien). Comme la théorie de Bohm, la mécanique de Nelson reproduit exactement les résultats de la mécanique quantique. Elle donne un rôle important aux équations hydrodynamiques de Madelung (1926).

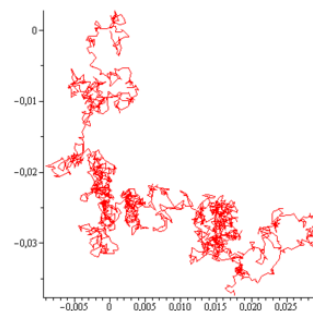


Fig. 4.5 : Mouvement brownien (Brown, 1828)

Selon De Broglie, l'élément aléatoire d'origine cachée doit être admis. Le mouvement de la particule est une combinaison de mouvement régulier défini par la formule de guidage, avec un mouvement aléatoire de caractère brownien. On a ici une analogie avec la thermodynamique, où l'élément aléatoire résulte des collisions des molécules entre elles dans le gaz («chaos moléculaire»); les molécules invisibles jouent le rôle de thermostat caché.

La particule échange en permanence de l'énergie et de l'impulsion avec un tel thermostat caché. Ce milieu ne serait pas un milieu de référence universel, car il violerait la relativité, mais plutôt un ensemble de thermostat.

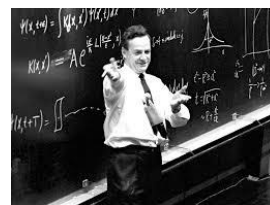
Un argument important va en faveur de cette approche stochastique est l'analogie entre la physique statistique et la mécanique quantique (*Mallick, 2012*). Cette analogie, ou dictionnaire, a été mise en valeur au cours de la 2^e moitié du XX^es., et est résumé dans le tableau ci-dessous :

Tab. 4.1 : Dictionnaire physique statistique - mécanique quantique

Physique statistique	Mécanique quantique
Energie E	Action S
Poids de Boltzmann : $P_n = \frac{N_n}{N} = \frac{\exp(-\beta E_n)}{Z}$	Amplitude de Feynman : $\langle X_b, t_b X_a, t_a \rangle = \sum_{\text{chemins}} \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right)$
Température T	Constante de Planck \hbar
Temps imaginaire τ	Temps réel t



Ludwing Boltzmann



Richard Feynman

Selon l'électrodynamique stochastique (SED), la stochasticité dans le domaine sub-quantique a pour origine les fluctuations électromagnétique du vide, ou champ du point zéro (*De la Pena & Cetto, 1986, 2015*). C'est l'énergie qui subsiste lorsque toute autre forme d'énergie a été enlevée (particules massives, photons,...), elle a été prédite par la théorie quantique des champs. Chaque mode de ce champ a un niveau d'énergie minimum moyen de : $E(\omega) = \frac{1}{2} \hbar \omega$.

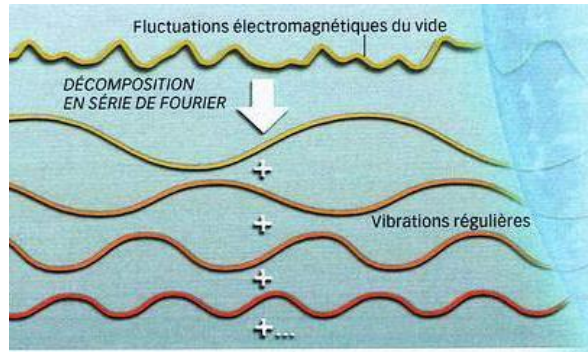


Fig. 4.6 : Fluctuations électromagnétiques du vide

L'onde pilote est alors, dans cette vision, de nature électromagnétique et en résonance avec la particule.

On peut représenter dans le tableau ci-dessous les analogies et différences entre l'onde pilote de De Broglie, l'électrodynamique stochastique, et le système hydrodynamique (*Bush, 2015*) :

Tab. 4.2 : Analogies hydrodynamique – onde pilote

Hydrodynamique	Onde pilote
Fluide	Espace
Tension superficielle du fluide σ	Constante de Planck h
Ondes de Faraday	Fluctuations du vide (électrodynamique stochastique)
Gouttelette	Particule
Rebond	Vibration - Zitterbewegung
Fréquence de rebond ν_c	Fréquence de vibration $\nu_p = \frac{2mc^2}{h}$
Onde hydrodynamique	Onde pilote
Résultats obtenus : Diffraction, interférences, effet tunnel, effet Casimir	Résultats obtenus : Diffraction, interférences, effet tunnel, effet Casimir + intrication

5) Questionnements sur l'éther, l'espace et le temps

Différents éthers ont été considérés au fil des siècles, à travers les effets qu'ils produisent. Ces effets concernaient la transmission de la force gravitationnelle (Isaac Newton), le transport de la lumière (depuis Descartes, Robert Hooke, Newton et bien d'autres jusqu'au début du XX^e siècle), le transport de la force électrique, magnétique, et ensuite du courant électromagnétique (Maxwell),... Les ondes ont besoin d'un milieu pour se propager, comme c'est le cas du son (dans l'air) et des vagues (dans l'eau).

