

Comparaison entre  
la théorie quantique standard  
et celle de de Broglie - Bohm dite de l'onde pilote

Mémoire de master MADELHIS  
étudiant: Alain Le Rille  
sous la direction de Léna Soler

version du 17 septembre 2021  
revue après soutenance le 15 septembre  
et les remarques de Jean Bricmont



# Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>13</b>
- . . . . .	14
<b>I Description comparative de SQM et BQM</b>	<b>15</b>
<b>1 Introduction historique</b>	<b>17</b>
1.1 Les concepts d'onde et de particule dans l'histoire de la physique classique . . . . .	17
La mécanique classique s'appuie sur le concept de particule. Les concepts de champ (et d'onde) ont émergé ensuite en physique classique. La mécanique classique s'appuie sur deux visions : l'une lagrangienne et l'autre eulérienne. Il y a en optique deux visions : l'une corpusculaire et l'autre ondulatoire. La physique classique utilise des grandeurs continues. La physique classique est marquée par une « dualité » onde - corpuscule.	
1.2 La naissance de la physique quantique . . . . .	20
Des phénomènes physiques sont inexplicables au début du XX <sup>e</sup> siècle. Solution <i>ad hoc</i> , l'ancienne théorie des quanta est un ensemble de modèles sans cadre théorique où les discontinuités (quanta) sont présentes. La théorie quantique se structure dans les années 1920 à partir de la mécanique ondulatoire et de la mécanique des matrices. Une interprétation indéterministe de la mécanique quantique émerge à la fin des années 1920. Une vision déterministe, la théorie de l'onde pilote de de Broglie, est rejetée au congrès Solvay de 1927. La théorie de l'onde pilote renaît en 1952 avec Bohm.	
<b>2 Présentation de SQM et BQM</b>	<b>27</b>
2.1 Qu'est-ce que SQM? . . . . .	27
Plutôt que l'« interprétation de Copenhague », mal définie, SQM est la mécanique quantique telle qu'elle est présentée aujourd'hui par les manuels. SQM postule la complétude de la description physique par la fonction d'onde. La fonction d'onde est une sorte de « catalogue » de résultats de mesures possibles, avec la probabilité de chacune de ces mesures possibles. SQM se revendique comme une épistémologie sans ontologie. SQM s'appuie parfois sur la complémentarité pour interpréter les phénomènes observés. SQM utilise les images classiques d'onde et de particule, qui sont complémentaires et s'excluent l'une l'autre. Selon la complémentarité, on peut faire appel à l'image mentale d'une onde <i>ou</i> d'une particule, c'est-à-dire que le système ne peut se réduire ni à une onde ni à une particule. SQM rejette les concepts corpusculaires classiques (position, trajectoire, . . .). SQM s'adosse à une fonction d'onde qui n'est pas relative à une onde au sens classique du terme.	
2.2 Qu'est ce que BQM? . . . . .	33
Dans la continuité de la vision classique, BQM utilise l'onde <i>et</i> la particule, deux concepts qui co-existent sans s'exclure, celle-là guidant celle-ci. Il existe deux versions cohérentes de BQM : celle de de	

Broglie et celle de Bohm. BQM utilise la fonction d'onde (comme SQM) mais la description de BQM est enrichie par les trajectoires : c'est une « théorie à variables cachées ». BQM se fonde sur l'existence des trajectoires (dites « bohmiennes »). L'onde et la particule ont des statuts différents pour BQM. Contrairement à ce que l'on pourrait penser *a priori*, BQM est en rupture avec la mécanique classique.

**2.3 L'articulation de SQM et BQM avec la physique classique . . . . . 38**

**2.3.1 Le raccord de SQM avec la mécanique classique . . . . . 38**

Les quanta, discontinuités absentes en physique classique sont présentes en SQM. La mécanique classique est un cas asymptotique de SQM selon le principe de correspondance. Le passage SQM - classique s'appuie aussi sur le théorème d'Ehrenfest. Le principe de correspondance permet de faire entre les domaines quantique et classique une distinction qui est nécessaire à SQM.

**2.3.2 Le raccord de BQM avec la mécanique classique . . . . . 41**

La mécanique classique apparaît comme un cas asymptotique de BQM (quand le potentiel quantique devient négligeable). Les trajectoires BQM sont bien peu classiques. La quantification apparaît dans BQM, une fois terminé le régime transitoire auquel sont soumises les trajectoires bohmiennes.

**2.3.3 La mécanique classique irréductible à un cas limite de SQM ou de BQM . . . . . 42**

La mécanique classique est irréductible à un cas particulier de la mécanique quantique (que cette dernière soit SQM ou BQM). Une particule quantique est caractérisée à partir de grandeurs n'ayant pas de correspondant classique.

**3 La mesure dans les cas SQM et BQM . . . . . 47**

**3.1 Quel est le statut des probabilités des résultats de mesure ? . . . . . 47**

**3.1.1 La probabilité de mesure en BQM due au manque d'information . . . . . 47**

En BQM, les probabilités traduisent une incertitude due à un manque d'information. La fonction d'onde en BQM donne accès à une mesure du manque d'information. En BQM, l'information manquante se trouve dans les variables « cachées » et la fonction d'onde permet de faire un traitement statistique. Les trajectoires bohmiennes sont soumises à un chaos déterministe du fait de la sensibilité aux conditions initiales.

**3.1.2 La probabilité de mesure en SQM due à un hasard fondamental . . . . . 50**

Les grandeurs physiques sont indéterminées en SQM. La fonction d'onde en SQM n'est pas liée au manque d'information. Le hasard est intrinsèque en SQM lors de la mesure et la fonction d'onde permet de faire un traitement statistique.

**3.1.3 Le traitement statistique des mesures pour SQM et BQM . . . . . 51**

Les probabilités de mesure bien qu'elles n'aient pas le même sens pour SQM et BQM sont numériquement identiques. Le traitement statistique d'un mesurage répété donne donc la même mesure moyenne et le même écart type dans les cas SQM et BQM.

**3.2 Que se passe-t-il lors du processus de mesure ? . . . . . 52**

**3.2.1 La modélisation du processus de mesure . . . . . 52**

Imaginons que l'on effectue la mesure d'une grandeur sur un système microscopique dont on connaît la fonction d'onde. Lors du mesurage le système microscopique étudié interagit avec un appareil de mesure macroscopique dont on modélise le résultat par la position indiquée par une aiguille. La théorie de von Neumann de la mesure revient à traiter de façon quantique l'appareil de mesure macroscopique. Du fait de l'interaction entre le système mesuré et l'appareil de mesure, la fonction d'onde du système intriqué se retrouve dans une superposition de paquets d'ondes qui ne se chevauchent plus. Comme l'appareil de mesure est classique, sa fonction d'onde ne peut pas se trouver dans cette superposition, puisque l'aiguille indique un unique résultat.

**3.2.2 La mesure SQM, fondée sur l'effondrement du paquet d'ondes . . . . . 56**

L'effondrement du paquet d'ondes pour le système étudié mène à l'unicité de l'indication de l'appareil de mesure. La fonction d'onde, catalogue de potentialités, « s'actualise » du fait de l'effondrement du paquet d'onde, et ne subsiste qu'une unique possibilité. L'effondrement du paquet d'onde est une rupture dans l'évolution de la fonction d'onde, aléatoire, non déterministe et brutale. Le processus d'effondrement du paquet d'onde repose sur l'articulation entre quantique et classique. Le processus d'effondrement du paquet d'onde implique l'intervention d'un observateur.

**3.2.3 La mesure BQM, fondée sur les paquets d'ondes vides . . . . . 58**

La fonction d'onde est selon BQM une superposition de paquets d'ondes, tous vides sauf un. Pour BQM, l'évolution du pointeur de l'appareil de mesure, comme pour une quelconque particule, est le fait du guidage par la fonction d'onde. La mesure BQM est conforme à celle donnée par SQM. La mesure selon BQM s'effectue sans rupture, de façon déterministe et sans intervention de l'observateur.

**3.3 Quelques propriétés quantiques de la mesure . . . . . 60**

**3.3.1 Qu'est-ce que la « contextualité » de la mesure ? . . . . . 60**

La mesure classique revient au « prélèvement » d'une propriété intrinsèque à un objet réel. La contextualité se caractérise par le fait qu'une mesure effectuée sur un système ne révèle pas une valeur préexistante d'une propriété du système mais dépend essentiellement de la façon dont est conduite l'expérience (du contexte). En SQM, toutes les mesures sont contextuelles conformément au fait que toutes les grandeurs sont indéterminées. La mesure en BQM est bien souvent contextuelle aussi. Certaines grandeurs en BQM, nommées « êtrables », sont caractéristiques de la particule, comme sa position.

**3.3.2 Qu'est-ce que la « non localité » ? . . . . . 65**

La physique classique est locale : elle suppose que des objets suffisamment éloignés l'un de l'autre n'ont pas d'influence mutuelle. L'expérience de pensée EPR prévoit un comportement paradoxalement non local selon SQM. Les inégalités de Bell permettent d'imaginer un test quantitatif de la localité suivant l'expérience de pensée EPR, des expériences sont réalisées qui montrent que les inégalités de Bell sont violées : la physique quantique est non locale. SQM est non locale. BQM est non locale. La non localité quantique est due à l'intrication.

- . . . . . 68

**II Défauts et qualités comparés de SQM et BQM 71**

**4 Le « problème de la mesure » 73**

**4.1 Le « problème de la mesure » pour SQM . . . . . 73**

Le concept de mesure, non défini en SQM, implique une rupture dans l'évolution de la fonction d'onde. Le processus de mesure pour SQM s'adosse à la physique classique. La mesure en SQM nécessite une division – problématique – du monde entre microscopique obéissant à la physique quantique et macroscopique obéissant à la physique classique. La mesure en SQM suppose l'existence d'un sujet conscient qui réalise l'expérience.

**4.2 La décohérence, solution au problème de la mesure SQM ? . . . . . 76**

La décohérence, fondée sur le « brouillage » des interférences quantiques, a pour but d'expliquer l'émergence, pour un système microscopique, d'un comportement classique. La décohérence est due aux interactions du système étudié avec l'environnement. Si, grâce à elle, l'articulation problématique entre microscopique et macroscopique disparaît, la décohérence n'explique pas l'effondrement du paquet d'ondes dont la nécessité subsiste.

**4.3 La dissolution du « problème de la mesure » par BQM . . . . . 78**

La mesure en BQM est un processus comme un autre qui n'implique aucune règle spécifique. La mesure en BQM ne présuppose pas de division microscopique / macroscopique ni quantique / classique. La mesure en BQM est détachable de l'observateur. BQM n'est pas une solution au problème de la mesure, mais présente en fait une absence de problème, ce qui lui confère sur ce sujet une grande supériorité sur SQM.

**5 Simplicités comparées de BQM et SQM 81**

**5.1 Différentes composantes de la simplicité . . . . . 81**

Vouloir comparer les simplicités de SQM et BQM nécessite de lister les différents sens qu'on peut attribuer à la « simplicité ». La comparaison des simplicités de SQM et BQM au sens de « ce qui est facile à comprendre » est assez subjective.

**5.2 Simplicité formelle . . . . . 82**

**5.2.1 SQM nécessite moins d'objets mathématiques pour définir l'état du système . . . . . 82**

Le rasoir d'Ockham est souvent invoqué contre BQM. La parcimonie des concepts utilisés est un des points caractéristiques de SQM. En ajoutant les positions à la fonction d'onde, BQM est moins simple que SQM. Puisque BQM est moins simple que SQM sans apporter de prédictions différentes, elle pourrait être à rejeter selon le « rasoir d'Ockham ».

**5.2.2 BQM utilise moins d'axiomes . . . . . 83**

SQM a plus d'axiomes que BQM car certains axiomes SQM sont spécifiquement dédiés au problème de la mesure. Puisque SQM a plus d'axiomes que BQM pour régler de façon *ad hoc* le problème de la mesure, elle pourrait être à rejeter selon le « rasoir d'Ockham ».

**5.2.3 BQM et SQM présentent une simplicité formelle équivalente . . . . . 84**

Il est possible de mettre en parallèle les éléments des formalismes de SQM et BQM. SQM et BQM présentent une simplicité formelle équivalente si sont pris en compte les axiomes et les objets impliqués. Aussi, il n'est pas convaincant d'évoquer le « rasoir d'Ockham » pour préférer SQM ou BQM.

**5.3 Simplicité opérationnelle . . . . . 86**

**5.3.1 La voie « analytique » de BQM est plus compliquée que SQM à cause de la détermination des trajectoires bohmiennes . . . . . 86**

En SQM, il suffit de déterminer la fonction d'onde. Aussi, BQM peut sembler plus compliquée du point de vue opératoire du fait de la détermination des trajectoires. La détermination des trajectoires BQM est compliquée surtout par l'introduction du potentiel quantique.

**5.3.2 La voie « synthétique » de BQM, alternative dans le but de la détermination de la fonction d'onde, est moins simple que SQM . . . . . 88**

BQM propose deux voies opérationnelles : la détermination des trajectoires à partir de la fonction d'onde ou l'inverse. Ainsi, BQM ajoute une autre méthode opérationnelle possible de détermination de la fonction d'onde fondée sur les calculs de trajectoires bohmiennes.

**5.3.3 SQM est plus simple que BQM du point de vue de la simplicité opérationnelle . . . . . 89**

Pour BQM, il est possible de se limiter à la détermination de la fonction d'onde comme dans le cas SQM. BQM est moins simple que SQM du point de vue opérationnel puisqu'elle propose, en plus de la détermination de la fonction d'onde, la détermination de trajectoires.

**6 Intelligibilité comparée de SQM et BQM 91**

**6.1 Représentations mentales de SQM et BQM . . . . . 91**

**6.1.1 Les représentations mentales procédurales pour SQM et BQM : robustes . . . . . 91**

La mécanique quantique est accusée d'être incompréhensible, ce qui implique un défaut de représentation mentale que l'on peut s'en faire. Les représentations mentales peuvent être déclinées sous diverses

formes (procédures, concepts, images), qu’il s’agit d’étudier spécifiquement. La détermination de la fonction d’onde procure une représentation mentale de type procédural particulièrement robuste en SQM et BQM.

6.1.2 Les représentations mentales de BQM (RB) : proches de celles de la mécanique classique . . . . . 93

BQM est fondée sur le concept de dualité qui donne lieu à deux images qui coexistent en permanence : l’onde et la particule. Images et concepts BQM fournissent cependant des représentations mentales qui s’éloignent un peu de celles de la mécanique classique.

6.1.3 Les représentations mentales de SQM (RS) : fragmentaires . . . . . 95

SQM rejette les représentations conceptuelles et imagées classiques. En SQM, les représentations conceptuelles et imagées ne sont pas uniques, elles changent brusquement lors de la mesure. Le langage révèle que les images mentales mobilisées par SQM sont problématiques. Ceux qui utilisent SQM se « raccrochent » souvent à une représentation mentale purement procédurale du fait de la faiblesse des représentations imagées.

6.2 Utilisations didactiques de SQM et BQM . . . . . 99

6.2.1 Les « conceptions », obstacles à l’apprentissage . . . . . 99

Enseigner la mécanique quantique constitue un véritable défi. L’apprentissage implique un conflit entre connaissances antérieures et nouvelles. Le dépassement des conceptions antérieures n’est pas une problématique propre à l’enseignement de la mécanique quantique. Les conceptions acquises propres à la mécanique classique font obstacle à l’apprentissage de la mécanique quantique.

6.2.2 Stratégie didactique S1 : SQM avec des représentations mentales uniquement procédurales . . . . . 101

L’enseignant peut présenter SQM sans aucune autre représentation mentale que procédurale (ce qui est résumé dans la formule « shut up and calculate »). Du fait qu’il ne compte pas sur les images et les concepts SQM pour remplacer ceux issus de la mécanique classique, l’enseignant élimine ainsi les conceptions antérieures, sans les remplacer.

6.2.3 Stratégie didactique S2 : SQM avec des représentations mentales enrichies mais fragmentaires . . . . . 102

La deuxième stratégie consiste à éliminer les conceptions classiques en les réfutant. L’enseignant remplace les images mentales antérieures par des images complémentaires et fragmentaires qui confèrent à SQM une aura d’étrangeté attrayante pour les étudiants.

6.2.4 Stratégie didactique S3 : BQM avec des représentations mentales enrichies non fragmentaires . . . . . 104

La troisième stratégie consiste à dépasser les conceptions classiques en les utilisant. BQM permet de s’appuyer sur les représentations mentales de la mécanique classique pour mieux les dépasser.

6.3 Comparaison de SQM et BQM pour comprendre et apprendre la mécanique quantique . . . 105

6.3.1 De l’intuition . . . . . 105

L’intelligibilité de la mécanique quantique est liée à l’intuition que l’on peut s’en faire. SQM est souvent accusée d’être contre-intuitive, à tort.

6.3.2 Conclusion sur l’intérêt didactique comparé de SQM et BQM . . . . . 106

Se réduire à des représentations purement procédurales n’est pas satisfaisant du point de vue pédagogique. En voulant donner une interprétation au formalisme, parfois les manuels de mécanique quantique « ontologisent » de façon indue. BQM présente un intérêt pédagogique supérieur à SQM parce qu’elle fournit des images mentales non fragmentaires.

6.3.3 Conclusion sur l’intérêt heuristique comparé de SQM et BQM . . . . . 109

L'intérêt des images mentales pour les praticiens de la mécanique quantique est discutable. Du fait de leur caractère fragmentaire, les représentations mentales de SQM sont parfois boudées par les chercheurs. BQM présente un intérêt heuristique certain pour le chercheur.

- . . . . .	111
<b>Conclusion</b>	<b>115</b>
De la sous-détermination des théories par la phénoménologie . . . . .	115
Conclusion sur la description comparative de SQM et BQM . . . . .	115
Conclusion sur les défauts et qualités comparés de SQM et BQM . . . . .	117
Limites de ce travail . . . . .	118
- . . . . .	118

**Annexes** **121**

**A Repères biographiques pour quelques physiciens cités** **121**

**B Glossaire** **127**

**C Présentation axiomatique de SQM et BQM dans le cas d'une unique particule non relativiste** **133**

C.1 Axiomes de SQM . . . . .	133
C.2 Axiomes de BQM . . . . .	134
C.3 Autres présentations de BQM . . . . .	135
C.4 Mesures moyennes . . . . .	137

**D Illustration des inégalités de Heisenberg pour SQM et BQM dans le cas du puits de potentiel infini à une dimension** **141**

D.1 Généralités sur les inégalités de Heisenberg . . . . .	141
D.2 Exemple du puits de potentiel infini à une dimension . . . . .	142

**E Approche biographique de Louis de Broglie**  
**Les revirements de Louis de Broglie vis-à-vis du déterminisme en mécanique quantique** **147**

E.1 Avant 1928 : Louis de Broglie met au point une théorie causale . . . . .	148
--	-----

Louis de Broglie devient physicien après une réorientation tardive. Par ses premiers travaux présentés dans sa thèse, de Broglie participe à la mise en place de la théorie quantique. En 1927, de Broglie travaille à une théorie causale de la mécanique quantique, la théorie de la double solution. Au 5e Conseil Solvay d'octobre 1927, de Broglie présente la théorie de l'onde pilote qui est une version simplifiée de la théorie de la double solution.

E.2 1927-1928 : premier revirement. Louis de Broglie abandonne la théorie causale . . . . .	151
---	-----

La proposition de la théorie de l'onde pilote est mal reçue au 5e Conseil Solvay. De Broglie continue pendant l'hiver 1927-28 à soutenir une position déterministe dans un « cours libre » avant d'abandonner sa théorie causale de la mécanique quantique en 1928. Il existe de nombreuses raisons scientifiques qui expliquent la conversion de de Broglie à la vision indéterministe. Les débuts professionnels – problématiques – de Louis de Broglie en tant qu'enseignant sont peut-être aussi un élément explicatif de sa conversion



à la vision dominante ainsi que sa volonté de rompre son isolement et de s'insérer dans la communauté internationale des chercheurs en physique théorique.

**E.3 1928-1951 : Louis de Broglie défend la théorie indéterministe . . . . . 155**

L'acceptation de la théorie indéterministe par de Broglie va de pair avec sa reconnaissance par la communauté scientifique. Pendant les années qui suivent son premier revirement, de Broglie abandonne quasiment le champ de la recherche. Entre 1928 et 1951, de Broglie fait œuvre de pédagogie et défend la vision indéterministe. Pendant cette période, la conversion de de Broglie à la vision indéterministe n'a peut-être pas été totale. Les travaux de recherche de de Broglie autour de 1950 esquissent les prémices de son « émancipation » vis-à-vis de la théorie indéterministe.

**E.4 1951-1952 : Second revirement. Louis de Broglie pense à nouveau qu'une théorie causale est possible . . . . . 160**

À partir du début des années 1950, de Broglie a acquis une position institutionnelle telle qu'il peut se permettre d'interroger à nouveau les fondements de la mécanique quantique. La proposition en 1951-1952 par David Bohm d'une théorie de l'onde pilote déclenche le second revirement de Louis de Broglie. Les relations de de Broglie avec Vigier et Einstein accompagnent et alimentent ses réflexions lors de son second revirement qui est rendu public en 1952.

**E.5 Après 1952 : Louis de Broglie cherche une nouvelle théorie causale . . . . . 163**

Après 1952, de Broglie est désormais convaincu qu'une théorie causale de la mécanique quantique est possible. Dans sa recherche d'une mécanique quantique causale, de Broglie rejette l'onde pilote et recherche à faire évoluer son ancienne théorie de la double solution. Après son retour à la vision déterministe, de Broglie est victime d'un certain ostracisme de la communauté scientifique. Les institutions ont vis-à-vis de de Broglie à la fin de sa carrière scientifique une position ambiguë.

**F Bibliographie commentée du cinquième congrès Solvay de 1927 . . . . . 169**

**F.1 Genèse et déroulement du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay . . . . . 171**

**F.1.1 Genèse du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay . . . . . 171**

A partir de 1911, sont organisées des conférences tous les trois ans, les Conseils Solvay. Les Allemands sont exclus des Conseils Solvay après la Première Guerre Mondiale. En octobre 1927, la théorie quantique est en train de se structurer. Une semaine de conférences scientifique est au programme du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay.

**F.1.2 Discussions entre Bohr et Einstein en marge du Conseil . . . . . 174**

Des sources historiques rares font mention de discussions entre Bohr et Einstein en marge du Conseil.

**F.1.3 Différentes interventions au 5<sup>e</sup> Conseil Solvay . . . . . 177**

Les actes du 5<sup>e</sup> Congrès Solvay sont publiés dans un rapport en français. Dans ces actes, l'« intervention » de Bohr a un statut particulier. La semaine de colloque débute par deux exposés d'expérimentateurs.

**F.2 Mise en place de l'« interprétation de Copenhague » de la mécanique quantique . . . . . 180**

**F.2.1 Exposé de Born et Heisenberg . . . . . 180**

L'exposé de Born et Heisenberg est un des fondements de l'« interprétation de Copenhague ».

**F.2.2 Article de Bohr joint aux actes du congrès . . . . . 181**

C'est le cas aussi de l'article de Bohr joint aux actes du congrès.

**F.2.3 Positions défendues par les partisans de l'interprétation de Copenhague lors des différentes discussions . . . . . 182**

Les positions défendues par les partisans de l'interprétation de Copenhague lors des différentes discussions montrent un « front commun ».

**F.3 Oppositions à l'interprétation de Copenhague . . . . . 184**

**F.3.1 La mise en cause de l'interprétation de Copenhague . . . . . 184**  
 Lorentz exprime des regrets concernant l'évolution de la mécanique quantique. Einstein propose une expérience de pensée pour montrer l'incomplétude de la mécanique quantique.

**F.3.2 Une première théorie alternative, la mécanique ondulatoire, défendue lors de l'exposé de Schrödinger . . . . . 186**  
 La mécanique ondulatoire de Schrödinger se heurte au problème de l'interprétation du paquet d'onde en terme de particules. Le problème de l'interprétation de l'onde se pose aussi s'il y a plusieurs particules, la fonction d'onde étant définie dans l'espace de configurations.

**F.3.3 Une seconde théorie alternative, celle de l'onde pilote, proposée lors de l'exposé de de Broglie . . . . . 188**  
 Louis de Broglie présente une version simplifiée de la théorie qu'il veut construire. La proposition de de Broglie de l'onde pilote est peu soutenue. Pauli présente un argument qui stoppe la théorie de l'onde pilote en 1927... jusqu'en 1952.

- . . . . . 191

**Bibliographie 195**

# **Introduction**



Au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, la science physique, qui avait jusque là enregistré de nombreux succès, est incapable d'expliquer certains phénomènes. Cette crise mène à une révolution qui fait passer de la « mécanique classique » à la « mécanique quantique ». Le chapitre 1 permettra de développer un peu ces rappels historiques. La physique quantique se structure en tant que théorie constituée – avec ses axiomes, ses concepts propres et ses interprétations – à la fin des années 1920. Cependant, à l'époque, le débat est vif sur les fondements à donner à « la » mécanique quantique.

Si émerge une théorie (notée dans ce mémoire SQM pour *Standard Quantum Mechanics*) qui emporte l'assentiment de la quasi-totalité de la communauté scientifique – à l'exclusion de grands physiciens dont [Einstein](#) – d'autres propositions alternatives ont été faites. Nous nous intéresserons à l'une de ces théories « dissidentes » qui est restée attachée aux noms de deux grands physiciens, le français Louis [de Broglie](#) (1892-1987) et l'américain David [Bohm](#) (1917-1992). Nous retiendrons pour la désigner la notation BQM pour *Bohmian Quantum Mechanics*. Le chapitre 2 est consacré à la présentation de ces deux théories et à la façon dont elles s'articulent avec la physique classique.

Si les interprétations de ces deux théories physiques sont incompatibles, les prédictions qu'elles font l'une et l'autre sont pourtant identiques, comme le chapitre 3 consacré à la mesure le montrera. Le monde microscopique donne ici un bel exemple de sous-détermination des théories par la phénoménologie : plusieurs explications contradictoires peuvent être données aux observations expérimentales.

L'équivalence empirique ne permettant pas d'exclure scientifiquement un de ces systèmes explicatifs, il est licite (et judicieux) de se demander quels sont les défauts et qualités comparés de SQM et BQM. C'est l'objet de la partie II.

Comme la théorie SQM est développée dans l'immense majorité des manuels de mécanique quantique, elle apparaît comme la version « orthodoxe » tandis que BQM est « hétérodoxe » puisque quasiment absente de ces mêmes manuels. Cette dernière théorie est pourtant considérée comme plus convaincante par d'éminents chercheurs en physique quantique, en particulier parce qu'elle ne présente pas, contrairement à SQM, ce qu'il est convenu d'appeler « le problème de la mesure », développé au chapitre 4.

D'autres scientifiques rétorquent que BQM, avec ses « variables cachées », complexifie les choses (du point de vue formel mais aussi opératoire), ce qui devrait la disqualifier selon le « rasoir d'Ockham ». Nous étudierons soigneusement les arguments des détracteurs de BQM dans le chapitre 5 consacré entièrement aux simplicités comparées des deux théories.

Enfin, le chapitre 6 sera dévolu au problème de l'intelligibilité. On comparera les accès que donnent SQM et BQM à la compréhension des phénomènes microscopiques, aussi bien du point de vue de l'étudiant qui découvre la mécanique quantique que du point de vue du scientifique qui la pratique.

Des annexes suivent le corps de ce mémoire. On pourra y trouver des repères biographiques pour la plupart des physiciens cités (annexe A) et un glossaire (annexe B) auquel les termes spécifiques du texte font appel, ainsi que deux parties plus techniques. La première (annexe C) présente les axiomes de SQM et BQM. La seconde (annexe D) s'intéresse au traitement mathématisé d'un cas spécifique (le puits de potentiel infini à une dimension) afin d'illustrer les sens différents donnés par SQM et BQM aux inégalités de Heisenberg. On trouvera enfin deux parties indépendantes, relatives à l'histoire des sciences. L'une (annexe E) est une biographie sur l'un des « inventeurs » de BQM – Louis [de Broglie](#). L'autre (annexe F) présente le cinquième congrès Solvay de 1927 où SQM et BQM étaient en compétition.

-

## **Première partie**

### **Description comparative de SQM et BQM**





# Chapitre 1

## Introduction historique

### 1.1 Les concepts d'onde et de particule dans l'histoire de la physique classique

La physique classique s'est constituée sur une antinomie discret-continu s'incarnant en particulier dans les concepts de particule et de champ<sup>1</sup>.

#### La mécanique classique s'appuie sur le concept de particule

La « particule » est un concept élémentaire incontournable en physique classique. Il s'agit d'un objet physique ponctuel (donc occupant un point géométrique de l'espace à trois dimensions) et sans structure mais doté de certains attributs (masse et charge électrique en particulier). Il est donc d'usage de parler de « point matériel » dans la mesure où cette entité est en un point géométrique mais possède des propriétés matérielles.

Il s'agit d'une idéalisation de tout corps rigide de la mécanique newtonienne pour peu que ses dimensions soient petites devant la taille caractéristique du problème : dans ce cas, le point géométrique sera celui du centre de masse par exemple. Ainsi, une planète pourra être assimilée à un point matériel lorsqu'on étudiera le Système Solaire.

La notion de trajectoire est intimement liée à celle de particule. Il s'agit de la courbe dans l'espace à trois dimensions qu'occupe au cours du temps le point matériel. En mécanique classique, il est admis que la trajectoire est bien définie à chaque instant et est continue (le corpuscule ne « saute » pas d'un endroit à l'autre), dans la mesure où la vitesse du corpuscule est définie à chaque instant.

#### Les concepts de champ (et d'onde) ont émergé ensuite en physique classique

En opposition à la particule, la notion de champ classique renvoie à celle d'un continuum constitué d'un ensemble infini de valeurs physiques définies localement (et à un instant donné). Un champ classique est donc une fonction de plusieurs variables (quatre : trois pour la position et une qui est la date). Il existe ainsi des champs scalaires (température, pression, potentiel électrostatique, ...) et vectoriels (champ de vitesse d'un fluide, champ électrique ou magnétique, ...).

---

1. Pour aller plus loin sur ce point : (COMTET 2009) et (SCHRÖDINGER 1951).

Historiquement, la notion de champ a d'abord été introduite comme un substitut à celle d'action à distance dans le contexte de la théorie de l'attraction universelle au XVII<sup>e</sup> siècle<sup>2</sup>. Une particule crée un champ (de gravitation si la particule est massive ou un champ électrique s'il s'agit d'une particule chargée). Ce champ agit à son tour sur les autres particules. Ainsi au XIX<sup>e</sup> siècle, Faraday évacue l'interaction à distance pour la remplacer par une interaction transmise par l'intermédiaire d'un champ<sup>3</sup>.

Dans le cadre d'une description physique à l'aide de champs, la trajectoire n'a pas de sens, mais elle a un pendant assez proche, celui de ligne de champ. Il s'agit d'une courbe dans l'espace (à une date donnée) qui suit en quelque sorte le vecteur en chaque endroit<sup>4</sup>. Cette ligne de champ est une représentation spatiale du champ vectoriel considéré<sup>5</sup>.

Les ondes (par exemple acoustiques) sont caractérisées par une (ou plusieurs) fonction (dite « fonction d'onde »). Cette fonction d'onde est mathématiquement un champ (de pression et de vitesse pour les ondes acoustiques). Elle obéit à une équation aux dérivées partielles (par exemple celle de d'Alembert). Cette dernière équation est appelée « équation d'onde ».

Une fonction d'onde est un champ qui dépend du temps et de l'espace. C'est fondamentalement la variation spatiale et temporelle du champ qui lui confère sa nature ondulatoire. Ainsi dans le cas d'un champ stationnaire (un champ magnétostatique créé par un aimant permanent fixe notamment) ou homogène (par exemple le champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant électrique, même variable), il n'est pas question d'onde.

Historiquement, les ondes sont initialement liées à un milieu physique (l'air pour les ondes acoustiques par exemple). Ce milieu subit des transformations, l'onde étant donc liée à des propriétés matérielles. Mais une fois l'éther abandonné en 1905, apparaissent des ondes (électromagnétiques) qui se propagent sans support. De plus, l'onde possède une énergie avec le champ électromagnétique qui est présent dans tout l'espace (même vide). Il s'ensuit alors que le champ ne peut plus être considéré comme simple artifice mathématique, mais qu'il doit être traité comme une entité physique dont l'ontologie est assumée. L'onde acquiert de fait une réalité au même titre que la particule.

## La mécanique classique s'appuie sur deux visions : l'une lagrangienne et l'autre eulérienne

La mécanique classique utilise un concept (la particule) plutôt qu'un autre (le champ) suivant le contexte. Ainsi, la mécanique des systèmes indéformables (solides) utilise une vision lagrangienne où le point matériel est privilégié et la notion de trajectoire est centrale. A l'inverse, la mécanique des fluides délaisse la description lagrangienne pour une vision eulérienne qui repose sur les champs (de vitesse, de pression, ...)

Dans la vision eulérienne, l'évolution (dans l'espace et dans le temps) des champs est déterminée *via* une (ou plusieurs) équation aux dérivées partielles. Ainsi, l'équation de Navier-Stokes en dynamique des fluides porte sur les champs de vitesse, de pesanteur et de pression.

Dans une approche lagrangienne, il y a un couplage entre les concepts de particule et de champ. La dynamique du point matériel peut s'exprimer avec le principe fondamental de la dynamique. Dans ce cas, le comportement du système (la particule) est lié à la valeur du (ou des) champ au point de l'espace où la

2. COMTET 2009, p. 245.

3. COMTET 2009, p. 246.

4. La ligne de champ de  $\vec{E}$  passant par le point  $M$  à l'instant  $t$  est la courbe passant par  $M$  qui est parallèle à  $\vec{E}$  en chacun de ses points, à l'instant  $t$  considéré.

5. Elle est liée souvent à des surfaces d'un autre champ (scalaire lui). Ainsi pour le théorème de Malus en optique qui relie le vecteur d'onde  $\vec{k}$  à la phase  $\Phi$  de l'onde avec  $\vec{k} = \vec{\text{grad}}\Phi$ , en mécanique des fluides en écoulements incompressibles où la vitesse  $\vec{v} = \vec{\text{grad}}\phi$  est reliée à un potentiel  $\phi$ , au champ électrostatique  $\vec{E} = -\vec{\text{grad}}V$  lié au potentiel électrostatique  $V$ .

particule se trouve à un instant donné. Mais il est aussi possible de déterminer la dynamique d'un point matériel grâce à un principe variationnel : le principe de moindre action<sup>6</sup>. A l'inverse du principe fondamental de la dynamique, le principe de moindre action n'explicité pas le comportement de la matière ou d'un système sous forme de lois locales valables en un point de l'espace à un instant donné. Il décrit l'évolution du système entre deux instants donnés en deux positions spatiales successives.

## Il y a en optique deux visions : l'une corpusculaire et l'autre ondulatoire

L'histoire de l'optique peut, comme pour celle de la mécanique, être analysée en terme d'onde et de particule.

Pendant tout le XVIII<sup>e</sup> siècle triomphe une vision corpusculaire de la lumière, conformément aux idées de Newton. Cette approche est celle qui fonde l'optique géométrique. Il existe en particulier deux façons de formaliser les lois de cette optique géométrique. Celles de Snell-Descartes donnent l'évolution du rayon lumineux si localement les propriétés – l'indice optique en l'occurrence – du milieu changent. Mais, comme en mécanique, on peut s'appuyer sur un principe variationnel. Il s'agit en optique du principe de Fermat<sup>7</sup>.

Dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle, la théorie ondulatoire de la lumière est adoptée pour expliquer en particulier les phénomènes d'interférence. Le concept clé est alors une fonction d'onde (la « vibration lumineuse » qui sera associée après les travaux de Maxwell au champ électromagnétique). Dans ce cadre, la nature de la lumière est ondulatoire : le phénomène radiatif est lié au concept d'onde.

Mais en 1905, [Einstein](#) s'appuie, dans le cas d'une hypothèse heuristique, sur un corpuscule de lumière (nous allons y revenir). De ce point de vue, la lumière est donc vue de façon duale : à la fois onde et particule.

Il est d'ailleurs intéressant de noter que, dans le cadre de l'optique ondulatoire, l'optique géométrique apparaît comme un cas limite, une approximation. L'optique géométrique est valable pour peu que les dimensions des objets que rencontre la lumière soient très grandes devant la longueur d'onde de l'onde lumineuse. Ainsi, le rayon lumineux de l'optique géométrique peut être vu de deux façons. Du point de vue ondulatoire il s'agit d'une ligne de champ<sup>8</sup>. Du point de vue corpusculaire c'est la trajectoire de la particule de lumière.

## La physique classique utilise des grandeurs continues

L'histoire de la physique classique montre donc une émergence et une autonomisation du concept d'onde au cours des siècles, qui vient se superposer au concept de particule, pour parfois le remplacer.

Si la particule est une des seules incarnations du discontinu (avec la charge électrique qui est quantifiée), tout le reste en physique classique, y compris la trajectoire de cette particule, est continu.

6. Le principe de moindre action est un principe variationnel qui revient à minimiser une intégrale – ou plus généralement rechercher quand sa variation est nulle. L'action  $\mathcal{A}$  est la circulation de la quantité de mouvement le long de la trajectoire : soit  $\mathcal{A} = \int m \vec{v} \cdot d\vec{\ell}$ . De nos jours, l'action est définie en mécanique lagrangienne comme l'intégrale de la différence entre énergie cinétique et énergie potentielle. Voir ([BASDEVANT 2010](#)), ([MARTIN-ROBINE 2006](#)) et ([SAMUELI et MOATTI 2012](#)).

7. Dans le cas du principe de Fermat, c'est le « chemin optique » – intégrale de l'indice optique le long du rayon lumineux – qui doit être stationnaire.

8. Celle du vecteur d'onde  $\vec{k}$  ou du vecteur de Poynting  $\vec{\Pi} = \vec{E} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu_0}$ .

## La physique classique est marquée par une « dualité » onde - corpuscule

On voit donc que les concepts d'onde et de particule sont centraux en physique classique. À ces concepts sont attachés des entités mathématiques différentes.

Ainsi une particule (de masse  $m$ , non relativiste) a une vitesse  $\vec{v}$ , une quantité de mouvement  $\vec{p} = m\vec{v}$ , une énergie  $E$ , une trajectoire (ensemble de ses positions  $\vec{r}(t)$  au cours du temps, la date étant notée  $t$ ).

Une onde peut être décomposée en ondes élémentaires (monochromatiques). Chaque onde monochromatique étant d'extension infinie, caractérisée en particulier par une fréquence  $\nu$ , une longueur d'onde  $\lambda$ , un vecteur d'onde  $\vec{k}$ , dont la norme est  $\frac{2\pi}{\lambda}$ . Pour analyser la complexité d'une onde, on fait appel au spectre de cette onde. Il s'agit d'une représentation de l'importance relative des différentes ondes monochromatiques qui composent l'onde complexe (cf. figures 1.1 et 1.2).

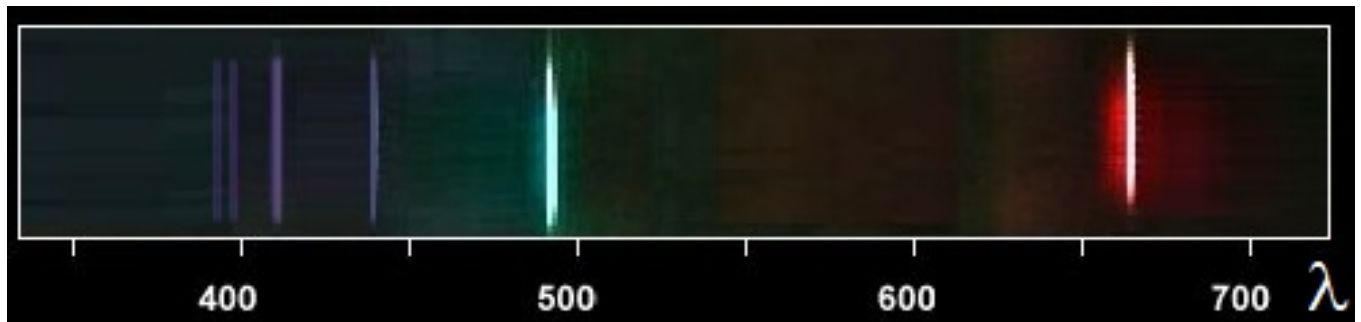


FIGURE 1.1 – Spectre de l'atome d'hydrogène. (Source : [https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu/pages\\_spectroscopie/raies-hydrogene\\_impression.html](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_spectroscopie/raies-hydrogene_impression.html))

## 1.2 La naissance de la physique quantique

### Des phénomènes physiques sont inexplicables au début du XX<sup>e</sup> siècle

On peut voir rétrospectivement qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle a lieu une révolution scientifique au sens de Thomas Kuhn<sup>9</sup>. Dès 1900, les théories physiques de l'époque se trouvent impuissantes à expliquer certains phénomènes physiques<sup>10</sup>.

En particulier, l'étude de certains spectres pose problème. Ainsi, le spectre de l'onde lumineuse émise par une vapeur composée d'atomes identiques excités présente des raies. Ces raies atomiques pourraient aujourd'hui nous évoquer une sorte de code-barres caractéristique de l'atome émetteur. Les raies de ce spectre ont des couleurs bien spécifiques, chacune d'entre elles associée à une longueur d'onde particulière. De même, le spectre du rayonnement émis par un four porté à une certaine température (le « corps noir ») est très mal modélisé à l'époque. La répartition relative des ondes monochromatiques dans ce spectre n'est pas conforme à la théorie classique. C'est vrai en particulier dans le domaine des faibles longueurs d'onde, à tel point qu'on parlera (bien après 1900) de « catastrophe ultraviolette »<sup>11</sup>.

Enfin, la communauté scientifique s'interroge sur le mécanisme qui pourrait expliquer l'effet photo-électrique. Ce phénomène, provoqué par la lumière, consiste en un passage de courant électrique dans le

9. KUHN 1970.

10. Je présenterai ici trois exemples. On peut aussi citer le problème de la chaleur spécifique des solides à basses températures.

11. Les ultra-violettes correspondent à des longueurs d'onde plus petites que celles des ondes visibles.

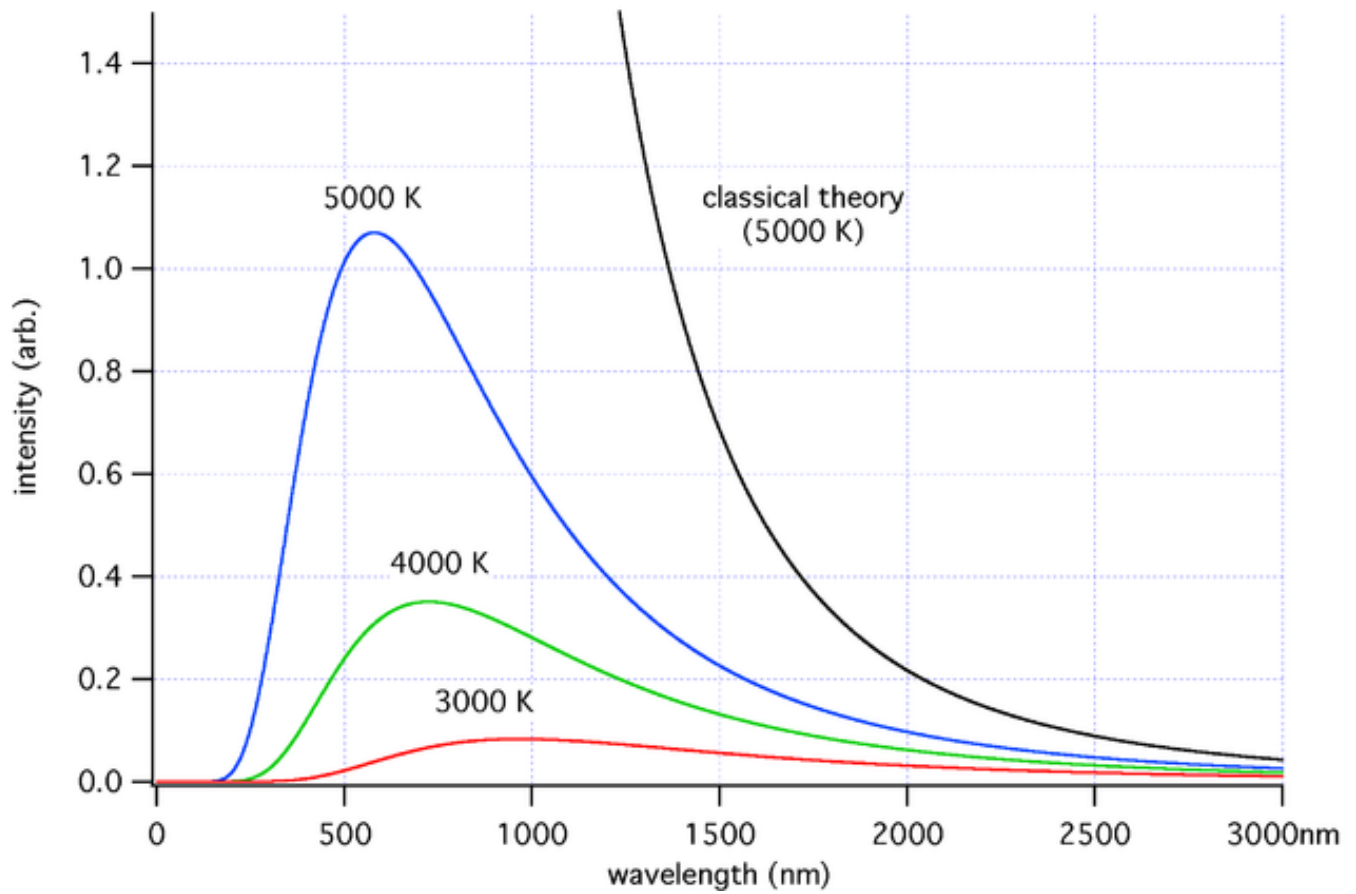


FIGURE 1.2 – Spectres du corps noir pour différentes températures. En noir, la modélisation classique. (Source : [https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu/pages\\_fdc/corps-noir.html](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_fdc/corps-noir.html))

vide séparant deux électrodes. Or ce courant électrique est induit uniquement par certaines longueurs d'onde de la lumière.