Au début du XX^e siècle, l'expérience de Michelson et Morley a remis en cause l'existence de l'éther. Einstein a développé la relativité restreinte sans besoin de le faire intervenir, et l'éther a par la suite été abandonné par les physiciens.

Cependant, en 1916, après la publication de la théorie de la relativité générale, Einstein reconnaît la possibilité d'introduire un nouveau concept d'éther. Ce « nouvel éther » serait doté d'un état qui déterminerait le mouvement des objets physiques, dont le comportement serait décrit par le tenseur métrique. L'éther de la relativité générale dote l'espace d'un « champ d'états », interagissant avec la matière et étant influencée par elle.

Einstein explique en 1920 que l'idée d'un éther peut être rétablie afin d'attribuer des propriétés physiques (autres que mécaniques ou cinématiques) à l'espace, et que l'espace - même dépourvu de matière - ne peut être considéré comme réellement vide. Inspiré par les idées de Mach, il énonce le besoin d'un milieu pour transmettre l'interaction gravitationnelle de ces masses distantes, cette vision est reliée à la relativité générale.

« D'après la théorie de la relativité générale, l'espace est pourvu de propriétés physiques, et dans ce sens il existe un éther. Un espace sans éther est inconcevable, car la propagation de la lumière y serait impossible, et car il n'y aurait même aucune possibilité d'existence pour les règles et horloges et par conséquence aussi pour les distances spatio-temporelles dans le sens de la physique » (*Einstein, 1920*).

Cette approche de l'espace-temps doté de propriétés physiques et ondulatoires est d'autant plus d'actualité de nos jours, avec la découverte des fluctuations du vide, de la création / annihilation de particules virtuelles, de la notion de champ quantique et de milieu sub-quantique.

Conclusion et questionnements philosophiques

Nous pouvons nous demander l'intérêt de modifier l'interprétation actuelle de Copenhague si elle suffit à rendre compte de tous les phénomènes observables ? Le retour à des conceptions claires, causales, respectant la validité du cadre de l'espace-temps, satisferait beaucoup d'esprits et permettrait de lever les objections d'Einstein et de Schrödinger. Si l'interprétation actuelle suffit à la prévision des phénomènes à l'échelle atomique (jusqu'à 10^{-13} m), il pourrait ne pas en être de même à l'échelle inférieure.

De nos jours, les théorèmes d'impossibilité énoncés par les tenants de Copenhague (ceux de Von Neumann en particulier) ne sont plus vraiment pertinents. Franck Laloë indique à ce sujet : « Nous savons maintenant que l'interprétation orthodoxe de Copenhague n'est pas la seule possibilité logique. D'autres interprétations restent parfaitement possibles, le déterminisme n'étant pas du tout éliminé ».

La physique ondulatoire est une incitation à une révision déchirante de la confiance que nous portons à notre sens commun, dans la compréhension de la nature.

Nous pouvons résumer ici les propriétés ondulatoires de la nature telles que nous les connaissons aujourd'hui, dans la continuité des idées de De Broglie, avec des analogies hydrodynamiques :

Espace-temps / éther	↔	Fluide (avec des propriétés ondulatoires)
Fluctuations du vide	↔	Petites ondes sur le fluide
Lumière	↔	Ondes de plus grande amplitude
Particules de matière	↔	Vortex au sein du fluide

Une réflexion peut être également menée à propos de la physique théorique moderne. Selon De Broglie, la physique moderne ne semble pas bâtie sur de bonnes bases. Une science peut très bien avoir un fort rôle prédictif, coller à l'expérience, tout en étant basée sur des principes contestables. C'est le cas selon lui de la mécanique quantique, comme nous l'avons vu précédemment. De plus, la physique moderne peine à expliquer les notions élémentaires de masse, d'énergie, de matière, de temps, alors que tous les raisonnements physiques se basent sur ces concepts. Sa réflexion concernait également le rôle prépondérant joué par les mathématiques dans la physique moderne (« Shut up and calculate » prône le physicien Feynman), et le danger associé.