### **Solution *ad hoc*, l'ancienne théorie des quanta est un ensemble de modèles sans cadre théorique où les discontinuités (quanta) sont présentes**

Dans un premier temps, des solutions *ad hoc* sont trouvées, qui ne s'intègrent dans aucun cadre théorique général.

Ainsi, Max [Planck](#) en 1900 propose une quantification par paquets d'énergie pour modéliser correctement le rayonnement du corps noir. Il s'aide d'une constante qui portera son nom, notée  $h$ . La valeur numérique de cette constante est  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  mais on utilise aussi  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

[Bohr](#) en 1913 dans son modèle de l'atome introduit des niveaux quantifiés d'énergie pour expliquer les spectres de raies atomiques. Dans ce modèle, l'énergie ne varie pas continûment mais par paliers. Ces « quanta » d'énergie font intervenir aussi  $h$ .

[Einstein](#) en 1905 avance l'hypothèse d'une particule associée à la lumière, qui sera baptisée plus tard « photon »<sup>12</sup>, pour décrire l'effet photo-électrique. Ce faisant, il associe à une lumière monochromatique donnée (une onde de longueur d'onde  $\lambda$ ), une particule d'énergie  $E = \frac{hc}{\lambda}$ , où  $c$  est la célérité de la lumière.

Se met en place ce qui est convenu d'appeler l'« ancienne théorie des quanta »<sup>13</sup> qui est fondée sur « cette idée que la physique atomique se distingue essentiellement de la physique classique par l'existence de discontinuités »<sup>14</sup>.

### **La théorie quantique se structure dans les années 1920 à partir de la mécanique ondulatoire et de la mécanique des matrices**

Les années 1920 sont marquées par un bouillonnement intellectuel intense en physique. L'étude des phénomènes au niveau atomique débouche sur la naissance d'une nouvelle mécanique. En fait, deux théories émergent quasiment en même temps.

La mécanique matricielle, construite par Werner [Heisenberg](#), Max [Born](#) et Pascual [Jordan](#) en 1925<sup>15</sup> utilise les outils de l'algèbre (espace linéaire, matrices, opérateurs hermitiens, vecteurs, valeurs propres, ...). Elle se fonde sur l'acceptation des discontinuités (quanta) qu'[Heisenberg](#)<sup>16</sup> puis [Dirac](#), relie à la non-commutation d'opérateurs. En 1927, [Heisenberg](#) montre que deux variables dites complémentaires (par exemple la position  $x$  et la quantité de mouvement  $p_x$ ) sont liées par l'inégalité qui fait apparaître leur écarts quadratiques moyens :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Un autre formalisme se met en place quasiment en même temps. Il s'agit de la mécanique ondulatoire d'Erwin [Schrödinger](#)<sup>17</sup>. Cette nouvelle mécanique s'appuie formellement sur les travaux de Louis de Bro-

12. Le nom « photon » est proposé par Gilbert N. Lewis en octobre 1926 (MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 241).

13. « A partir de 1927, on appelle « ancienne théorie des quanta » les diverses tentatives faites antérieurement pour résoudre les difficultés de l'étude de la matière et du rayonnement en ayant recours à l'hypothèse de l'existence de discontinuités dans la nature » (CHEVALLEY 1985, p. 289).

14. I. SOLVAY 1928, début de l'intervention de Born et Heisenberg au Congrès Solvay, p. 143.

15. Werner HEISENBERG 1925 ; M. BORN et JORDAN 1925 ; M. BORN, W. HEISENBERG et JORDAN 1926.

16. Werner HEISENBERG 1927.

17. SCHRÖDINGER 1926b ; SCHRÖDINGER 1926c ; SCHRÖDINGER 1926d ; SCHRÖDINGER 1926a.

glie<sup>18</sup> qui généralise en 1923 la dualité onde-corpuscule de la lumière à la matière. L'équation d'onde suivie par la fonction d'onde  $\Psi$  associée à une particule massive (de masse  $m$ ) non relativiste dans un potentiel  $V$  est l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + V \Psi$$

La mécanique ondulatoire utilise des outils mathématiques auxquels les physiciens de l'époque sont plus habitués (fonction de plusieurs variables, équations aux dérivées partielles, analyse vectorielle ...) que ceux mobilisés par la mécanique des matrices.

Au début de 1926, on est donc en présence de deux formalismes cohérents en eux-mêmes, bien qu'entièrement différents. Mais Erwin Schrödinger démontre vite (suivi par d'autres) leur équivalence<sup>19</sup>. À la fin des années 1920, la communauté scientifique en est à structurer cette nouvelle théorie en définissant les axiomes qui la sous-tendent et les concepts sur lesquels elle se fonde. Le cinquième congrès Solvay qui se réunit en octobre 1927 à Bruxelles, intitulé « électrons et photons »<sup>20</sup>, est une étape fondamentale dans ce processus.

### Une interprétation indéterministe de la mécanique quantique émerge à la fin des années 1920

Des chercheurs, pour la plupart liés au laboratoire de Bohr à Copenhague et à celui de Born à Göttingen, développent à la fin des années 1920 les principes de la mécanique quantique telle qu'elle est traditionnellement présentée depuis<sup>21</sup>. L'intervention de Max Born et Werner Heisenberg d'une part au cinquième Conseil Solvay et le texte de Bohr reporté dans les actes de ce même congrès fixent la plupart des caractéristiques de la mécanique quantique selon ce groupe de Copenhague-Göttingen :

- la théorie est fondée sur l'existence de discontinuités (« le postulat des quanta, d'après lequel tout processus atomique contient un trait de discontinuité ou plutôt d'individualité qui manque totalement aux théories classiques et qui est caractérisé par le quantum d'action de Planck [ $h$ ] »<sup>22</sup>);
- la physique est indéterministe et fondée sur l'aléa (« le système des formules de la mécanique des quanta ne peut être interprété sans contradiction que du point de vue d'un indéterminisme fondamental »<sup>23</sup>);
- les probabilités des événements peuvent être déduites de la fonction  $\Psi$  qui est relative à une onde de probabilité (« la mécanique des quanta fournit des valeurs moyennes avec exactitude, mais ne peut prédire la venue d'un événement isolé »<sup>24</sup>);
- les inégalités de Heisenberg fixent une limite à la connaissance due à l'indétermination (« toutes [les] grandeurs, prises séparément, peuvent être mesurées et définies avec précision, comme dans la théorie classique, mais [...] quand on veut mesurer simultanément des grandeurs canoniquement conjuguées [par exemple position et quantité de mouvement] on ne peut pas descendre au-dessous d'une limite d'indétermination caractéristique »<sup>25</sup>).

18. L. d. BROGLIE 1924.

19. Pour plus de précisions sur l'apparition de la « deuxième théorie quantique », cf. (BENSAUDE VINCENT 1985, p. 234).

20. Les actes du congrès sont disponibles (I. SOLVAY 1928). Voir aussi le chapitre F et l'ouvrage de Bacciagaluppi et Valentini (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009).

21. Même si la version des manuels est fort différente de celle de Bohr.

22. I. SOLVAY 1928, p. 216, dans l'intervention de Niels Bohr.

23. I. SOLVAY 1928, p. 160, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

24. I. SOLVAY 1928, p. 160, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

25. I. SOLVAY 1928, pp. 168-170, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

Dans ce cadre, les concepts d'onde et de particule sont mobilisés mais n'ont plus le sens que leur attribue la mécanique classique. D'une part, [Born](#) indique que « les ondes sont des ondes de probabilité »<sup>26</sup>. Ainsi, l'onde est différente d'une onde classique. De plus, [Bohr](#) précise que « la notion de vitesse doit toujours être appliquée avec réserve. Une définition non équivoque de cette notion est exclue par le postulat des quanta »<sup>27</sup>. La particule perd elle aussi ses propriétés classiques. En fait, les deux concepts d'onde et de particule sont

deux tentatives d'adaptation des faits expérimentaux à notre manière ordinaire de concevoir le monde, par laquelle la limitation des notions classiques est exprimée d'une façon complémentaire. [...] Néanmoins, ces abstractions constituent [...] un moyen indispensable pour exprimer le contenu de l'expérience d'une façon qui se rattache à notre représentation ordinaire<sup>28</sup>.

Dans le cadre de la [complémentarité](#) de [Bohr](#), l'onde et la particule sont deux descriptions nécessaires, mutuellement exclusives (qui ne peuvent être appliquées simultanément) et ni l'une ni l'autre n'est suffisante pour donner une description exhaustive.

### Une vision déterministe, la théorie de l'onde pilote de de Broglie, est rejetée au congrès Solvay de 1927

À ce même congrès Solvay, mardi 25 octobre 1927, Louis de Broglie propose à la tribune la théorie de l'onde pilote<sup>29</sup> selon laquelle une onde peut être associée à toute particule. Dans cette théorie, les deux concepts coexistent au lieu que de s'exclure. La particule pour de Broglie a une trajectoire parfaitement définie, comme en mécanique classique :

beaucoup d'auteurs pensent qu'il est illusoire de se demander quelle est la position ou la vitesse d'un électron dans l'atome à un instant donné. Nous sommes, au contraire, enclins à croire qu'il est possible d'attribuer aux corpuscules une position et une vitesse même dans les systèmes atomiques<sup>30</sup>.

L'onde selon de Broglie guide la particule. Ainsi, si la fonction d'onde s'écrit sous la forme

$$\Psi = R \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right) \quad \text{où } R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+ \text{ et } S \in \mathbb{R}$$

la particule, si elle est non relativiste et de masse  $m$ , aura une vitesse

$$\vec{v} = \frac{\overrightarrow{\text{grad}}(S)}{m}$$

[Cette] formule détermine entièrement le mouvement du corpuscule dès qu'on s'est donné sa position à un instant initial. [...] Puisque le mouvement du corpuscule nous paraît rigoureusement déterminé par [cette] équation, il ne nous semble pas qu'il y ait lieu de renoncer à croire au déterminisme des phénomènes physiques individuels<sup>31</sup>.

Ainsi de Broglie propose une théorie causale, qui est parfaitement déterministe.

26. I. SOLVAY 1928, pp. 164-165, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

27. I. SOLVAY 1928, p. 226, dans l'intervention de Niels Bohr.

28. I. SOLVAY 1928, p. 218, dans l'intervention de Niels Bohr.

29. I. SOLVAY 1928, pp. 105-132, intervention de Louis de Broglie.

30. I. SOLVAY 1928, pp. 119-120, dans l'intervention de Louis de Broglie.

31. I. SOLVAY 1928, pp. 115-116, dans l'intervention de Louis de Broglie.



Suite à son allocution, [Pauli](#) formule une critique à [Louis de Broglie](#)<sup>32</sup>. Cette critique, on le sait aujourd'hui, est fondée sur une extension d'une démonstration de [Fermi](#) dans un domaine inadapté<sup>33</sup>. Mais la théorie de l'onde pilote semble ce jour-là coupable de n'être pas cohérente avec les observations expérimentales.

À sa place c'est la version proposée par les chercheurs de Copenhague et Göttingen qui triomphe comme le laisse entendre la fin de l'intervention de [Max Born](#) et [Werner Heisenberg](#) au Congrès Solvay :

nous tenons la mécanique des quanta pour une théorie [...] dont les hypothèses fondamentales physiques et mathématiques ne sont plus susceptibles de modification<sup>34</sup>.

Ainsi la physique quantique, sous sa version « orthodoxe », assume-t-elle désormais un « indéterminisme intrinsèque ».

### La théorie de l'onde pilote renaît en 1952 avec Bohm

Un quart de siècle plus tard (en 1952), une publication de [David Bohm](#)<sup>35</sup> développe indépendamment une théorie très semblable à celle présentée en 1927 par [Louis de Broglie](#)<sup>36</sup>, l'étend et propose un grand nombre d'exemples de mise en application de l'onde pilote. [David Bohm](#) lève aussi dans son article l'objection faite en 1927 par [Wolfgang Pauli](#) à [Louis de Broglie](#). La théorie de [Bohm](#) est une alternative à la théorie quantique utilisée habituellement :

Le but de cet article [...] est de suggérer une interprétation alternative. Contrairement à l'interprétation habituelle, cette interprétation alternative nous permet de concevoir chaque système individuel comme étant dans un état précisément défini, dont les changements avec le temps sont déterminés par des lois définies, analogues aux (mais pas identiques aux) équations classiques du mouvement<sup>37</sup>.

La loi de la dynamique donnée par [Bohm](#) indique l'accélération  $\vec{a}$  d'une particule non relativiste de masse  $m$  soumise à une force  $-\overrightarrow{\text{grad}}(V)$  selon la relation :

$$m\vec{a} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) - \overrightarrow{\text{grad}}(Q) \quad \text{avec : } Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R}$$

Cette dernière équation ressemble au principe fondamental de la dynamique en mécanique classique. En effet, aux potentiels  $V$  dont dérivent les forces classiques, il faut ajouter le potentiel quantique  $Q$  qui est dû à la fonction d'onde  $\Psi$  (via son module  $R$ ).

On peut montrer (cf. annexe C.3) que la formulation de [Bohm](#) est équivalente à celle de [de Broglie](#). Aujourd'hui cette théorie de l'onde pilote – à laquelle nous nous référerons avec le sigle BQM comme

32. « Il me semble que la conception de [M. de Broglie](#), en ce qui concerne les résultats statistiques de l'expérience de choc, est bien d'accord avec la théorie de [Born](#) dans le cas de chocs élastiques, mais qu'il n'en est plus ainsi lorsque l'on considère aussi des chocs non élastiques... » (I. SOLVAY 1928, pp. 280-282, intervention de [Wolfgang Pauli](#) dans la discussion générale).

33. Pour une discussion détaillée de l'argument de [Pauli](#) et des réponses qu'on peut y apporter, cf. [Bacciagaluppi](#) ([BACCIAGALUPPI](#) et [VALENTINI](#) 2009, pp. 232-244) et [de Broglie](#) lorsqu'il revient à une vision causale ([L. d. BROGLIE](#) 1956b, Chapitre XIV, pp. 168-176).

34. I. SOLVAY 1928, p. 178, dans l'intervention de [Max Born](#) et [Werner Heisenberg](#).

35. Il s'agit en fait de deux articles qui se suivent dans le même journal scientifique ([David BOHM](#) 1952). « Ironically, in 1951, [Bohm](#) wrote a book, *Quantum Theory* [...]. It seems that [Bohm](#) became dissatisfied with the orthodox approach that he had written in his book and began to develop his own causal formulation of quantum theory » ([ORIOIS](#) et [MOMPART](#) 2012, p. 15).

36. [David Bohm](#) a été averti des travaux de [Louis de Broglie](#) juste avant publication de ses articles : « After this article was completed, the author's attention was called to similar proposals for an alternative interpretation of the quantum theory made by [de Broglie](#) in 1926, but later given up by him » ([David BOHM](#) 1952, p. 167).

37. [David BOHM](#) 1952, p. 166, ma traduction.

dit en introduction – fait l’objet d’actives recherches bien qu’elles soient encore très marginales. Comme le montre le graphique 1.3, à la faveur du renouveau des réflexions sur l’interprétation de la mécanique quantique, on a assisté à un accroissement de l’intérêt des chercheurs depuis les années 1980 pour cette version alternative de la mécanique quantique dont « les résultats physiques obtenus sont exactement les mêmes que ceux obtenus avec l’interprétation habituelle »<sup>38</sup>. Les prédictions expérimentales sont en effet identiques pour les deux théories (BQM déterministe et SQM indéterministe) que nous allons maintenant présenter plus en détail.

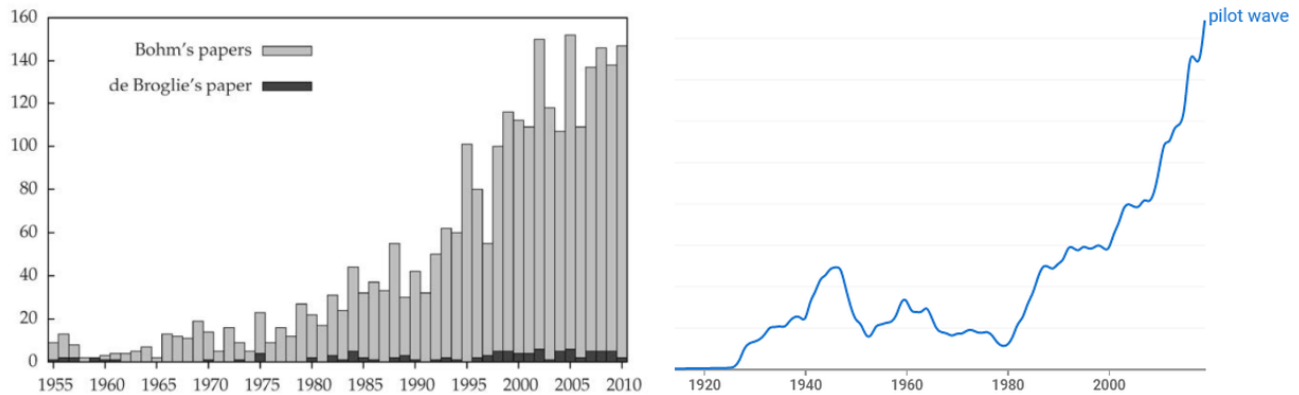


FIGURE 1.3 – Nombre de citations cumulées par an :  
 – à gauche des articles de Bohm (David BOHM 1952) et de Broglie (L. d. BROGLIE 1927) dans les articles scientifiques. Source : (ORIOLS et MOMPART 2012, p. 8).  
 – à droite du terme « pilot wave » dans les livres. Source : Google Books Ngram Viewer (<https://books.google.com/ngrams/graph?content=pilot+wave>).

38. David BOHM 1952, p. 166, ma traduction.

# Chapitre 2

## Présentation de SQM et BQM

### 2.1 Qu'est-ce que SQM ?

**Plutôt que l'« interprétation de Copenhague », mal définie, SQM est la mécanique quantique telle qu'elle est présentée aujourd'hui par les manuels**

Il est d'usage d'associer la mécanique quantique « orthodoxe » à l'« interprétation de Copenhague » qui est, selon l'usage, l'interprétation des phénomènes quantiques commune à tous les membres de son groupe fondateur : [Bohr](#), [Born](#), [Heisenberg](#), [Pauli](#), [Jordan](#), [Dirac](#), ...<sup>1</sup>, et dont les fondements furent exposés à l'automne de 1927 d'abord dans la conférence prononcée par [Bohr](#) à Côme (en septembre 1927)<sup>2</sup> puis dans le rapport présenté par Werner [Heisenberg](#) et Max [Born](#) au Ve Congrès Solvay, sous le titre de « La mécanique des quanta » (en octobre 1927)<sup>3</sup>.

Selon la philosophe de la physique contemporaine Catherine Chevalley ([CHEVALLEY 1985](#), p. 288-289), « l'interprétation de Copenhague » est un ensemble d'éléments :

- un formalisme mathématique, développé principalement par [Born](#), [Jordan](#) et [Dirac](#) utilisant l'algèbre linéaire (mais qui peut aussi se décliner sous la forme donnée par [Schrödinger](#) en 1926 – la mécanique ondulatoire – qui est équivalente) ;
- une interprétation probabiliste de la fonction d'onde selon la [règle de Born](#) qui permet de déterminer les probabilités de chacun des résultats possibles lors d'une mesure ;
- la [complémentarité](#) de [Bohr](#)<sup>4</sup>, c'est-à-dire un ensemble de représentations mentales issues de la physique classique qui vont par paires (onde et particule, position et quantité de mouvement, etc.) dont les éléments s'excluent l'un - l'autre.

Mais l'« interprétation de Copenhague » est en réalité une reconstruction historique *a posteriori*. Si [Jordan](#) a parlé d'un « esprit de Copenhague-Göttingen » en 1927, et [Heisenberg](#) a mentionné un « esprit de Copenhague pour la théorie quantique » trois ans plus tard, l'expression « interprétation de Copenhague » a

---

1. [CHEVALLEY 1985](#), annexe 1, p. 288 et suivantes.

2. On peut retrouver une version remaniée de cette intervention dans les actes du cinquième Conseil Solvay (I. [SOLVAY 1928](#), pp. 215-247, intervention de Niels Bohr).

3. I. [SOLVAY 1928](#), pp. 143-184, intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

4. « La [complémentarité](#) se définit par trois idées essentielles :

- l'existence de plusieurs descriptions nécessaires d'un même phénomène ;
- l'idée qu'il existe des couples de descriptions mutuellement exclusives, qui ne peuvent être appliquées simultanément ;
- l'idée que ni l'une ni l'autre n'est suffisante pour donner une description exhaustive du phénomène en question ; et que, par conséquent, une description exhaustive au sens classique est impossible » ([BENSAUDE VINCENT 1985](#), p. 235).

été utilisée pour la première fois en 1955, par [Heisenberg](#). Aussi, certains auteurs évoquent un « mythe »<sup>5</sup>. En effet, il ne faut pas sous-estimer les différences de point de vue entre les chercheurs de Copenhague-Göttingen dans les années 1920. Certes, ces derniers étaient tous d'accord sur le fait qu'il était inutile de parler de ce qui se passait « vraiment » dans le monde quantique : faire des prédictions précises sur les résultats des mesures était, pour eux, suffisant. De plus, ils faisaient souvent appel à la notion de [complémentarité](#) développée par [Bohr](#).

Il existe en fait de nombreuses présentations – parfois contradictoire – de la physique quantique qui se revendiquent conformes à l'« interprétation de Copenhague », rendant le terme trop flou pour être utilisé. Enfin, aujourd'hui on confond souvent<sup>6</sup> l'« interprétation de Copenhague » avec la présentation universitaire de la mécanique quantique fondée sur des axiomes développés par [Dirac](#)<sup>7</sup> et sur la théorie de la mesure développée par [von Neumann](#)<sup>8</sup>.

Pour ma part, je choisis de définir SQM par la présentation de la théorie – assez uniforme malgré la profusion d'ouvrages français<sup>9</sup> ou étrangers<sup>10</sup> – que font les manuels de physique quantique. Aussi, je ne mobiliserai les citations de physiciens de l'« école de Copenhague » que dans le cas où celles-ci sont bien en phase avec la conception présentée par les manuels.

### **SQM postule la complétude de la description physique par la fonction d'onde**

Selon cette définition, on peut discerner dans SQM, au cœur de son formalisme mathématique, la fonction d'onde  $\Psi$ <sup>11</sup> comme outil unique. SQM postule en effet la complétude de la description physique par la fonction d'onde. Ce que cela signifie, c'est que le physicien ne peut pas espérer avoir d'autres informations que celles données par  $\Psi$  comme l'indique par exemple un manuel :

le premier postulat de l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique est que *l'état d'un système est complètement précisé par sa fonction d'onde* [c'est l'auteur qui souligne]<sup>12</sup>.

SQM exclut en fait toute autre théorie possible, comme si les phénomènes l'imposaient comme seule théorie possible :

Nous tenons la mécanique des quanta pour une théorie complète, dont les hypothèses fondamentales physiques et mathématiques ne sont plus susceptibles de modification. Des suppositions au sujet de la signification physique des grandeurs de la mécanique quantique, qui seraient en contradiction avec les postulats de [SQM] seraient aussi, à notre avis, en contradiction avec les faits expérimentaux<sup>13</sup>.

Ce qui précède éclaire le fait que les manuels présentent SQM comme *la* théorie quantique (c'est-à-dire la seule possible)<sup>14</sup>.

5. Voir ([HOWARD 2004](#)) et ([BECKER 2018](#), p. 49).

6. ([DARRIGOL 1985](#), pp. 309-310) pour aller plus loin.

7. [DIRAC 1930](#).

8. [NEUMANN 1932](#).

9. Voir en particulier ([MESSIAH 1969](#); [COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018](#); [LÉVY-LEBLOND et F. BALIBAR 1984](#); [F. BALIBAR et al. 2007](#); [BASDEVANT, DALIBARD et JOFFRE 2002](#); [LE BELLAC 2010](#); [ASLANGUL 2016](#)). Si le cours d'Albert Messiah ([MESSIAH 1969](#)) est le premier cours complet de mécanique quantique publié (en 1959) en France, je m'appuierai plutôt sur celui de Claude [Cohen-Tannoudji](#), Franck Laloë et Bernard Diu ([COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018](#)), plus récent et qui est souvent présenté comme la principale référence dans les formations universitaires françaises.

10. Voir en particulier ([FEYNMAN et al. 2018](#); [HECHT, BECHERRAWY et MARTIN 1999](#); [WEINBERG 2013](#)).

11. ou sa version matricielle qui est un vecteur noté  $|\Psi\rangle$ .

12. [HECHT, BECHERRAWY et MARTIN 1999](#), p. 1153.

13. [I. SOLVAY 1928](#), fin de l'intervention de Born et Heisenberg au Congrès Solvay, p. 178.

14. Exemple lu dans un manuel : « il existe une incompatibilité entre les faits expérimentaux et l'attribution à une particule

## La fonction d'onde est une sorte de « catalogue » de résultats de mesures possibles, avec la probabilité de chacune de ces mesures possibles

L'état d'un système quantique est donc selon SQM complètement défini par sa fonction d'onde  $\Psi$  qui apparaît en quelque sorte comme un répertoire de mesures possibles<sup>15</sup>, avec une probabilité pour chacune de ces possibilités.  $\Psi$  donne ainsi accès à la probabilité de trouver un résultat à une mesure dans un contexte donné<sup>16</sup>.

La fonction  $\Psi$  [...] constitue désormais l'instrument permettant de prédire la probabilité des valeurs mesurées. Elle incarne à chaque instant la somme de toutes les éventualités futures que prédit la théorie, présentées comme dans un catalogue. Elle constitue le lien de relations et de conditions entre les diverses mesures. [...] C'est ainsi que ce catalogue de prévisions se présente initialement. Ensuite il se transforme au fil du temps<sup>17</sup>.

Selon SQM, toute grandeur physique mesurable  $\mathcal{A}$  (comme la position, la quantité de mouvement, l'énergie, ...) est décrite par un opérateur linéaire  $\hat{A}$  appelé « observable ».  $\Psi$  permet comme nous le verrons (cf. 3.2.2) toutes les prédictions dans le cadre de SQM relativement à une observable donnée  $\hat{A}$ .

### SQM se revendique comme une épistémologie sans ontologie

Si une expérience est faite, c'est-à-dire dans le cas où un observateur met en place un dispositif pour mesurer une observable, cela donne accès non pas à une caractéristique du système étudié mais plutôt à tel ou tel résultat de mesure possible. Le physicien – qui a défendu et popularisé la théorie bohémienne – irlandais John Stewart Bell note ainsi que SQM « ne parle jamais d'événements dans le système, mais seulement de résultats de mesure possibles lors d'une observation faite sur le système, impliquant l'existence d'un dispositif externe »<sup>18</sup>.

SQM est liée à une position philosophique souvent qualifiée de « positiviste » qui la sous-tend qui pourrait être résumée dans la formule suivante de Bohr :

il n'y a pas de monde quantique. Il est faux de penser que la tâche de la physique est de découvrir comment est la nature, la physique concerne ce que l'on peut dire de la nature<sup>19</sup>.

Même si cette vision consiste à rejeter l'ontologie (ce qui existe dans le monde indépendamment des humains) pour ne conserver que l'épistémologie (ce qu'on peut connaître du monde)<sup>20</sup>, SQM n'en tient pas moins un discours sur l'objet d'étude, propose une certaine interprétation du formalisme, qui invoquent des « objets » et des « processus » physiques, ensemble dont nous allons maintenant caractériser l'esprit et les éléments constitutifs.

d'une trajectoire définie au sens classique » (ASLANGUL 2016, p. 340).

15. Schrödinger parle de « catalogue » (SCHRÖDINGER 1951, p. 109). Formellement, on peut écrire la fonction d'onde sous la forme

$$\Psi = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n$$

qui « catalogue » les mesures possibles  $a_n$  qui sont les valeurs propres de l'opérateur  $\hat{A}$  ( $\hat{A} \alpha_n = a_n \alpha_n$ ), avec la probabilité de chacune de ces mesures qui est donnée par la règle de Born :  $\mathcal{P}_n = |c_n|^2$ .

16. Le problème de la « contextualité » sera abordé plus loin, cf. 3.3.1.

17. SCHRÖDINGER 1951, p. 156.

18. LALOË 2011, Citation de Bell à propos de SQM, ma traduction, p. 6.

19. LALOË 2011, Citation de Bohr, ma traduction, p. 6.

20. Ce qui est tout de même un peu contradictoire : si on peut connaître quelque chose du monde, il faut bien qu'il y ait une ontologie.

## SQM s'appuie parfois sur la complémentarité pour interpréter les phénomènes observés

De nombreux manuels de mécanique quantique<sup>21</sup> introduisent leur propos en s'appuyant sur l'*expérience de Young* dans le cas d'une unique particule. Dans cette expérience, un objet microscopique (par exemple un électron ou un photon) passe à travers un écran creusé de deux trous avant d'être détecté sur un autre écran, parallèle au premier (cf. figure 2.1). Par exemple dans le manuel de référence en France (COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018) on peut lire :

Que se passe-t-il en fait, lorsque [la source lumineuse] émet les photons pratiquement un par un ? Ni les prédictions de la théorie ondulatoire, ni celles de la théorie corpusculaire ne sont vérifiées. En effet :

(i) Si l'on recouvre l'écran d'une plaque photographique, et si l'on augmente suffisamment le temps de pose de façon à recevoir quand même pour chaque photographie un grand nombre de photons, on constate au développement [des] franges [alternance de zones plus ou moins lumineuses ...] il faut donc rejeter l'interprétation purement corpusculaire selon laquelle les franges sont dues à une interaction entre photons.

(ii) On peut au contraire exposer la plaque photographique pendant un temps suffisamment court pour qu'elle ne puisse recevoir que quelques photons. On constate alors que chaque photon produit sur [l'écran] un impact localisé, et non une figure d'interférence d'intensité très faible ; il faut donc aussi rejeter l'interprétation purement ondulatoire<sup>22</sup>.

Ainsi ce propos liminaire permet aux manuels d'exclure de l'ontologie de SQM aussi bien l'onde que la particule.

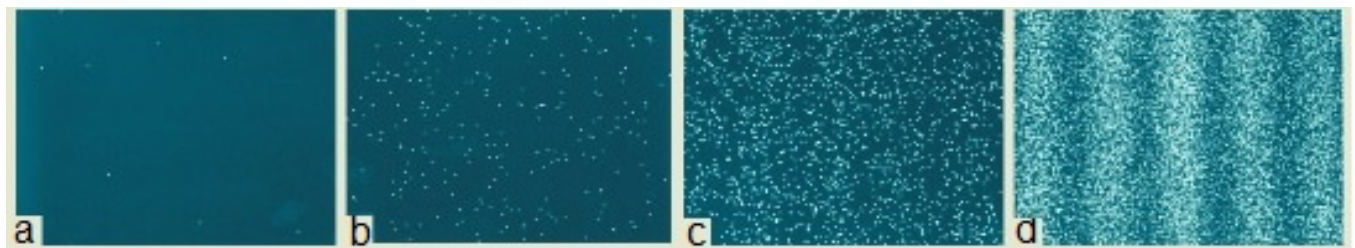


FIGURE 2.1 – Expérience de type Young réalisée avec une unique particule (un électron) à chaque instant dans le dispositif (TONOMURA et al. 1989). Enregistrement effectué avec : (a) 8 électrons (on visualise des impacts localisés), (b) 270 électrons, (c) 2000 électrons, (d) 60000 électrons (on visualise une alternance de franges).

## SQM utilise les images classiques d'onde et de particule, qui sont complémentaires et s'excluent l'une l'autre

Particules et ondes ne sont donc pas des objets nécessaires à SQM. Pour autant, ce sont des concepts auxquels SQM se réfère. Le manuel de Cohen-Tannoudji poursuit ainsi :

l'expérience des franges d'Young, que nous avons analysée [...] nous a conduits aux conclusions suivantes : d'une part, les aspects ondulatoire et corpusculaire de la lumière sont tous deux indispensables à l'explication des phénomènes observés ; d'autre part, ils semblent s'exclure mutuellement, en ce sens

21. (COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018, pp. 13-14), (BASDEVANT, DALIBARD et JOFFRE 2002, pp. 22-24) et (FEYNMAN et al. 2018, p. 1) par exemple.

22. COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018, pp. 13-14.

qu'il est impossible de déterminer par quelle fente chaque photon est passé sans détruire par là même la figure d'interférence. On dit quelquefois que propriétés ondulatoires et propriétés corpusculaires sont complémentaires<sup>23</sup>.

La **complémentarité** est donc relative aux deux concepts d'onde et de particules, mais elle est aussi relative à des mesures qui impliquent des expériences différentes :

pour mesurer des coordonnées d'espace et des temps on a besoin de mètres et d'horloges fixes ; au contraire les dispositifs de mesure des impulsions et des énergies doivent comporter des parties mobiles qui reçoivent et indiquent le choc de l'objet à mesurer [...] Nous avons donc deux expériences qui s'excluent mutuellement, mais sont complémentaires l'une de l'autre et dont l'ensemble seul dévoile tout ce que nous pouvons apprendre d'un objet<sup>24</sup>.

La **complémentarité** est donc aussi associée à des **observables** qui ne commutent pas, comme la position ( $x$ ) associée au concept de particule et la quantité de mouvement ( $p_x$ ) associée au concept d'onde (puisque  $p = \frac{hc}{\lambda}$ ). Elle est essentielle à la compréhension des **inégalités de Heisenberg**  $\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$ .

« Bohr considérait comme acquis le fait que le langage "ordinaire" ne peut représenter directement les microparticules, mais doit néanmoins être utilisé pour les décrire »<sup>25</sup>. Ainsi, onde et particules sont des images mentales issues de la mécanique classique auxquelles on peut faire appel. Car, selon Bohr, onde et particule sont des objets classiques utiles à la compréhension « intuitive » des phénomènes.

### **Selon la complémentarité, on peut faire appel à l'image mentale d'une onde ou d'une particule, c'est-à-dire que le système ne peut se réduire ni à une onde ni à une particule**

Cette **complémentarité** onde-particule aboutit chez certains auteurs de manuels à une redéfinition du concept d'objet quantique, ni onde ni particule, parfois alternativement l'une ou l'autre :

Nous devons donc abandonner l'idée que tout objet physique soit ou une onde ou une particule. On ne peut pas non plus dire, comme on le fait parfois, que les particules « deviennent » des ondes dans le domaine quantique et quel réciproquement, les ondes « se transforment » en particules. Ni même, que les objets quantiques ont une dualité d'essence, à la fois ondes et corpuscules (ce qui est logiquement absurde puisque les deux concepts s'excluent). Il faut donc reconnaître que nous avons affaire à d'autres objets, proprement quantiques. Pour cette raison, nous les baptiserons quantons, bien que cette dénomination ne soit pas universellement utilisée. Ces quantons se comportent de façon spécifique<sup>26</sup>.

Aussi des néologismes ont été forgés parmi lesquels « particule », « ondicule », ou celui qui vient d'être cité, le plus utilisé : « quanton »<sup>27</sup>.

### **SQM rejette les concepts corpusculaires classiques (position, trajectoire,...)**

La notion de trajectoire, même si on peut avoir l'impression que c'est ce que l'on visualise dans une chambre à bulles<sup>28</sup>, est un leurre selon Heisenberg :

23. COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018, p. 51.

24. Max BORN 1955, Discours de Born pour la réception du prix Nobel, p. 742.

25. La citation est d'un chercheur en littérature et sémiotique (YOCARIS 2010, §13).

26. LÉVY-LEBLOND et F. BALIBAR 1984, p. 66.

27. LÉVY-LEBLOND 1988.

28. ou chambre de Wilson ou encore chambre à brouillard. Ce détecteur de particules utilise un gaz de façon que les particules passant le transforment localement en liquide. Les gouttelettes ainsi formées matérialisent en quelque sorte les trajectoires.

on peut observer la trajectoire d'un électron dans la chambre de Wilson. Mais peut-être n'était-ce pas tout à fait cela que l'on observait réellement. Peut-être ne pouvait-on apercevoir qu'une suite discontinue de positions imparfaitement précisées de l'électron. Effectivement, ce que l'on voit dans la chambre, ce sont simplement des gouttelettes d'eau dont chacune est certainement beaucoup plus étendue qu'un électron<sup>29</sup>.

Aussi, le concept de particule est considéré par SQM comme caduque, comme l'expliquent les manuels de mécanique quantique :

Reprenons d'abord le « paradoxe », énoncé plus haut, du photon qui passe par une fente mais se comporte différemment suivant que l'autre est ouverte ou fermée. Nous avons vu que, si l'on cherche à détecter les photons lorsqu'ils franchissent les fentes, on les empêche d'arriver jusqu'à l'écran. De façon plus générale, une analyse détaillée des expériences montre qu'il est impossible d'observer la figure d'interférence et de savoir en même temps par quelle fente est passé chaque photon [...]. On est donc obligé, pour résoudre le paradoxe, de renoncer à l'idée qu'un photon passe forcément par une fente déterminée. On remet ainsi en cause la notion, fondamentale en physique classique, de trajectoire d'un corpuscule<sup>30</sup>.

SQM délaisse les objets précédemment utilisés en physique classique, traditionnellement modélisés par des points matériels. La façon d'exposer la mécanique quantique par les manuels est de ce point de vue tout à fait cohérente avec les « pères de la quantique », comme Born :

étant donné ce quelque chose à quoi l'on ne peut relier à la manière habituelle les concepts de lieu et de mouvement, peut-on encore l'appeler objet, particule ? Et, si cela n'est pas possible, quelle est la réalité que nos théories ont pour but de décrire ? La réponse à cette question n'est plus d'ordre physique, mais philosophique<sup>31</sup>.

En renvoyant à la « philosophie » le problème de l'ontologie de la particule, SQM se passe du concept de corpuscule. Il est cependant remarquable que les manuels ne cessent cependant pas pour autant de parler de « particule », certainement pour faire référence à un « objet quantique » mal défini<sup>32</sup>.

### **SQM s'adosse à une fonction d'onde qui n'est pas relative à une onde au sens classique du terme**

Qu'en est-il du concept d'onde ? Si  $\Psi$  est une « fonction d'onde », SQM ne se réfère-t-elle pas à une véritable onde physique ? Si l'on se limite à une unique particule,  $\Psi$  pourrait être la fonction de l'espace et du temps qu'on associait en physique classique à une onde. Ce n'est plus le cas pour SQM :

les ondes sont des ondes de probabilité. Ce ne sont pas, à vrai dire, les probabilités elles-mêmes, mais certaines « amplitudes de probabilité » qui se propagent continûment et satisfont à des équations différentielles ou intégrales, comme dans la physique du continu classique<sup>33</sup>.

Autrement dit, SQM manipule la fonction  $\Psi$  sans lui conférer un sens traditionnel, celui d'une fonction associée à une onde véritable. Si onde il y a, elle n'est pas physique puisque c'est une onde de probabilité : ce qui se propage est une entité mathématique sans réalité physique.

La fonction d'onde est, avant la mesure, une **superposition** de plusieurs paquets d'ondes, c'est-à-dire de plusieurs possibilités, comme nous l'avons dit. Mais, au cœur du processus de mesure cette fonction d'onde subit selon SQM un changement brusque qui la réduit à une unique possibilité parmi le catalogue

29. Werner HEISENBERG 1969, p.

30. COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018, p. 14.

31. Max BORN 1955, Discours de Born pour la réception du prix Nobel, p. 742.

32. Pour aller plus loin sur ce point : cf. (LAUTESSE, VILA VALLS et al. 2014).

33. I. SOLVAY 1928, intervention de Born et Heisenberg au Congrès Solvay, p. 165.



de possibles. C'est l'effondrement du paquet d'ondes sur lequel nous reviendrons. Là encore, un tel « comportement » n'est pas classique pour une onde.

## 2.2 Qu'est ce que BQM ?

Avant de pointer les différences entre SQM et BQM, il me faut commencer par définir à quoi je me réfère en parlant de BQM, à laquelle il peut être fait référence dans la littérature scientifique sous plusieurs dénominations : théorie de l'onde pilote, mécanique bohémienne, théorie de de Broglie-Bohm (dBB) ou encore interprétation causale (ou ontologique) de la mécanique quantique.

**Dans la continuité de la vision classique , BQM utilise l'onde et la particule, deux concepts qui coexistent sans s'exclure, celle-là guidant celle-ci**

BQM utilise les concepts d'onde et de particule, pour lesquels l'ontologie est assumée. En ceci BQM est comparable à l'hydrodynamique classique où l'on fait appel à la vision lagrangienne (ou particulaire) et son complémentaire, la vision eulérienne (donc de champ, à rapprocher du concept d'onde, cf. 1.1)<sup>34</sup>. Mais, contrairement à SQM adossée à la complémentarité, BQM est fondée sur la dualité onde - particule, au sens où l'onde et le corpuscule coexistent toujours. Il n'existe pas de particule sans son onde associée ou le contraire comme le dit de Broglie qui a été « guidé par l'idée que le corpuscule et son onde de phase ne sont pas des réalités physiques différentes »<sup>35</sup>.

BQM est dans la continuité de la mécanique classique dans la mesure où elle intègre les deux concepts clé de cette dernière : la particule (considérée comme point matériel doté des propriétés traditionnelles : position, masse, charge électrique...<sup>36</sup>) et l'onde associée à une fonction d'onde  $\Psi$ .

Les travaux de Louis de Broglie des années 1920 étaient guidés par une volonté d'utiliser onde et particule. Il dit dans sa thèse :

[J'ai tenté] un effort dans le but d'unifier les points de vue corpusculaire et ondulatoire. [...] J'ai établi un lien entre le mouvement d'un mobile et la propagation d'une onde [qui me laisse] ainsi entrevoir la possibilité d'une synthèse des théories antagonistes [corpusculaire et ondulatoire] sur la nature des radiations. [...] Guidé par l'idée d'une identité profonde du principe de la moindre action et de celui de Fermat, j'ai été conduit dès le début de mes recherches sur ce sujet à admettre que [...] les trajectoires dynamiquement possibles de l'un coïncidaient avec les rayons possibles de l'autre<sup>37</sup>.

De plus onde et particule interagissent, puisque l'onde guide la particule. Pour une particule non relativiste de masse  $m$  et la fonction d'onde qui s'écrit sous la forme

$$\Psi = R \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right) \quad \text{où } R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+ \text{ et } S \in \mathbb{R}$$

on peut, indifféremment, déterminer

- la vitesse  $\vec{v}$  grâce à l'équation de guidage  $\vec{p} = m \vec{v} = \overrightarrow{\text{grad}}(S)$ ;
- ou l'accélération  $\vec{a}$  grâce à l'équation de la dynamique bohémienne  $m\vec{a} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) - \overrightarrow{\text{grad}}(Q)$ .

34. D'ailleurs, en même temps que de Broglie propose sa théorie de l'onde pilote, Madelung développe une « hydrodynamique quantique » (MADELUNG 1927).

35. L. d. BROGLIE 1924, p. 81.

36. Mais aussi spin...

37. L. d. BROGLIE 1924, pp. 30, 37 et 45.

## Il existe deux versions cohérentes de BQM : celle de de Broglie et celle de Bohm

Pour de Broglie l'équation de guidage représente l'unification des principes variationnels de Maupertuis et de Fermat<sup>38</sup>. Sa vision est cohérente avec une vision eulérienne des champs  $R$  et  $S$  qui découlent de la fonction d'onde  $\Psi = R \exp\left(\frac{S}{\hbar}\right)$ , développée par Madelung au même moment historique<sup>39</sup> à la manière du traitement opéré en mécanique (classique) des fluides<sup>40</sup>. Si l'équation de guidage  $\vec{p} = \overrightarrow{\text{grad}}(S)$  rappelle la définition d'une ligne de champ (vectorielle, celle de  $\vec{p}$ ) orthogonale aux surfaces d'un autre champ (scalaire, celui de l'action  $S$ )<sup>41</sup>, de Broglie donne une interprétation lagrangienne de ce qui précède, puisque  $\vec{p} = m\vec{v}$  va déterminer la trajectoire de la particule<sup>42</sup>.