De Broglie questionna également l'apport moral de la science et de la physique (Lochak, 2008). On peut aimer la science pour ses applications et pour les commodités qu'elle a apportées à la société. Cependant, toutes les applications scientifiques ne sont pas bienfaites, et il n'est pas certain que son développement doive assurer le progrès réel de l'humanité, car ce progrès dépend beaucoup plus de l'élévation spirituelle et morale de l'homme que des conditions matérielles de sa vie. Seule la science fondamentale peut nous faire progresser dans la compréhension profonde du monde. Elle doit se fonder sur les valeurs de liberté et de vérité, bien que nous sommes conscients de notre propre défaillance sur un si long chemin...

« Je vois que je n'ai été qu'un petit enfant qui jouait sur le bord de la mer, tandis que le grand océan de la vérité s'étendait, inexploré, devant moi. » Isaac Newton



Références

J.S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, 1987

V. Besson, *L'interprétation causale de la mécanique quantique : biographie d'un programme de recherche minoritaire (1951–1964)*, thèse Université de Lyon, Universidade federal da Bahia, 2018.

D. Bohm, *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables*, *Physical Review* 85, 1952

D. Bohm & J.P. Vigier, *Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations*, *Physical Review* 96, 1954

N. Bohr, *On the Constitution of Atoms and Molecules*, *Phil. Mag.* 6, 1913

R. Brown, *A brief account of microscopical observations on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies*, *Philosophical Magazine and Annals of philosophy*, 1828

J.W.M. Bush, *Pilot-Wave Hydrodynamics*, *Annual Review of Fluid Mechanics* 47, 2015

J.W.M. Bush, *The new wave of pilot-wave theory*, *Physics Today* 68, 2015

A. Compton, *A Quantum Theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements*, *Physical Review* 21, 1923

Y. Couder, E. Fort, *Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale*, *Physical Review letters* 97, 2006

C.J. Davisson & L.H. Germer, *Reflection of Electrons by a Crystal of Nickel*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 14, 1928

L. De Broglie, *Recherches sur la théorie des Quanta*, thèse Facultés des Sciences de Paris, 1924

L. De Broglie, *Théorie de la double solution*, *Journal de Physique*, 1927

L. De Broglie, *La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?*, *Revue d'histoire des sciences*, 1952

L. De La Pena & A. M. Cetto, *The physics of stochastic electrodynamics*, *Il Nuovo*

Cimento B 92, 1986

L. De La Pena, A. M. Cetto & A.V. Hernandez, *The Emerging Quantum: The physics Behind Quantum Mechanics*, Springer, 2015

C. Denardo et al., 2009, *A water wave analog of the Casimir effect*, American Journal of Physics 77, 2009

P.A.M. Dirac, *The quantum theory of the electron*, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 117, 1928

P.A.M. Dirac, *The principles of Quantum Mechanics*, Oxford, 1930

D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka, N. Zanghi, *Bohmian Mechanics and Quantum Field Theory*, Physical Review Letters 93, 2004

D. Dürr, S. Goldstein, T. Norsen, W. Struyve & N. Zanghi, *Can Bohmian mechanics be made relativistic?*, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 470, 2013

A. Einstein, *Éther et la théorie de la relativité*, discours université de Leyde, 1920

A. Einstein, *Conceptions scientifiques*, Flammarion, 1952

M. Faraday, *On a peculiar class of acoustical figures; and on certain forms assumed by a group of particles upon vibrating elastic surfaces*, Philosophical Transactions of the Royal Society (London) 121, 1831

R. Feynman, *Lumière et matière, une étrange histoire*, Seuil, Points sciences, 1987

M. Gondran & A. Gondran, *Mécanique quantique, Et si Einstein et De Broglie avaient aussi raison ?*, Editions matériologiques, 2014

C. Jönsson, *Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten*, Zeitschrift für Physik 161, 1961

F. Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique*, 2e édition, EDP Sciences, 2018

G. Lochak, *Voyage au centre de la science du XXe siècle : Sur les traces de Louis de Broglie*, Hermann, 2008

E. Madelung, *Quantentheorie in Hydrodynamischen form*, E. Z. Physik 40, 1926

K. Mallick, *Les émerveillements d'un théoricien*, conférence, CEA Saclay, 2012

A.A. Michelson & E.W. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, American Journal of Science, 1887

E. Nelson, *Derivation of the Derivation of the Schrödinger equation from Newtonian mechanics*, Physical review 150, 1966

E. Schrödinger, *An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules*, Physical Review 28, 1926

R. Thom, *Prédire n'est pas expliquer*, Flammarion, 1991

A. Vila-Valls, *Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)*, thèse Université Claude Bernard – Lyon I, 2012