Parmi les différents corpus axiomatiques possibles, je choisirai celui qui est le plus proche de la théorie de l'onde pilote proposée par Louis de Broglie, adossée à l'équation de guidage comme postulat. Aussi, je ne me référerai que dans des cas particuliers au potentiel quantique  $Q$ , en considérant  $Q$  non pas comme un élément constitutif des postulats de BQM mais comme déduit de ces derniers, conformément à la vision la plus courante chez les « bohmiens » actuels<sup>43</sup>. Le fait de ne pas considérer le potentiel quantique  $Q$ , qui a été introduit par David Bohm en 1952, comme un des éléments fondamentaux de BQM ne devrait pas pour autant laisser penser au lecteur que je laisserai de côté des apports de David Bohm, qui sont nombreux et remarquables<sup>44</sup>.

### BQM utilise la fonction d'onde (comme SQM) mais la description de BQM est enrichie par les trajectoires : c'est une « théorie à variables cachées »

Quelle qu'en soit la version, BQM prédit les mêmes résultats expérimentaux observables que SQM car les deux théories reposent l'une et l'autre sur l'utilisation de la fonction d'onde  $\Psi$ . BQM ne fait pas de nouvelles prédictions par rapport à SQM. Autrement dit, il s'agit d'une « complétion rationnelle de SQM »<sup>45</sup>. Par rapport à SQM, BQM enrichit la description à un niveau profond par l'existence des trajectoires des particules. Ces trajectoires sont déterminées à partir de  $\Psi$  et des conditions initiales, soit par l'équation de guidage soit par l'équation de la dynamique bohmiennne.

38. TOWLER 2020.

39. MADELUNG 1927.

40. « It is shown that the Schrödinger equation for one-electron problems can be transformed into the form of hydrodynamical equations » (MADELUNG 1927, résumé). Si Madelung aboutit à une équation identique à celle de guidage proposée par de Broglie, son interprétation est très différente puisqu'il ne traite pas de trajectoire de particules, mais seulement d'un flux de masse. Cf. (ORIOIS et MOMPART 2012, p. 18) pour une discussion plus poussée.

41. Le théorème de Malus  $\vec{k} = \overrightarrow{\text{grad}}\Phi$  édicte le fait que les rayons lumineux sont orthogonaux aux surfaces d'onde en optique, et aussi comme en mécanique des fluides en écoulements incompressibles où la vitesse  $\vec{v} = \overrightarrow{\text{grad}}\phi$  donne des lignes de courant orthogonales aux surfaces équipotentielles.

42. Dans le cas stationnaire, trajectoires et lignes de champ de  $\vec{p}$  coïncident, comme en mécanique des fluides.

43. « In fact the quantum potential need not be mentioned in the formulation of pilot-wave theory » (TOWLER 2020); « There is neither need nor room for any further axioms involving the quantum potential! Thus the quantum potential should not be regarded as fundamental » (DÜRR, GOLDSTEIN et ZANGHI' 1996); « Bohm's "quantum potential" is, like the "luminiferous ether", a concept best abandoned » (VALENTINI 1996); « the quantum potential need not even be mentioned in the formulation of Bohmian mechanics, and it in any case merely reflects the wave function, which Bohmian mechanics shares with orthodox quantum theory » (GOLDSTEIN 2017).

44. Parmi les apports de Bohm vis à vis de la première version donnée par Louis de Broglie, je citerai : les différents exemples d'application, la formalisation du processus de mesure, la facilitation du passage au cas classique et enfin la levée de l'objection faite par Pauli à de Broglie au congrès Solvay en 1927.

45. BRICMONT 2020, p. 215.

Si les prédictions de BQM et SQM sont équivalentes (car déduites dans les deux cas de la – même – fonction d’onde  $\Psi$ ), BQM enrichit la vision proposée par SQM par des scénarios mathématisés fondés sur les trajectoires, c’est-à-dire l’ensemble des positions successives des particules, définies à chaque instant. En effet, contrairement à SQM, BQM suppose que les particules qu’elle décrit ont une position bien définie à chaque instant.

Ainsi, BQM complète la description donnée par SQM en introduisant la position de la particule. Cette position de la particule apparaît comme une « variable cachée » vis-à-vis de SQM qui s’en passe. Les « variables cachées » sont des paramètres additionnels permettant une description plus détaillée des processus quantiques. Dans le cas de BQM, les positions<sup>46</sup> sont des variables cachées selon Bohm :

les valeurs précises de la position et de la quantité de mouvement de la particule doivent, en général, être comprises comme « cachées » puisqu’on ne peut pas les mesurer en même temps<sup>47</sup>.

Mais le vocable de « variables cachées » a été critiqué par de nombreux bohmiens<sup>48</sup> comme Bell :

De façon absurde, ces théories [comme BQM] sont connues comme des théories à « variables cachées ». De façon absurde car ce n’est pas dans la fonction d’onde qu’on trouve une image du monde visible, et le résultats d’expériences, mais plutôt dans les variables dites « cachées ». [...] En tout cas, la plus cachée des variables, dans [BQM], est la fonction d’onde, qui se manifeste à nous seulement par son influence sur les variables complémentaires<sup>49</sup>.

Ce que souligne Bell, c’est que dans BQM les positions dites « variables cachées » sont en fait observables (lors d’une expérience mise au point pour cela), donc elles ne sont pas « cachées » aux humains d’un point de vue empirique<sup>50</sup>.

### **BQM se fonde sur l’existence des trajectoires (dites « bohmiennes »)**

Du fait de la complexité des calculs, il a fallu attendre le tournant des années 1980 (et une bonne « puissance » des ordinateurs) pour que soient publiées les premières trajectoires bohmiennes<sup>51</sup>. Ce n’est pas un hasard dans la mesure où la trajectoire d’une particule selon BQM peut être soumise à la **sensibilité aux conditions initiales** (SCI, cf. 3.1.1) : si l’on change un tout petit peu les conditions initiales, on peut obtenir une trajectoire qui devient très différente de celle qu’on avait préalablement déterminée.

Il me semble que c’est la théorie du chaos (qui, la première, met la SCI au cœur de son propos, dans les années 1970) qui permet de saisir convenablement les prédictions des trajectoires BQM, tout particulièrement dans les zones d’interférences entre les paquets d’ondes, qui génèrent un fort potentiel quantique. Il est

46. Si la position est connue, la quantité de mouvement (et la vitesse) aussi selon les lois bohmiennes. Aussi, vitesse et position sont des variables cachées.

47. David BOHM 1952, p. 183, ma traduction.

48. Voir aussi (TOWLER 2020) : « The idea that the "hidden variables" (i.e. the positions of particles) are "metaphysical" and/or "unobservable" is shown by the pilot-wave theory to be a misapprehension. »

49. John S. BELL 1987, pp. 201-202, ma traduction.

50. « Les positions sont directement observables, mais pas directement manipulables. On voit, au passage, que les appeler « variables cachées » est absurde puisqu’il s’agit en fait des variables que l’on voit dans les expériences. Elles sont observables, mais il est interdit aux êtres humains de les manipuler, sinon il y aurait une contradiction avec la relativité. En plus il existe un autre type de réalité, qui correspond aux fonctions d’ondes devenues des ondes pilotes bohmiennes. Ces ondes ne sont pas directement observables. On ne les voit que par l’intermédiaire de leur effet sur les positions. Mais, en revanche, elles sont manipulables : si on change le champ électrique, on change l’hamiltonien et on obtient une équation de Schrödinger qui indique comment va changer la fonction d’onde » (LALOË 2014, pp. 247-248).

51. PHILIPPIDIS, DEWDNEY et B. J. HILEY 1979.

vrai cependant que [Bohm](#) avait compris intuitivement que les trajectoires étaient sensibles aux conditions initiales, comme il l'écrit en 1952 :

dans notre interprétation, les fluctuations quantiques et les fluctuations classiques (comme le mouvement brownien) ont fondamentalement la même origine, c'est-à-dire le caractère complexe et chaotique du mouvement au niveau microscopique<sup>52</sup>.

On reviendra plus loin (cf. [3.1.1](#)) spécifiquement sur le fait que les trajectoires bohmiennes sont soumises à la [sensibilité aux conditions initiales](#).

Notons tout de même que, dans la mesure où il a fallu attendre la fin du XX<sup>e</sup> siècle pour disposer de trajectoires bohmiennes et de la théorie du chaos pour les éclairer, on comprend peut-être mieux la difficulté qu'a eu BQM à s'imposer vis-à-vis de SQM. En effet, ni [de Broglie](#) en 1927, ni [Bohm](#) en 1952 ne disposait de calculs numériques de trajectoires bohmiennes (effectués par des ordinateurs assez puissants), ni non plus de la théorie du chaos pour « éclairer » un certain nombre de propriétés de ces trajectoires bohmiennes.

Il est à noter que, récemment, de nouvelles techniques expérimentales appelées « mesures quantiques faibles »<sup>53</sup> pourraient avoir mis en évidence ce qui ressemble à des trajectoires bohmiennes. Mais, même si les trajectoires des particules ne peuvent être observées véritablement, cela ne veut pas pour autant dire que ces trajectoires n'existent pas (la fonction d'onde elle-même n'est pas directement détectée, ce qui n'empêche pas SQM de l'utiliser<sup>54</sup>).

## L'onde et la particule ont des statuts différents pour BQM

Si onde et particules coexistent en BQM, elles ont cependant des statuts très différents. Ainsi, l'onde est en fait cachée (seulement visible indirectement par ses effets). C'est la préparation du système qui est caractérisée par la fonction d'onde<sup>55</sup>, et à l'inverse, la particule dont la position peut être mesurée n'est pas « manipulable » puisque la préparation du système porte sur la fonction d'onde. Existe aussi une autre asymétrie flagrante entre onde et particule en BQM : c'est l'onde qui pilote la trajectoire de la particule mais cette dernière, elle, ne rétroagit pas sur l'onde. On peut voir là une violation du principe classique d'action - réaction.

Si pour SQM  $\Psi$  ne se réfère pas à une onde, il n'en est pas de même avec BQM. Certes  $\Psi$  est un champ sans source au sens conventionnel du terme : rien ne le génère, il n'est pas rayonné, aucun support (ni éther) n'est nécessaire à sa propagation. On peut se représenter  $\Psi$  comme un état de vibration de l'espace vide. Il est à noter aussi que  $\Psi = R \exp(iS/\hbar)$  est complexe et, contrairement aux fonctions d'ondes habituellement utilisées en physique classique où seule la partie réelle importe, pour BQM le module  $R$  et l'argument  $S/\hbar$  de  $\Psi$  sont aussi importants l'un que l'autre.

Dans le cas où l'on considère une unique particule,  $\Psi(x, y, z, t)$  est un champ défini dans l'espace réel : c'est une fonction d'onde comme une autre de ce point de vue comme le note [Bohm](#) :

nous sommes amenés à considérer la fonction d'onde d'un électron individuel [ou de tout autre particule quantique] comme une représentation mathématique d'un champ objectivement réel. [...] L'analogie avec un champ électromagnétique (ou autre) va plus loin. Si le champ électromagnétique obéit aux

52. David BOHM 1952, p. 186, ma traduction.

53. En anglais « weak measurements ». Voir en particulier (FLACK et B. J. HILEY 2014), (KOCIS 2011) et (BLIOKH et al. 2013).

54. « But to admit things not visible to the gross creatures that we are is, in my opinion, to show a decent humility, and not just a lamentable addiction to metaphysics. In any case, the most hidden of all variables, in the pilot wave picture, is the wavefunction, which manifests itself to us only by its influence on the complementary variables » (John S. BELL 1987, p. 202).

55. (LALOË 2014, pp. 247-248) pour une discussion approfondie de ce point.

équations de Maxwell, la fonction  $\Psi$  suit l'équation de Schrödinger. Dans chacun des deux cas, la spécification des champs à un instant donné partout dans l'espace détermine la valeur des champs à n'importe quelle date<sup>56</sup>.

Mais si l'analogie avec un champ traditionnel dans l'espace réel peut se faire dans le cas d'une unique particule, il en va tout autrement si l'on s'intéresse à la fonction d'onde de plusieurs particules. En effet,  $\Psi$  dépend non pas des coordonnées de l'espace géométrique, mais des coordonnées de toutes les particules : lorsqu'il y a plusieurs particules, cette fonction d'onde se « propage » dans l'espace de configurations. Par exemple, s'il y a  $10^{23}$  particules, l'espace des configurations est un espace de dimension ( $3 \times 10^{23}$  !) absolument énorme. Aussi  $\Psi$  en BQM est donc très différent d'un champ classique et son interprétation dans le cas où l'on traite de plusieurs particules pose problème. Louis de Broglie lui-même était dubitatif sur l'ontologie de l'onde associée à la fonction  $\Psi$ <sup>57</sup> :

dans son Mémoire de janvier 1952, M. David Bohm a repris la théorie de l'onde-pilote en admettant que l'onde  $\Psi$  est une « réalité physique ». Ce point de vue me paraît inadmissible, même quand il s'agit de l'onde  $\Psi$  normée de la Mécanique ondulatoire pour un seul corpuscule et à plus forte raison quand il s'agit de l'onde  $\Psi$  d'un système de corpuscules dans l'espace de configuration<sup>58</sup>.

Nous avons vu que  $\Psi$  est pour BQM un outil permettant de déterminer l'évolution de la particule (selon l'équation de guidage ou bien l'équation de la dynamique bohmiennne). Mais cette fonction d'onde a un double statut pour BQM. Nous verrons (cf. 3.1.1) que  $\Psi$  est aussi une entité mathématique qui donne la mesure du manque d'information sur le système.

Ensuite, le potentiel quantique  $Q$  est une énergie potentielle qui a une propriété foncièrement non classique en ceci qu'elle ne dépend pas de l'intensité de la fonction d'onde. L'influence de la fonction d'onde sur la particule *via* le potentiel quantique est en effet indépendante de l'amplitude  $R$  de la fonction d'onde<sup>59</sup> ce qui peut être surprenant. En effet, même dans le cas où la particule serait dans une zone peu probable (où  $R$  est faible), l'effet de la fonction d'onde peut être très important tout de même.

[BQM] possède un trait très peu classique. L'effet de la fonction d'onde sur le mouvement de la particule est indépendant de son amplitude. Cela peut être vu par exemple lorsque la formulation de potentiel quantique est utilisée puisque  $\Psi$  apparaît au numérateur et au dénominateur de  $Q$ . Bohm et Hiley ont donc comparé les fonctions d'onde  $\Psi$  aux ondes radio<sup>60</sup> qui guident un objet comme un navire sur pilote automatique. Dans cette métaphore, l'effet des ondes radio est indépendant de leur intensité et ne dépend que de leur forme<sup>61</sup>.

56. David BOHM 1952, ma traduction, p. 170.

57. Les avis de de Broglie et Bohm divergeaient à ce sujet, comme l'atteste en particulier une lettre du premier au second du 29 mars 1953 (Archives 42-J 7 de l'Académie des Sciences) : « vous savez que nos points de vue ne sont pas tout à fait les mêmes [...] dès que l'on a affaire à plus d'un corpuscule, l'onde  $\Psi$  doit se représenter dans l'espace de configuration à plus de 3 dimensions et son caractère non physique me paraît alors absolument évident. Il me semble qu'une description causale des particules doit nécessairement se faire dans l'espace ordinaire. »

58. L. d. BROGLIE 1956b, p. 107.

59. La preuve en est que  $Q(\Psi) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R} = Q(\alpha\Psi) \forall \alpha > 0$ .

60. « The basic idea of active information is that a form having very little energy enters into and directs a much greater energy. The activity of the latter is in this way given a form similar to that of the smaller energy. It is therefore clear that the original energy-form will "inform" (i.e. put form into) the activity of the larger energy. As an example, consider a radio wave whose form carries a signal. The energy of the sound that we hear from our radio comes, however, not from this wave but from its power plug or batteries. This is essentially an "unformed" energy, that takes up the form or information carried by the radio wave. The information in the radio wave is, in fact, potentially active everywhere, but it is actually active, only where and when its form enters into the electrical energy within the radio » (David BOHM, B. J. HILEY et KALOYEROU 1987, p. 327).

61. PASSON 2005, pp. 5-6.

Aussi, la fonction d'onde peut avoir un effet (de guidage) sur la particule, même si  $\Psi$  est quasiment nulle, ce qui est tout à fait étrange dans un cadre classique.

On voit donc que  $\Psi$  s'éloigne, sur bien des points, d'une fonction d'onde en physique classique. Aussi, la réalité de l'onde associée à  $\Psi$  pose problème dans BQM à tel point que certains bohmiens proposent de l'exclure de l'ontologie de BQM :

la fonction d'onde n'est pas un élément de la réalité physique. Nous proposons de dire que la fonction d'onde appartient à une tout autre catégorie d'existence que celle des entités physiques, et que son existence est nomologique plutôt que matérielle. Nous proposons, en d'autres termes, de prendre la fonction d'onde comme un élément de loi physique plutôt qu'un élément de la réalité décrit par la loi <sup>62</sup>.

Il s'agit de ne plus voir dans  $\Psi$  la référence à une fonction associée à une « vraie » onde (qui aurait une réalité) mais plutôt à un élément permettant d'exprimer les lois de BQM.

### Contrairement à ce que l'on pourrait penser *a priori*, BQM est en rupture avec la mécanique classique

De ce point de vue, on est confronté au chemin inverse de celui emprunté historiquement par le concept de champ en physique classique : l'onde perd son caractère autonome pour revenir à un artifice de calcul utilisé pour exprimer les lois de la mécanique, comme l'était initialement le champ en mécanique newtonienne.

De plus, BQM présente de nombreuses propriétés qu'on ne retrouve pas en mécanique classique : la définition de la fonction d'onde sur l'espace de configurations, la non-localité, l'action de  $\Psi$  sur la particule alors que cette dernière n'exerce pas d'action réciproque sur l'onde, le statut de  $\Psi$  comme « mesure du manque d'information », etc. BQM « possède tellement de traits qui sont communs à la mécanique quantique et complètement non classiques qu'on ne peut réduire BQM à une sorte de mécanique classique adaptée au monde microscopique » <sup>63</sup>.

## 2.3 L'articulation de SQM et BQM avec la physique classique

### 2.3.1 Le raccord de SQM avec la mécanique classique

#### Les quanta, discontinuités absentes en physique classique sont présentes en SQM

SQM fait apparaître des quanta, ces discontinuités qui semblent apparemment inconciliables avec les diverses formulations classiques que nous avons vues. Ainsi pour prendre un exemple, on peut s'intéresser au cas traité dans l'annexe D.2 où un objet quantique de masse  $m$  non relativiste se trouve confiné entre  $x = 0$  et  $x = \ell$ . On peut alors montrer que l'énergie  $E$  du système est quantifiée :  $E$  ne peut prendre que des valeurs parmi

$$E_n = \frac{1}{2m} \left( \frac{n\pi\hbar}{\ell} \right)^2 \quad \text{où } n \in \mathbb{N}^*$$

$n$  est un nombre entier qui caractérise l'énergie de la particule. Le graphique 2.2 représente quelques niveaux possibles pour  $E$ .

62. DÜRR, GOLDSTEIN et ZANGHÌ 1995, p. 10, ma traduction.

63. PASSON 2005, p. 4, ma traduction.

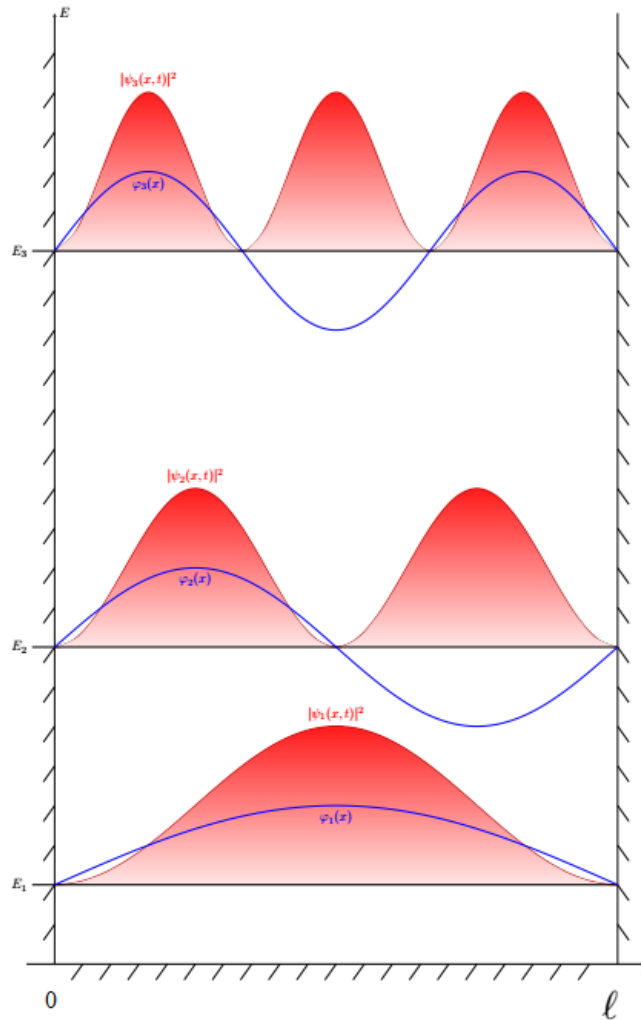


FIGURE 2.2 – En abscisse, position le long de l’axe  $x$  entre  $0$  et  $l$ . Les fonctions d’ondes associées aux énergies  $E_n$  sont  $\Psi_n(x,t) = \varphi_n(x) \exp(-i \frac{E_n}{\hbar} t)$ .  
 En ordonnée en noir : énergies  $E_n$ , en bleu  $\varphi_n(x)$  et en rouge  $|\Psi_n|^2$ .

## La mécanique classique est un cas asymptotique de SQM selon le principe de correspondance

Or SQM considère que le cas classique fait disparaître ces quanta, dans le cas limite où ils deviennent insensibles pour un système macroscopique. Au cœur de l'articulation entre la théorie quantique selon SQM et la physique classique se trouve le principe de correspondance. Commençons par définir ce qu'est ce principe et comment il a émergé.

Le « principe » de correspondance est initialement un guide heuristique utilisé par [Bohr](#) lors de la mise au point du modèle de l'atome d'hydrogène, comme le rappelle le physicien [Ehrenfest](#) :

[Bohr](#) soumet les mouvements dans l'atome de Rutherford à une censure de quanta<sup>64</sup> [...] Autant que possible il fait en sorte que son modèle d'atome se conforme aux règles classiques (principe d'inertie, lois de Coulomb) ; là où cela n'est pas possible (rayonnement), il tâche d'établir, entre les mouvements dans l'atome et le rayonnement émis par lui, au moins une correspondance aussi étendue que possible. Pour trouver cette correspondance, [Bohr](#) se laisse guider par le principe heuristique suivant : il faut que lorsqu'on donne aux nombres de quanta d'un système quantité des valeurs de plus en plus élevées, le rayonnement émis tende asymptotiquement vers celui que le système émettrait suivant les règles classiques<sup>65</sup>.

Le principe de correspondance est adapté à l'étude de l'atome d'hydrogène, puisque historiquement utilisé dans ce cas. En effet, si la transition se fait entre deux niveaux  $m$  et  $n$  différents (l'un au moins de ces deux nombres quantiques étant donc grand devant 1) le quantum  $\hbar$  d'action (ou la variation quantifiée d'énergie) apparaît comme un infinitésimal, reproduisant asymptotiquement un comportement quasi-continu (propre à la mécanique classique<sup>66</sup>).

### Le passage SQM - classique s'appuie aussi sur le théorème d'Ehrenfest

Il est d'autre part possible de retrouver en SQM le point matériel propre à la mécanique classique, comme le montrent parfois les manuels :

à la limite macroscopique (où les longueurs d'onde de L. de Broglie sont très petites [...]), on peut former des paquets d'ondes suffisamment petits [...]. Le mouvement du paquet d'ondes est alors pratiquement celui d'un corpuscule classique [...]. Le résultat que nous venons d'établir ainsi est très important car il permet de montrer que les équations de la mécanique classique découlent de l'[équation de Schrödinger](#), dans certaines conditions limites satisfaites notamment pour la plupart des systèmes macroscopiques.<sup>67</sup>

On voit que ce passage du cas quantique au cas classique en SQM est intimement lié à la pertinence de la vision corpusculaire. Ce raccord entre les deux théories s'appuie sur un résultat démontrable dans certains cas, le théorème d'Ehrenfest, qui précise que SQM permet de retrouver les résultats de la physique classique comme étant les moyennes d'[observables](#).

64. Certaines grandeurs physiques varient de façon discontinue, ainsi les énergies possibles sont elles de la forme  $E_n = -\frac{E_0}{n^2}$  où  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $E_0$  une constante strictement positive.

65. EHRENFEST 1921, p. 248.

66. L'énergie  $\Delta E_{nm}$  mise en jeu dans la transition  $n \leftrightarrow m$ , de fréquence  $\nu_{nm}$  est

$$\Delta E_{nm} = h \nu_{nm} = |E_m - E_n| = E_0 \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right|$$

Ainsi, si  $n \gg 1$ , la variation de  $\Delta E_{nm}$  (ainsi que celle de  $\nu_{nm}$ ) avec  $n$  est quasi-continue.

67. COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018, p. 244.



## Le principe de correspondance permet de faire entre les domaines quantique et classique une distinction qui est nécessaire à SQM

L'idée fondamentale du principe de correspondance est donc celle-ci : la mécanique classique est un cas limite – asymptotique – de la mécanique quantique dans le cas où les nombres quantiques sont grands devant 1 (ou, ce qui revient au même, lorsque l'action caractéristique  $\mathcal{A}$  du problème est  $\mathcal{A} \gg \hbar$ ).

De la même façon, dans les [inégalités de Heisenberg](#), pour peu que les incertitudes expérimentales soient telles que  $\Delta x \Delta p_x \gg \hbar$ , on se retrouve dans le cas classique : la limitation n'est plus quantique (due à une indétermination fondamentale) mais plutôt classique (due à la précision limitée des mesures).

Dit autrement, le principe de correspondance permet opérationnellement de distinguer ce qui est du domaine de la mécanique quantique (faible nombre quantique ou  $\mathcal{A} \approx \hbar$ ) de ce qui ressort de la mécanique classique (fort nombre quantique ou  $\mathcal{A} \gg \hbar$ ).

### 2.3.2 Le raccord de BQM avec la mécanique classique

#### La mécanique classique apparaît comme un cas asymptotique de BQM (quand le potentiel quantique devient négligeable)

[Bohm](#) a proposé une version équivalente de BQM à celle de [de Broglie](#), qui n'est pas fondée sur l'[équation de guidage](#) (qui donne la vitesse), mais plutôt sur une [équation de la dynamique bohmienne](#) qui donne l'accélération. Cette formule ressemble plus à ce que propose la mécanique classique car cette dernière équation est très semblable au principe fondamental de la mécanique classique auquel il faudrait ajouter le [potentiel quantique](#) (noté  $Q$ )<sup>68</sup>. Un des principaux intérêts du [potentiel quantique](#) est de donner un instrument pouvant permettre d'estimer l'écart de la situation quantique traitée par BQM à une situation classique. Puisque l'on retrouve le principe fondamental de la dynamique – classique – à partir de l'[équation de la dynamique bohmienne](#) dans le cas où  $Q \rightarrow 0$ <sup>69</sup>, la mécanique classique apparaît comme limite asymptotique de BQM si  $\frac{\hbar^2}{m} \rightarrow 0$ .

Contrairement au cas de SQM (cf. 2.3.1), il n'y a pas avec BQM de distinction nécessaire entre microscopique (qui obéit à la mécanique quantique) et macroscopique (qui obéit à la mécanique classique). De plus, on trouve avec BQM un critère simple pour déterminer si un système peut être étudié (en bonne approximation) dans un cadre classique : il suffit que la masse de ce système soit suffisamment importante pour que l'on puisse considérer  $Q$  comme quasi-nul.

#### Les trajectoires BQM sont bien peu classiques

Si les lois de la mécanique selon BQM sont proches de celles qu'on retrouve dans un cadre classique, il est important de noter que les trajectoires des particules selon BQM peuvent sembler « étranges » ou « erratiques », en un mot : surprenantes<sup>70</sup>. Elles sont étranges dans la mesure où elles présentent des traits non classiques<sup>71</sup>.

68. David BOHM 1952, p. 170.

69. Notons d'ailleurs que  $Q$  is « useful for developing approximation schemes for solutions to Schrödinger's equation (Nerukh et Frederick 2000) » (GOLDSTEIN 2017).

70. Englert utilise lui le qualificatif « surréaliste » : « the trajectories, which David Bohm invented in his attempt at a realistic interpretation of quantum mechanics, are in fact surrealistic » (ENGLERT et al. 1992, résumé).

71. « Bohmian trajectories behave not as we would expect from a classical type model. [...] We were very reluctant to accept that the Bohmian picture is different, in some cases, from a naive picture based on the outcomes of the experiments » (Yakir AHARONOV et VAIDMAN 1996).

Nous avons des situations avec lesquelles on n'est pas du tout familier [en mécanique classique. . .] C'est une tendance forte des particules bohmiennes que de faire des zigzags qui rendent l'interprétation des trajectoires non triviale <sup>72</sup>.

Avec BQM, la notion de trajectoire des particules, qui vient de la mécanique classique, est certes sauvegardée. Cependant, il ne faut pas attendre des trajectoires bohmiennes des propriétés rigoureusement identiques à celles du cadre classique. Une illustration de cela est possible dans le cas du « choc » entre deux particules. Sur la figure 2.3, dans la partie centrale les trajectoires bohmiennes ne sont pas celles qu'on attendrait dans un cadre classique. Ceci est dû au fait que les trajectoires bohmiennes ne peuvent se croiser <sup>73</sup>. Cependant, on note sur la figure que, lorsque les particules sont loin l'une de l'autre (lorsqu'il n'y a plus recouvrement de paquets d'ondes, donc plus d'interférences, ce qui impose  $Q \approx 0$ ), tout se passe (asymptotiquement donc) comme en mécanique classique.

### **La quantification apparaît dans BQM, une fois terminé le régime transitoire auquel sont soumises les trajectoires bohmiennes**

Un des points délicats de l'articulation entre une théorie quantique et la physique classique est l'existence (dans le cadre quantique) de la quantification de certaines valeurs mesurées, alors que les grandeurs physiques varient continûment en physique classique. En BQM, la trajectoire est bien définie et à chacune des positions de la particule sont associées des grandeurs qui varient continûment avec la position. Cependant, le dispositif de mesure quantique donne accès à des observables dans des positions spécifiques de la particule. C'est ce qui donne des valeurs spécifiques aux mesures qui semblent alors évoluer discontinûment. Deux exemples de l'apparition « naturelle » de la quantification avec BQM sont donnés sur les figures :

- 2.4, où le passage d'un état stationnaire à un autre dans l'atome d'hydrogène se fait continûment avec une trajectoire bohmienne pendant le régime transitoire ;
- et 2.5 où l'orientation du spin se fait continûment le long des trajectoires bohmiennes dans le dispositif de Stern et Gerlach.

### **2.3.3 La mécanique classique irréductible à un cas limite de SQM ou de BQM**

#### **La mécanique classique est irréductible à un cas particulier de la mécanique quantique (que cette dernière soit SQM ou BQM)**

On vu que, si BQM avait des similarités avec la mécanique classique, elle ne pouvait pas être considérée comme une mécanique classique des systèmes microscopiques. En particulier, les trajectoires bohmiennes ont des caractéristiques qui les éloignent des trajectoires classiques. De plus,

[en BQM] la fonction d'onde diffère fondamentalement d'une véritable fonction d'onde classique qui décrit uniquement notre connaissance d'une situation, et non la situation réelle. Dans une optique bien différente, nous arrivons ainsi à une conception de l'interface quantique / classique similaire à celle de [SQM]. Nous avons deux théories du mouvement qui sont toutes les deux nécessaires pour rendre compte des phénomènes physiques. Ces théories s'accordent dans leur description du mouvement pour certains phénomènes [mais] elles restent conceptuellement distinctes. En bref, la mécanique quantique

72. LALOË 2014, pp. 232 et 269.

73. « An important property of Bohm trajectories  $z(z^{(0)}, t)$  with different  $z^{(0)}$  (but the same  $\Psi(z, 0)$  !) is that they do not intersect each other : if  $z_i^{(0)} \neq z_j^{(0)}$ , then  $z(z_i^{(0)}, t) \neq z(z_j^{(0)}, t)$  for any  $t$  » (LEAVENS 1996, p. 113).

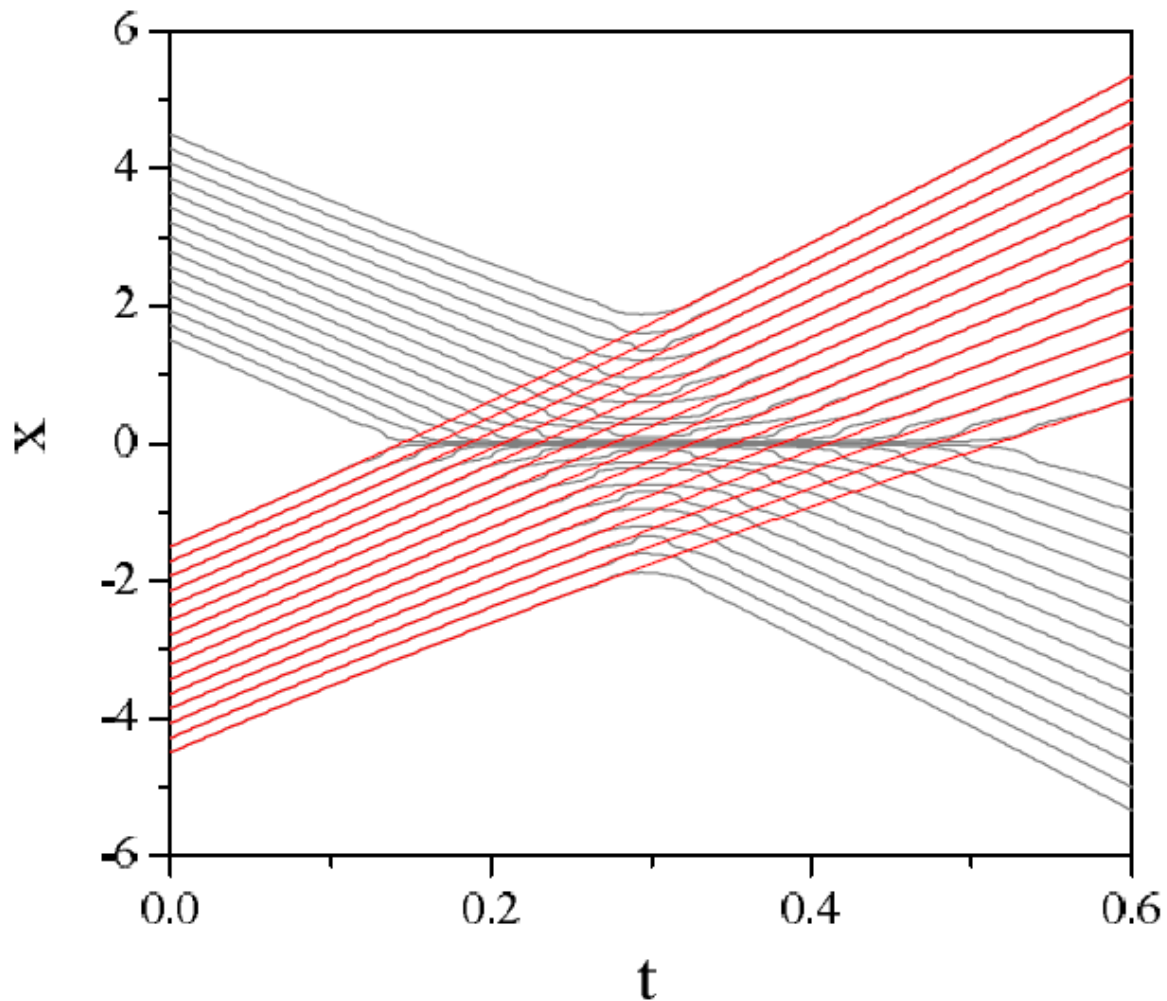


FIGURE 2.3 – Trajectoires bohmiennes associées

– à un seul paquet d’ondes gaussiennes (en rouge);

– à une superposition de deux paquets d’ondes gaussiens (en gris).

Les trajectoires bohmiennes sont différentes dans la partie centrale mais la partie asymptotique reste la même (SANZ et MIRET-ARTES 2008, p. 11).

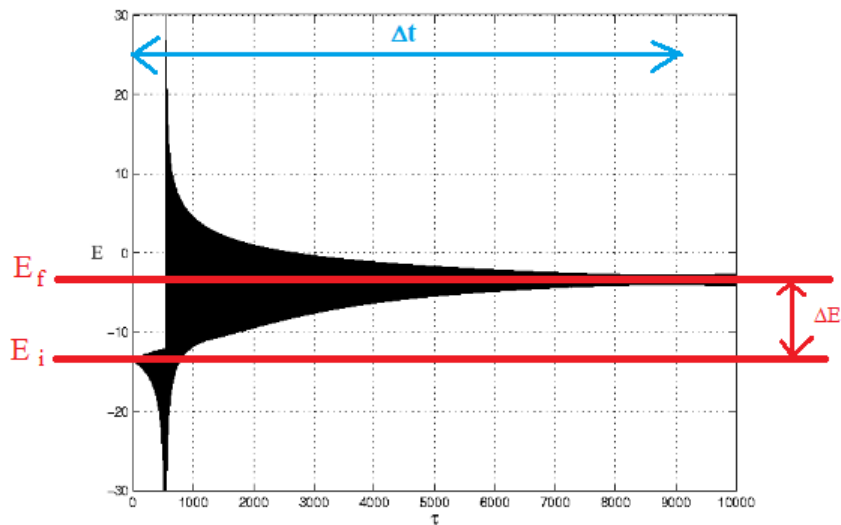


FIGURE 2.4 – Evolution de l'énergie de l'électron dans l'atome d'hydrogène le long de sa trajectoire bohmienne calculée pour la transition  $1s \rightarrow 2p$  (COLIJN et VRSCAY 2003, p. 15).

Au bout d'un temps caractéristique  $\Delta t$ , l'énergie est passée de  $E_i$  à  $E_f$ , éloignée d'un quantum  $\Delta E = E_f - E_i$ . On retrouve comme états initial et final les solutions stationnaires éloignées d'un quantum d'énergie  $\Delta E = E_f - E_i$ , une trajectoire bohmienne faisant passer de l'un à l'autre.

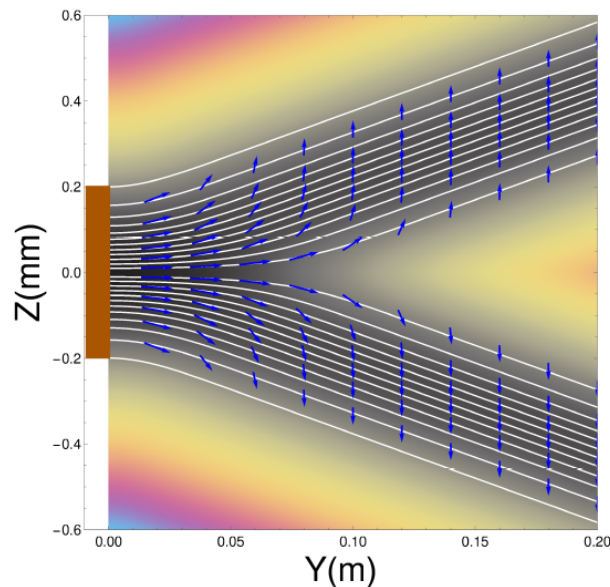


FIGURE 2.5 – Ensemble de trajectoires bohmiennes à l'intérieur d'un dispositif de Stern et Gerlach (Basil J. HILEY et VAN REETH 2018, p. 8).

L'orientation du spin est indiquée en surimpression le long de la trajectoire.

Les couleurs indiquent la densité de probabilité (noir pour une probabilité maximale et bleu pour une probabilité nulle).

On observe une évolution continue de l'orientation du spin à l'intérieur du dispositif de Stern et Gerlach le long des trajectoires bohmiennes, tandis qu'à l'extérieur du dispositif deux faisceaux émergent avec deux projections opposées de spin (cette dernière quantité subit donc une discontinuité).

et la mécanique classique sont des théories physiques différentes avec seulement un chevauchement numérique et conceptuel limité. [...] Une implication de la discussion précédente est que, si l'on désire une théorie mécanique universelle cohérente, alors celle-ci devrait inclure les théories quantiques et classiques comme des cas particuliers d'une structure plus générale plutôt que d'essayer de traiter l'une comme dérivant de l'autre<sup>74</sup>.

La mécanique classique est donc irréductible à un cas particulier de la mécanique quantique (qu'elle soit SQM ou BQM)<sup>75</sup> : on ne peut inclure la mécanique classique ni dans BQM ni dans SQM. Tout au mieux retrouve-t-on, dans certains cas limites de BQM et SQM, des résultats prédits par la mécanique classique.

### Une particule quantique est caractérisée à partir de grandeurs n'ayant pas de correspondant classique

D'autre part, si l'on parle de particule quantique (en SQM et en BQM), il faut remarquer que le spin n'a pas de correspondance classique. Non seulement ce spin est lié à une mesure quantique possible, absente en physique classique, mais, de plus, il détermine deux classes de particules bien différenciées : les particules de spin demi-entier sont des fermions<sup>76</sup> qui collectivement obéissent à la statistique de Fermi-Dirac<sup>77</sup>, tandis que celles de spin entier sont des bosons<sup>78</sup> qui suivent la statistique de Bose-Einstein<sup>79</sup>.

À haute température, les deux statistiques, celle de Bose-Einstein et celle de Fermi-Dirac, sont équivalentes à la statistique de Maxwell-Boltzmann, qui est celle suivie par toutes les particules classiques.

---

74. HOLLAND 1996, pp. 109-110.

75. « The differences between quantum and classical ensembles of trajectories is not a difference between waves and particles, because both waves and particles can be used to study classical or quantum systems. On the contrary, the difference resides between a linear wave equation (for quantum mechanics) and a nonlinear wave equation (for classical mechanics) » (ORIOIS et MOMPART 2012, p. 28). (ORIOIS et MOMPART 2012, pp. 19-24) proposent en effet d'associer, en mécanique classique, à une particule une onde « classique »  $\psi_{cl}$  qui devrait alors suivre une équation de Schrödinger à laquelle on a ajouté aux potentiels...  $-Q$  :

$$i\hbar \frac{\partial \psi_{cl}}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi_{cl} + V \psi_{cl} - Q \psi_{cl}$$

76. par exemple, l'électron, le proton ou le neutron sont des fermions.

77. Selon le principe d'exclusion de Pauli, deux fermions identiques ne peuvent se trouver au même endroit dans le même état quantique.

78. par exemple, le photon est un boson.

79. Cette statistique ne limite pas le nombre de bosons qui peuvent occuper le même état quantique, contrairement aux fermions.



# Chapitre 3

## La mesure dans les cas SQM et BQM

### 3.1 Quel est le statut des probabilités des résultats de mesure ?

#### 3.1.1 La probabilité de mesure en BQM due au manque d'information

##### En BQM, les probabilités traduisent une incertitude due à un manque d'information

BQM est déterministe tout comme la mécanique classique. En effet, si l'expérimentateur connaissait parfaitement les positions initiales des particules ainsi que la fonction d'onde, il serait capable de déterminer parfaitement leur évolution future à l'instar du « génie de Laplace » :

une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était suffisamment vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux<sup>1</sup>.

Ainsi, si on connaissait parfaitement l'état initial du système, on pourrait en principe calculer très précisément son évolution qui est parfaitement déterminée et ainsi prédire de façon univoque le résultat de toute mesure, comme dans le cas d'un lancer d'un dé en mécanique classique<sup>2</sup>. En effet, la « mesure » effectuée lorsqu'on lance un dé (qui donne le résultat 1, 2, 3, 4, 5 ou encore 6) ou une pièce de monnaie (avec le résultat pile ou face) semble aléatoire mais en fait ne l'est pas selon la mécanique classique : il suffirait de connaître parfaitement les conditions initiales et d'appliquer les lois – parfaitement causales – de la dynamique pour connaître le résultat final. Il en va de même pour BQM qui est parfaitement déterministe.

Cependant, les conditions initiales sont mal maîtrisées, donc mal connues, et c'est ce qui explique que BQM s'appuie sur un traitement statistique qui n'a rien à voir avec le hasard.

##### La fonction d'onde en BQM donne accès à une mesure du manque d'information

Une image poétique pourrait être celle d'un poisson dans une mare<sup>3</sup>. Le poisson-particule existe à chaque instant en un endroit bien précis de la mare. L'onde (plus exactement  $\Psi$ ) donne accès à la probabilité

---

1. LAPLACE 1814, p. 2.

2. LALOË 2014, intervention d'Hervé Zwirn p. 253.

3. L'image est proposée par (PHARABOD 1987).

de présence de la particule cachée dans la mare. En effet,  $|\Psi(x,t)|^2$  est la densité de probabilité que  $x$  soit effectivement à l'instant  $t$  la position de la particule.

La fonction d'onde  $\Psi$  nous permet d'estimer notre manque d'information<sup>4</sup>. Notons  $\Delta x$ , l'évaluation de la largeur de la zone où la fonction d'onde  $\Psi$  est non nulle. Pour BQM,  $\Delta x$  est une évaluation de l'incertitude sur la position  $x$  de la particule (parfaitement déterminée mais insuffisamment connue) :  $\Delta x$  est due au manque d'information sur la position de la particule, tout comme en mécanique classique.

De ce point de vue, les **inégalités de Heisenberg**<sup>5</sup> sont plutôt pour BQM un « principe » d'incertitude, qui met en jeu les limitations expérimentales de la précision qu'on a sur la trajectoire ( $\Delta x$  sur la position et  $\Delta p_x$  portant sur la vitesse).

### En BQM, l'information manquante se trouve dans les variables « cachées » et la fonction d'onde permet de faire un traitement statistique

La fonction d'onde  $\Psi = R \exp(i\frac{S}{\hbar})$ , où  $R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+$  et  $S \in \mathbb{R}$  donne par conséquent la distribution statistique des positions des particules suivant le postulat d'**équilibre quantique** :

$$\frac{d\mathcal{P}}{d\tau} = \rho = |\Psi|^2 = R^2$$

Ainsi,

on peut interpréter  $\rho(x;t) = |\Psi(x;t)|^2$  comme la distribution spatiale d'un ensemble de trajectoires. Un tel ensemble peut être obtenu par la répétition d'expériences portant sur une unique particule en mesurant, à chaque instant  $t$ , le nombre de particules qu'on a trouvé pour chaque position  $x$ <sup>6</sup>.

Exprimé autrement,  $\Psi$  donne la distribution spatiale d'un ensemble de trajectoires  $\{\vec{r}_k(t)\}$  assez nombreuses :

$$|\Psi(\vec{r};t)|^2 = \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^M \frac{1}{M} \delta(\vec{r} - \vec{r}_k(t)) \quad \text{où } \delta(x \neq 0) = 0 \text{ et } \delta(x = 0) = 1$$

BQM est, de ce point de vue, comparable à une branche de la physique classique,

la mécanique statistique [qui] fait un usage constant de probabilités. Mais les probabilités sont alors associées étroitement à la notion d'ensemble statistique : on suppose par exemple que le système est choisi au hasard parmi un très grand nombre de systèmes similaires définissant un même ensemble. Certes tous ces systèmes partagent un grand nombre de propriétés, mais une description plus précise peut révéler qu'à un niveau plus fin, ils diffèrent aussi par un certain nombre de spécificités, ou par des influences minimales qu'ils ont subies, etc. En d'autres termes chaque système individuel possède plus de propriétés physiques que celles spécifiées par l'ensemble<sup>7</sup>.

Reprenons point après point cette description dans le cas de BQM. L'ensemble statistique qui précède, constitué d'un très grand nombre d'éléments similaires est défini par la fonction d'onde  $\Psi$ . Et chacun des éléments de cet ensemble est la donnée d'une trajectoire, dont la description plus précise est fournie par les positions successives (variables « cachées »), qui diffèrent par des influences minimales qu'ils ont subies.

4. Ainsi, apparaît en BQM un double statut pour la fonction d'onde puisque  $\Psi$  est dans le même temps une entité mathématique qui permet de déterminer l'évolution de la particule (selon l'**équation de guidage** ou bien l'**équation de la dynamique bohmiennne**).

5. Voir annexe D pour aller plus loin sur ce point.

6. ORIOLS et MOMPART 2012, p. 25, ma traduction.

7. LALOË 2011, p. 43.



## Les trajectoires bohmiennes sont soumises à un chaos déterministe du fait de la sensibilité aux conditions initiales

Accéder expérimentalement à *la* trajectoire n'est pas possible du fait que l'état initial est inconnu, ou mal connu. Or ce manque d'information sur les conditions initiales, même minime, peut avoir des effets considérables. C'est ce qui s'appelle la [sensibilité aux conditions initiales](#) (SCI). La SCI est un concept issu de la théorie du chaos qui est poétiquement appelé « effet papillon » par celui qui en a parlé le premier, le scientifique américain Edward Lorenz (1917 - 2008) :

Si un seul battement d'ailes d'un papillon peut avoir pour effet le déclenchement d'une tornade, alors, il en va ainsi également de tous les battements précédents et subséquents de ses ailes, comme de ceux de millions d'autres papillons, pour ne pas mentionner les activités d'innombrables créatures plus puissantes, en particulier de notre propre espèce. Si le battement d'ailes d'un papillon peut déclencher une tornade, il peut aussi l'empêcher. Si le battement d'ailes d'un papillon influe sur la formation d'une tornade, il ne va pas de soi que son battement d'ailes soit l'origine même de cette tornade et donc qu'il ait un quelconque pouvoir sur la création ou non de cette dernière<sup>8</sup>.

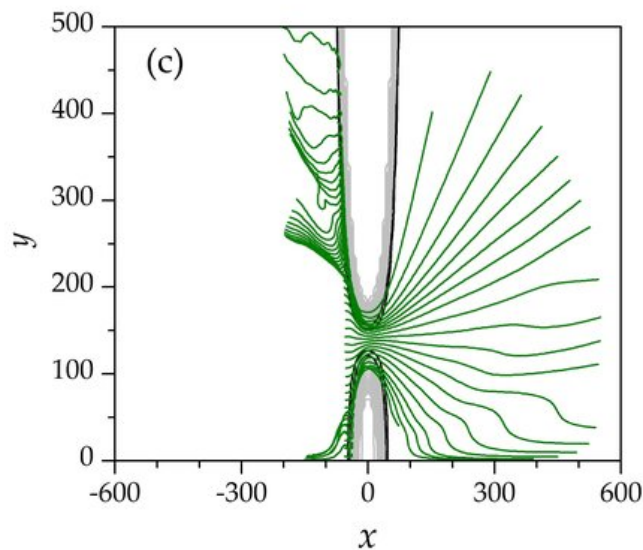


FIGURE 3.1 – Ensemble de trajectoires bohmiennes dans le cas de l'[expérience de Young](#) (SANZ 2018).

La figure 3.1 donne un exemple d'une telle [sensibilité aux conditions initiales](#) : deux trajectoires initialement très proches (dans le trou) divergent (à grande distance du trou). Ainsi en BQM émerge une incertitude prise en compte par une gestion probabiliste du résultat de la mesure, bien décrite par la théorie du chaos déterministe. Grâce à cette théorie et « avec l'introduction du concept [...] de] sensibilité aux conditions initiales on comprend dorénavant en quoi et comment un chaos apparent peut être le reflet d'un ordre sous-jacent, insoupçonné à première vue »<sup>9</sup>.

C'est donc le manque d'information estimé par  $\Psi$  couplé à l'évolution chaotique des particules qui donne le caractère probabiliste de BQM, bien loin de ce qui se passe dans le cas de SQM qui, nous allons le voir maintenant, est lié à un hasard fondamental dû à une indétermination fondamentale.

8. LORENZ 1972.

9. BERGÉ, VIDAL et POMEAU 1997.

### 3.1.2 La probabilité de mesure en SQM due à un hasard fondamental

#### Les grandeurs physiques sont indéterminées en SQM

SQM est non déterministe en ceci qu'une mesure ne révèle pas une valeur pré-existante propre au système. Aussi, SQM utilise le terme « **observable** » pour marquer le fait qu'une mesure ne révèle rien de spécifique à un réel sous-jacent (cf. 3.3.1).

Il en va ainsi pour une mesure de position, mais c'est vrai pour toute mesure. En SQM la particule en tant que telle n'existe pas : selon la **complémentarité** de Bohr, la particule est une des visions à laquelle on peut faire appel (avec celle d'onde) pour se représenter, dans certains cas, le phénomène. Aussi une mesure de position donne un résultat qui n'est pas révélateur de *la* position préalablement possédée par la particule, car la position selon SQM n'est pas déterminée.

Si l'on reprend l'image poétique du poisson quantique, il faut comprendre la fonction d'onde comme ce qui nous permet d'estimer la probabilité de « pêcher » le poisson-onde dans une zone de la mare où on aurait lancé un fil de pêche. Et ce n'est que lorsqu'il mord au bout de la ligne que le poisson prend alors son apparence habituelle, en quelque sorte un poisson-particule.  $|\Psi(x, t)|^2$  est donc la densité de probabilité que la mesure liée à l'observable  $\hat{x}$  donne, à l'instant  $t$ ,  $x$  comme résultat de mesure de la position à la particule.

Comme le précise le philosophe des sciences Bernard d'Espagnat, cela nous impose selon SQM de bien choisir nos mots :

l'expression anglaise pour qualifier le  $|\Psi(x, y, z)|^2$ , « probability to be found » – probabilité d'être trouvée – est, par conséquent, dans la mécanique quantique orthodoxe, la seule acceptable et doit être prise au sens littéral. Cette mécanique ne se soucie pas de nous faire savoir si une particule est à un certain moment ici ou là, ou avec quelle probabilité elle s'y trouve. Contrairement à la physique classique, elle ne postule même pas implicitement que la question possède un sens. [...] Au reste, la conclusion est la même quelle que soit la grandeur physique à laquelle on s'intéresse, qu'elle soit ou non de la nature d'une position <sup>10</sup>.

Si  $\Delta x$  est l'évaluation de la largeur de la zone où la fonction d'onde  $\Psi$  est non nulle, cela signifie pour SQM une mesure de la taille du domaine sur lequel la particule (qui n'a pas de position déterminée) peut être détectée. De même, la mesure de l'**observable** « quantité de mouvement »  $\hat{p}_x$  <sup>11</sup> donnera statistiquement  $\langle p_x \rangle$  à  $\Delta p_x$  près. Selon SQM, ni la position, ni la vitesse (et partant ni la quantité de mouvement) ne sont des propriétés définies du système : elles sont indéterminées. C'est pour cette raison que les **inégalités de Heisenberg** (qui font apparaître  $\Delta x$  et  $\Delta p_x$ ) sont du point de vue de SQM des relations d'indétermination <sup>12</sup>.

#### La fonction d'onde en SQM n'est pas liée au manque d'information

Contrairement à ce qui se passe pour BQM, la fonction d'onde en SQM n'est pas liée au manque d'information, comme le résume le physicien français Franck Laloë, co-auteur du manuel (COHEN-TANNOUJDI, LALOË et DIU 2018) déjà plusieurs fois cité, dans ce qui suit :

on pourrait considérer que la fonction d'onde ne décrit en rien les propriétés physiques intrinsèques du système mais seulement l'information qu'un observateur possède sur lui. Elle devien[drai]t alors l'analogue d'une distribution de probabilité classique en théorie habituelle. [...] Une première difficulté de ce point de vue est qu'il conduirait tout naturellement à l'idée que la fonction d'onde (ou le vecteur d'état)

10. BRICMONT 2001, p. 5.

11.  $p_x$  est la projection de la quantité de mouvement (la masse multipliée par la vitesse pour une particule non relativiste) suivant l'axe  $x$  orienté.

12. Au sujet des noms utilisés pour qualifier les **inégalités de Heisenberg**, voir (LÉVY-LEBLOND et F. BALIBAR 1998).

possède un caractère relatif [à] l'observateur et [à] l'information dont il dispose. [...] On peut même imaginer un observateur parfaitement informé pour lequel toutes les grandeurs ont une distribution infiniment étroite [ $\Delta x = 0$  et  $\Delta p_x = 0$  en particulier...]. Cependant, la possibilité d'une description de toutes les grandeurs avec une précision arbitraire est rejetée par [SQM... En SQM], il est essentiel de garder à l'esprit que la fonction d'onde (ou le vecteur d'état) donne LA [c'est l'auteur qui souligne] description ultime du système avec toutes ses propriétés physiques; elle n'est ni contextuelle, ni dépendante de l'observateur; si elle donne des prédictions probabilistes sur les résultats de mesures futures, elle reste ainsi totalement différente d'une distribution de probabilité classique<sup>13</sup>.

Pour dire les choses autrement, l'indétermination fondamentale en SQM et la complétude de la description par la fonction d'onde sont l'avvers et le revers d'une même médaille. Aussi, le hasard fondamental qui apparaît dans une mesure selon SQM est indissociable du rejet par cette théorie de toute « variable cachée » qui viendrait compléter la description du système.

### **Le hasard est intrinsèque en SQM lors de la mesure et la fonction d'onde permet de faire un traitement statistique**

En SQM le résultat obtenu lors d'une mesure est soumis à un hasard intrinsèque (selon l'expression d'Einstein, qui ne pouvait s'y résoudre, « Dieu joue aux dés »). Revenons justement à l'image du lancer de dé. Selon SQM, ce dernier serait pour ainsi dire « à la fois dans les six faces » tant qu'on ne l'observe pas immobilisé sur l'une d'entre elles. SQM dirait qu'il se trouve dans une **superposition** équiprobable des six faces, c'est-à-dire dans une situation indéterminée. Le processus de mesure (regarder le dé immobilisé dans le cas précédent) donnera selon SQM un résultat aléatoire dont la probabilité est fixée par  $\Psi$ <sup>14</sup>.

Ainsi, le physicien français (élève de de Broglie) Jean-Pierre Vigièr (1920-2004) a pu dire que le monde selon SQM était une « immense roulette inanalysable »<sup>15</sup>. Dit autrement, « dans cette théorie, l'aléatoire qui intervient lors d'une mesure est de caractère véritablement absolu; il est vain de chercher les causes de tel ou tel résultat, car elles n'existent pas »<sup>16</sup>.

En SQM, les résultats de mesures successives seront aléatoires. On pourra en faire un traitement statistique en utilisant les outils statistiques associées à des variables aléatoires. Par exemple pour un système ayant la fonction d'onde  $\Psi$ , des mesures consécutives de l'**observable** position  $\hat{x}$  donneraient des résultats  $\{x_k\}$  de façon aléatoire (avec une probabilité fixée par  $|\Psi|^2$ ). Si ces mesures sont assez nombreuses, on pourra s'intéresser à la moyenne  $\langle x \rangle$  et à l'écart quadratique moyen qui donne accès à  $\Delta x$ .

### **3.1.3 Le traitement statistique des mesures pour SQM et BQM**

#### **Les probabilités de mesure bien qu'elles n'aient pas le même sens pour SQM et BQM sont numériquement identiques**

Il s'agit de donc de bien discerner les raisons différentes pour lesquelles émerge le traitement probabilistique de la mesure. Les probabilités sont liées à un traitement statistique dû au manque de connaissance en BQM. Ce manque de connaissance est celui relatif aux variables cachées (les positions), qui, si elle étaient connues, donneraient la trajectoire effective parmi celles possibles pour une fonction d'onde  $\Psi$  donnée. Alors que dans le cas de SQM, ces probabilités de mesure sont intrinsèquement dues à un aléa qui est

13. LALOË 2011, pp. 36-37.

14. Selon la **règle de Born**.

15. BESSON 2012, Vigièr dans Körner cité p. 46.

16. LALOË 2011, p. 37.

principliel dans cette théorie. La complétude de la description de l'état du système par  $\Psi$  – interdisant toute variable cachée – est liée à une indétermination des grandeurs.

Quelle que soit l'interprétation que donne l'une ou l'autre de ces théories aux probabilités de mesure, BQM et SQM partagent – pour une même situation – la même fonction d'onde  $\Psi$ . Or  $\Psi$  apparaît, comme on l'a déjà noté, en quelque sorte comme un répertoire de possibles, avec une probabilité pour chacun de ces possibles.  $\Psi$  donne ainsi accès, aussi bien pour SQM que BQM, à la probabilité (la même pour BQM et SQM donc) de trouver un résultat à une mesure dans un contexte donné<sup>17</sup>. Notons donc que la prédiction d'une mesure est relative à la façon dont le système (un électron par exemple) auquel on s'intéresse est « préparé »<sup>18</sup>.

### Le traitement statistique d'un mesurage répété donne donc la même mesure moyenne et le même écart type dans les cas SQM et BQM

En réitérant la même mesure sur le système préparé de la même façon (caractérisé par la même fonction d'onde  $\Psi$ ), on peut obtenir un résultat différent. En ceci, la répétition d'expériences pour accéder à une grandeur  $\mathcal{A}$  donne un ensemble de  $N_M$  mesures  $\{\mathcal{A}_m\}_{m \in [1;N_M]}$  qui, particulièrement si  $N_M \gg 1$ , permet une étude statistique des résultats qui aboutit à la valeur mesurée

$$\mathcal{A}_{\text{mesurée}} = \langle \mathcal{A} \rangle \pm \frac{\Delta \mathcal{A}}{2}$$

où l'on définit la moyenne de cette mesure, notée  $\langle \mathcal{A} \rangle$  :

$$\langle \mathcal{A} \rangle = \lim_{N_M \rightarrow \infty} \frac{1}{N_M} \sum_{m=1}^{N_M} \mathcal{A}_m$$

et son écart quadratique moyen :

$$\Delta \mathcal{A} = \sqrt{\langle (\mathcal{A} - \langle \mathcal{A} \rangle)^2 \rangle} = \sqrt{\langle \mathcal{A}^2 \rangle - \langle \mathcal{A} \rangle^2}$$

BQM et SQM donnent donc accès à la même prédiction de valeur mesurée  $\langle \mathcal{A} \rangle$  avec le même écart quadratique moyen  $\Delta \mathcal{A}$ .

## 3.2 Que se passe-t-il lors du processus de mesure ?

### 3.2.1 La modélisation du processus de mesure

Pour commencer, nous allons présenter ce qui est commun à SQM et BQM dans le cadre de la théorie de la mesure présentée initialement par le scientifique hongrois (puis américain) von Neumann (1903-1957)<sup>19</sup> et reprise par Bohm lui-même<sup>20</sup>.

17. Le problème de la « contextualité » sera abordé plus loin.

18. Pour SQM, c'est  $\Psi$  qui détermine ce qui pourrait être l'« état » quantique du système.

19. NEUMANN 1932, chap. 4-6.

20. David BOHM 1952, sous partie "QUANTUM THEORY OF MEASUREMENTS", pp. 180-182.

## Imaginons que l'on effectue la mesure d'une grandeur sur un système microscopique dont on connaît la fonction d'onde

On s'intéresse au cas de la mesure de  $\mathcal{A}$  (associée à l'observable  $\hat{A}$ ) qu'on effectue sur un système (microscopique)  $S$  qui a pour fonction d'onde  $\phi_S(x)$  (pour simplifier on supposera qu'elle ne dépend que d'une coordonnée notée  $x$ ). On peut décomposer<sup>21</sup>  $\phi_S(x)$  sur une base de vecteurs propres  $\{\alpha_n\}_{n \in [1;N]}$  associés aux valeurs propres  $\{a_n\}_{n \in [1;N]}$  de  $\hat{A}$  de telle sorte que :

$$\phi_S(x) = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n(x)$$

Cette dernière relation n'est qu'une façon d'écrire la [superposition](#) de la fonction d'onde  $\phi_S$  de façon adaptée à notre propos. Les coefficients  $c_n$  jouent, comme on le verra, un rôle crucial car ils donnent accès (avec la [règle de Born](#)) aux probabilités de trouver le résultat  $a_n$  à la mesure.

## Lors du mesurage le système microscopique étudié interagit avec un appareil de mesure macroscopique dont on modélise le résultat par la position indiquée par une aiguille

Le mesurage demande une interaction entre le système  $S$  et l'appareil de mesure (qu'on notera  $M$ ). L'état de ce dernier va, lors du processus de mesure, évoluer jusqu'à indiquer un résultat. Pour se représenter les choses, on peut imaginer que ce résultat est indiqué grâce à une aiguille qui se déplace sur un cadran. Bien sûr, les appareils de mesure modernes sont à affichage digital, sans cadran à aiguille. Mais cela revient au même<sup>22</sup>. Dit autrement, on est ramené, aussi bien pour SQM que pour BQM, à une mesure de position indiquée par un appareil de mesure, comme le note Louis [de Broglie](#) :

La mesure de la position d'un corpuscule joue en Microphysique un rôle particulier : elle se réduit, en effet, à la constatation de la présence d'un corpuscule en une petite région de l'espace. Évidemment le corpuscule n'est pas directement observable, mais sa présence peut être décelée par l'observation d'un phénomène macroscopique localisé dont il provoque le déclenchement. L'analyse de l'observation des localisations corpusculaires dans les plaques photographiques, les chambres de Wilson, etc... montre bien qu'il en est toujours ainsi. [...] Plaçons-nous [maintenant] dans le cas où l'on veut mesurer une grandeur (autre que la position) d'un corpuscule [...] On devra alors employer un dispositif macroscopique dont l'effet sera finalement de séparer dans l'espace des trains d'ondes correspondant à une valeur donnée de la grandeur à mesurer. En localisant ensuite le corpuscule dans l'une de ces régions séparées, on pourra attribuer à la grandeur considérée une valeur bien déterminée après l'action du dispositif de mesure. Ainsi la mesure résultera comme toujours d'une localisation de corpuscule<sup>23</sup>.

Acceptons donc que la mesure de  $\mathcal{A}$  revient à la mesure de la position  $Y$  d'un « pointeur » (celle indiquée le long d'un cadran par une aiguille par exemple).

21. Pour simplifier (et ne pas trop alourdir les notations), on a fait sans le dire un certain nombre de suppositions. D'abord, on a considéré une superposition discrète mais elle pourrait être continue. Ensuite, on s'est placé dans le cas où les valeurs  $a_n$  étaient non dégénérées. Enfin notons qu'il vaut mieux prendre des vecteurs propres  $\alpha_n$  normés pour pouvoir appliquer simplement la règle de Born. Mais tout cela ne change rien au propos.

22. « In modern electronic measuring devices, the pointer could be represented by a [...] light-emitting diode (LED) [...] with two possible states, ON and OFF. When electrons are present inside the PN interface of one of the LEDs, a radiative transition of the electrons from the conduction to the valence band produces light corresponding to the ON state. The absence of electrons is associated with an OFF state » (ORIOLS et MOMPART 2012).

23. L. d. BROGLIE 1959, p. 973.

**La théorie de von Neumann de la mesure revient à traiter de façon quantique l'appareil de mesure macroscopique**

On sait d'expérience (c'est ce que l'on constate) que l'appareil de mesure va indiquer, *via* le pointeur, une position  $Y$ , unique (plus exactement avec une dispersion très faible), car cet appareil est macroscopique (il doit se comporter de façon classique). Malgré tout, nous allons le traiter de façon quantique<sup>24</sup>. Notons donc  $\phi_M$ , la fonction d'onde associée à l'appareil de mesure et, pour raisonner, supposons que  $\phi_M(y,t)$  ne dépend que d'une coordonnée d'espace notée  $y$ , sur laquelle on trouve la position du pointeur  $Y$ , et de la date  $t$ . Pour prendre en compte la dispersion  $\Delta y$  très faible de la mesure, on fait appel à un paquet d'ondes  $\beta(y)$ , très resserré autour de 0, c'est-à-dire maximal en  $y = 0$  et quasi nul dès que  $|y| > \Delta y$ .

**Du fait de l'interaction entre le système mesuré et l'appareil de mesure, la fonction d'onde du système intriqué se retrouve dans une superposition de paquets d'ondes qui ne se chevauchent plus**

Du fait de l'interaction entre système mesuré et appareil de mesure, les états quantiques de ces deux systèmes vont être corrélés. On dit qu'il y a **intrication**. Il nous faut alors considérer le grand système quantique (qu'on suppose isolé) constitué par le système et l'appareil de mesure, grand système auquel on associera la fonction d'onde  $\Psi(x,y,t)$ .

L'évolution de  $\Psi$  suit l'**équation de Schrödinger**, qui prend en compte l'interaction entre  $M$  et  $S$ <sup>25</sup>.

Au bout d'un temps  $\tau$  suffisamment long (qui peut être très court à l'échelle humaine), la fonction d'onde  $\Psi$  peut s'écrire :

$$\Psi(x,y,t \gg \tau) = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n(x) \beta(y - y_n)$$

où chacune des positions possibles  $y_n$  du pointeur est proportionnelle à la valeur  $a_n$  :  $y_n = k a_n$ . Après interaction de l'appareil de mesure avec le système étudié, les valeurs finales possibles de l'indicateur  $y_n$  sont donc parfaitement corrélées avec les valeurs propres  $a_n$  de l'opérateur  $\hat{A}$  associé à la grandeur physique  $\mathcal{A}$  mesurée. Ainsi, « l'appareil de mesure agit sur le système comme un analyseur de spectre décomposant la fonction d'onde en plusieurs [paquets] d'ondes »<sup>26</sup>.

Cependant, à ce stade, aucun résultat spécifique n'a été obtenu puisqu'il y a **superposition** de paquets d'ondes, comme si l'indicateur marquait en même temps tous les résultats  $y_n$  relatifs aux valeurs  $a_n$  possibles (cf. figure 3.2) suivant des probabilités  $|c_n|^2$  données par la **règle de Born**.

24. Conformément à la théorie de la mesure présentée initialement par **von Neumann** (NEUMANN 1932, chap. 4-6) et reprise par **Bohm** lui-même (David BOHM 1952, sous partie "QUANTUM THEORY OF MEASUREMENTS", pp. 180-182), comme déjà dit. Ce qui suit ne se rapporte qu'à la vision de la mesure par **von Neumann**. Ce n'est pas conforme à la vision de **Bohr** selon lequel un appareil de mesure obéit à la physique classique : on ne peut lui attribuer une fonction d'onde.

25. L'hamiltonien d'interaction peut s'écrire :

$$H_I = \gamma A p_y \Rightarrow \hat{H}_I \Psi = \frac{i\gamma \hat{A}}{\hbar} \frac{\partial \Psi}{\partial y}$$

où  $\gamma$  est une constante (de couplage) and  $p_y$  est la quantité de mouvement du pointeur projetée suivant  $y$ .

26. BESSON 2018, p. 53.

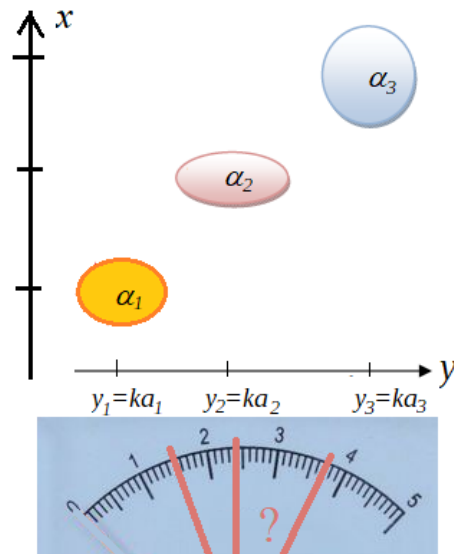


FIGURE 3.2 – Illustration de l'intrication (en SQM aussi bien qu'en BQM) entre le système mesuré de fonction d'onde  $\phi_S = \sum_{n=1}^3 c_n \alpha_n$  et l'appareil de mesure de fonction d'onde  $\phi_M(y, t \gg \tau)$ . On a pris  $N = 3$  valeurs propres possibles pour raisonner.

**Comme l'appareil de mesure est classique, sa fonction d'onde ne peut pas se trouver dans cette superposition, puisque l'aiguille indique un unique résultat**

Cette combinaison linéaire (cf. [superposition](#)) finale est une caractéristique de l'[intrication](#) quantique due à la linéarité de l'[équation de Schrödinger](#).

La linéarité de l'équation de Schrödinger la rend incapable d'effectuer une sélection entre ces résultats ; elle ne peut conduire qu'à une superposition de tous les résultats, comme si aucun résultat bien défini n'avait émergé de la mesure !

Pour résoudre ce problème, on pourrait alors être tenté d'ajouter un « second étage » au processus, et d'introduire un second appareil de mesure  $M'$  dont le rôle sera de déterminer la position du pointeur de  $M$ . Mais le processus se répète et la linéarité de l'équation de Schrödinger conduit à une superposition plus étrange encore puisque, cette fois, elle contient  $S + M + M'$  ainsi que des positions différentes des pointeurs de  $M$  et  $M'$ . Par récurrence, si l'on ajoute de plus en plus d'appareils de mesure,  $M''$  etc., on crée une chaîne de plus en plus longue de systèmes corrélés, sans jamais arriver à sélectionner un seul résultat de mesure. Ce processus récurrent  $M, M', M'', \dots$  est appelé régression de [von Neumann](#), ou encore chaîne infinie de [von Neumann](#).

On peut résumer toute cette discussion par une seule phrase : « L'unicité des résultats ne peut pas émerger de la seule équation de Schrödinger ; elle crée en effet une chaîne de superpositions cohérentes qui se propage sans fin »<sup>27</sup>.

Or l'appareil est un système macroscopique : on constate qu'il indique un unique résultat  $Y$ . Il faut mettre un terme à la chaîne infinie de [von Neumann](#). Nous allons voir comment la suite du processus est compris – de façon très différente – en SQM et en BQM.

27. LALOË 2011, pp. 43-44.

### 3.2.2 La mesure SQM, fondée sur l’effondrement du paquet d’ondes

#### L’effondrement du paquet d’ondes pour le système étudié mène à l’unicité de l’indication de l’appareil de mesure

Selon SQM, la donnée de la fonction d’onde avant la mesure apparaît comme une « **superposition** de paquets d’ondes », c’est à dire un catalogue de résultats possibles pour la mesure qui va s’opérer (pour l’observable  $\hat{A}$ ), avec pour chacune des valeurs possibles (les valeurs propres  $a_n$  de l’observable) sa probabilité  $|c_n|^2$  donnée par la **règle de Born**).

Lorsque la mesure est réalisée, la fonction d’onde  $\phi_S$  du système se réduit alors un un seul terme (un « vecteur propre »  $\alpha_j$  de l’observable). Dans les manuels, le passage aléatoire de la **superposition** à un seul terme s’appelle « **effondrement du paquet d’ondes** ». Il est possible de formaliser ce qui se passe donc lors de la mesure la transformation par :

$$\Psi = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n \beta (y - y_n) \quad \rightarrow \quad \Psi = \alpha_j \beta (y - y_j)$$

(où  $j \in [1;N]$ ). Aussi, l’appareil de mesure est-il dans l’état  $\beta (y - y_j)$  : il pointe sur l’indication  $Y \approx y_j$  (cf. figure 3.3). L’interprétation est la suivante : la mesure a donné  $a_j$ , une valeur propre de  $\hat{A}$ .

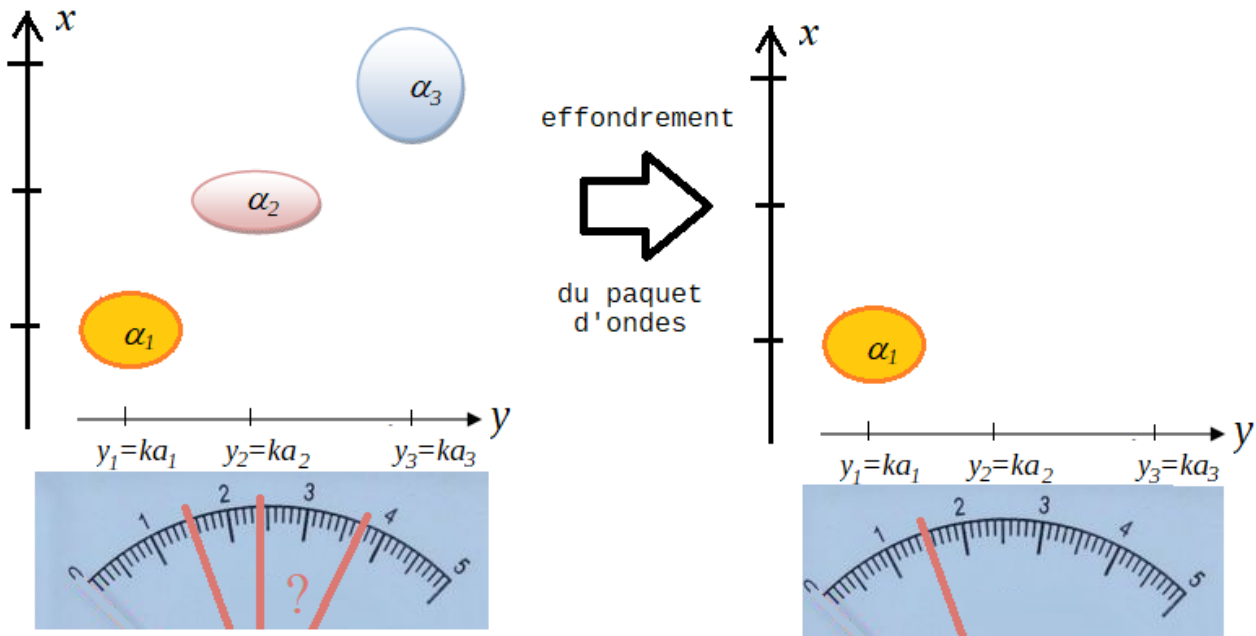


FIGURE 3.3 – Illustration de l’effondrement du paquet d’ondes pour SQM dans le cas où

$$\Psi = \sum_{n=1}^3 c_n \alpha_n \beta (y - y_n) \quad \rightarrow \quad \Psi = \alpha_1 \beta (y - y_1).$$

Dans cet exemple, on a pris  $N = 3$  et on a choisi  $j = 1$  parmi  $\{1, 2, 3\}$ .

Le problème de la mesure est donc réglé de façon *ad hoc* par SQM grâce à un de ses axiomes qui postule l’**effondrement du paquet d’ondes** : il existe un statut spécifique de la mesure prévu par les axiomes de



SQM<sup>28</sup>. Analysons les conséquences de ce processus d'**effondrement du paquet d'ondes** lors de la mesure en SQM.

### **La fonction d'onde, catalogue de potentialités, « s'actualise » du fait de l'effondrement du paquet d'onde, et ne subsiste qu'une unique possibilité**

Pour illustrer cette réduction du paquet d'ondes, on peut en particulier s'intéresser à la détection de la particule, comme le propose Louis de Broglie quand il explique l'**effondrement du paquet d'ondes** :

[SQM] admet [...] que, si l'état de nos connaissances sur un corpuscule est représenté par un [paquet d'ondes] étendu, le corpuscule est présent dans tous les points de ce [paquet d'ondes...] cette présence pourrait être qualifiée de « potentielle » et c'est seulement au moment où nous constatons la présence du corpuscule en un point du [paquet d'ondes] par une observation, que cette potentialité s'actualise pour employer un langage de philosophes<sup>29</sup>.

La fonction d'onde du système, avant l'**effondrement du paquet d'ondes**, était en quelque sorte un catalogue de potentialités  $\{\alpha_n\}_{n \in [1;N]}$ , avec leurs probabilités. Après l'**effondrement du paquet d'ondes**, la fonction d'onde s'est « actualisée » en une unique possibilité ( $\alpha_j$ ) qui est maintenant certaine (son coefficient vaut 1) : aussitôt qu'a lieu la « réduction de la fonction d'ondes par l'observation [...] » (par exemple l'apparition d'un électron en un lieu déterminé), toute la fonction d'ondes devient sans valeur – elle s'évanouit pour ainsi dire »<sup>30</sup>.

### **L'effondrement du paquet d'onde est une rupture dans l'évolution de la fonction d'onde, aléatoire, non déterministe et brutale**

Il y a rupture dans l'évolution de la fonction d'onde. Avant la mesure, lorsque le système microscopique est seul, sa fonction d'onde obéit à l'**équation de Schrödinger**; l'évolution est déterministe, régulière et continue. Mais lors de la mesure, au contact de l'appareil de mesure, il y a **effondrement du paquet d'ondes**; le processus est aléatoire, non déterministe et brutal.

La fonction d'onde voit donc la nature de son évolution changer et ce sont deux axiomes différents qui définissent ces deux types d'évolution<sup>31</sup>.

### **Le processus d'effondrement du paquet d'onde repose sur l'articulation entre quantique et classique**

L'appareil de mesure joue un rôle spécifique dans la théorie SQM de la mesure : puisque l'appareil de mesure *M est* macroscopique et donc qu'il *doit* se comporter de façon classique, le postulat d'**effondrement du paquet d'ondes** est sollicité. Aussi, le processus de mesure fait appel aux paires de notions complémentaires classique / quantique et macroscopique / microscopique. On voit que SQM s'adosse en quelque sorte à la physique classique.

28. (LE BELLAC 2010, p. 188) fait remarquer que, contrairement à une opinion largement répandue, la réduction du paquet d'ondes ne fait pas partie de la vision de Bohr (Bohr ne critique pas la règle pratique, mais il la réduit à une règle pratique, il n'ontologise rien derrière, il n'y a pas pour lui un état physique superposé qui se réduit), mais est présentée dans la quasi-totalité des manuels de physique quantique, à l'exception notable de celui de Leslie Ballentine et de celui d'Asher Peres.

29. L. d. BROGLIE 1959, p. 953.

30. Max BORN 1959, p. 50.

31. La réduction du paquet d'onde porte sur la fonction d'onde  $\Psi$  qui est un catalogue de possibilités se réduisant à une unique possibilité. En ceci, cet **effondrement du paquet d'ondes** est purement « instrumentaliste ». Cependant, certains manuels font porter cet **effondrement du paquet d'ondes** sur l'état du système (représenté par  $\Psi$ ), Ce faisant ils « ontologisent » ce processus.

## Le processus d'effondrement du paquet d'onde implique l'intervention d'un observateur

De plus, ce qui provoque le passage d'un type d'évolution à l'autre, d'un postulat à un autre, c'est donc la mesure. Or ce processus fait référence de façon implicite à l'homme (sans lequel il n'y aurait pas d'expérience). En physique classique, nous pouvons toujours diviser le monde entre observateur et observé puisque l'interaction entre les deux peut être infiniment petite ou maîtrisée par les mesures. En SQM, ce n'est plus vrai du fait des [inégalités de Heisenberg](#). La mesure SQM se caractérise donc par une « non détachabilité de l'observateur ».

### 3.2.3 La mesure BQM, fondée sur les paquets d'ondes vides

#### La fonction d'onde est selon BQM une superposition de paquets d'ondes, tous vides sauf un

Pour BQM, à toute date la position  $Y$  du pointeur de l'appareil de mesure est déterminée, comme toute position. Il existe donc un  $j \in [0;N]$  tel que  $|\beta_j(y = Y, t_f)|^2 \neq 0$ . Au terme de la mesure, l'indicateur se trouvera donc dans une position  $Y$  compatible avec un seul des vecteurs propre  $\beta_j : Y \approx y_j$ . Ainsi, tous les paquets d'ondes  $\beta_n$  seront vides (pour  $n \neq j$ ), sauf un ( $\beta_j$ ), le paquet d'onde qui contient la trajectoire associée au pointeur dans l'appareil de mesure (cf. figure 3.4).

C'est David [Bohm](#) le premier qui développa en 1952 une explicitation du processus de mesure dans le cadre de BQM. Avec nos notations, le texte de [Bohm](#)<sup>32</sup> donne :

Parce que la densité de probabilité est égale à  $|\Psi|^2$ , nous en déduisons que la variable d'appareil  $y$  doit finalement être dans l'un des paquets ( $\beta(y - y_n)$ ) et y rester par la suite (puisque la densité de probabilité est pratiquement nulle dans l'espace intermédiaire entre les paquets). La variable  $y$  détermine le résultat de la mesure, que l'observateur obtiendra en regardant l'appareil. Les autres paquets d'ondes peuvent [...] être ignorés [...]. De plus la fonction d'onde peut être renormalisée [...] Ainsi, à toutes fins utiles, on peut remplacer la fonction d'onde complète

$$\sum_{n=1}^N c_n \alpha_n \beta(y - y_n)$$

par une nouvelle fonction d'onde renormalisée<sup>33</sup>

$$\alpha_j \beta(y - y_j)$$

En BQM, il y a une seule position du système. On ne la connaissait pas avant la mesure : elle pouvait être l'un ou l'autre des paquets d'ondes. Lors de la mesure, on a déterminé cette position. De fait, le manque d'information sur le système a diminué : on a appris que tous les paquets d'ondes (sauf un) étaient des « ondes vides ». « On ne réduit pas la fonction d'onde, mais toutes les autres branches ne jouent aucun rôle. Les autres existent toujours, mais on les laisse en quelque sorte dans les limbes à l'état virtuel<sup>34</sup> ; elles n'ont plus aucun rôle »<sup>35</sup>.

32. David BOHM 1952, p. 182, ma traduction.

33. Ce processus de renormalisation ( $c_j = |c_j| \exp(i\theta) \rightarrow c'_j = 1$ ) ne pose pas de problème car il ne joue pas sur l'équation de guidage (car  $S \rightarrow S' = S - \hbar\theta \Rightarrow \overrightarrow{grad}(S) = \overrightarrow{grad}(S')$  reste inchangé) ni sur l'équation de la dynamique bohmienne (car  $R \rightarrow R' = \frac{R}{|c_j|} \Rightarrow Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R')}{R'}$  reste inchangé).

34. En ceci, un rapprochement est possible entre BQM et la théorie d'Everett. Voir à ce sujet (J. S. BELL 1976).

35. LALOË 2014, p. 237.

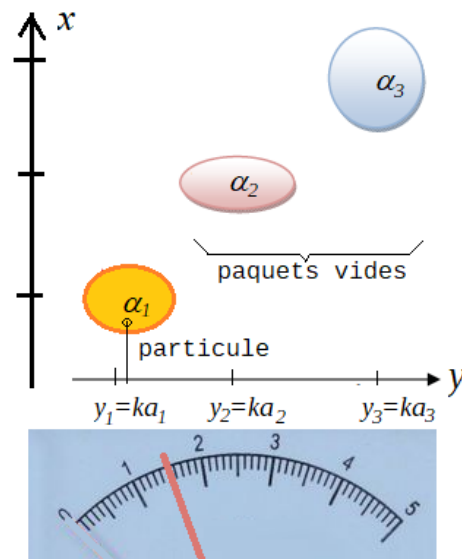


FIGURE 3.4 – Illustration des paquets d’ondes vides pour BQM dans le cas où

$$\Psi = \sum_{n=1}^3 c_n \alpha_n \beta (y - y_n) \quad \text{peut être remplacé par} \quad \Psi = \alpha_1 \beta (y - y_1).$$

Dans cet exemple, on a pris  $N = 3$  et on a choisi  $j = 1$  parmi  $\{1, 2, 3\}$ .

Ainsi, et bien que le vecteur d’état du système global soit toujours donné par tous les termes, le système est à toutes fins pratiques décrit par un seul de ceux-ci (celui qui correspond à la position de l’indicateur). On peut oublier tous ces paquets vides.

### **Pour BQM, l’évolution du pointeur de l’appareil de mesure, comme pour une quelconque particule, est le fait du guidage par la fonction d’onde**

Puisque l’appareil de mesure est dans l’état  $\beta (y - y_j)$ , il pointe sur l’indication  $Y \approx y_j$ . L’interprétation est la suivante : la mesure a donné  $a_j$ , une valeur propre de  $\hat{A}$ . On a donc aussi montré que le processus de mesure, du point de vue de BQM, faisait en sorte que l’appareil de mesure indique la valeur propre associée à ce vecteur propre. Pour BQM (comme pour SQM), une mesure revient à observer une position, par exemple celle de l’aiguille de l’appareil de mesure. Or BQM traite l’évolution de la position du pointeur de l’appareil de mesure, comme toute autre trajectoire, selon l’équation de guidage. De fait, la mesure ne présente pas de spécificité dans les axiomes de BQM. D’ailleurs [Bohm](#) présente le processus de mesure, c’est-à-dire l’interaction entre le système microscopique et l’appareil de mesure, de façon analogue à l’interaction entre deux particules<sup>36</sup>. L’évolution de la fonction d’onde continue à se faire selon l’équation de Schrödinger tout au long du processus de mesure.

### **La mesure BQM est conforme à celle donnée par SQM**

Aussi, le processus de mesure transforme continument et irrémédiablement son pointeur en une valeur  $Y$  qui pointe sur une valeur propre  $a_j$  de  $\hat{A}$  : dans le cadre de BQM le processus de mesure aboutit *de*

36. Lors du traitement de la mesure BQM, [Bohm](#) évoque d’ailleurs « a similar problem involving the interaction of two particles in a scattering process » (David BOHM 1952, p. 181).

*facto* à une simplification de la fonction d'onde (cette dernière étant la même que celle obtenue lors de l'effondrement de la fonction d'onde en SQM).

Puisque l'appareil de mesure est dans l'état  $\beta(y - y_j)$ , il pointe sur l'indication  $Y \approx y_j$ . L'interprétation est la suivante : la mesure a donné  $a_j$ , une valeur propre de  $\hat{A}$ . On a donc aussi montré que le processus de mesure, du point de vue de BQM, faisait en sorte que l'appareil de mesure indique la valeur propre associée à ce vecteur propre. Ceci s'explique par l'évolution, selon l'équation de guidage, de la position du pointeur de l'appareil de mesure, définie dans BQM, comme toute trajectoire : une mesure revient à observer une position, par exemple celle de l'aiguille de l'appareil de mesure. Malgré une telle dissymétrie entre les deux visions, BQM et SQM aboutissent au même résultat.

### **La mesure selon BQM s'effectue sans rupture, de façon déterministe et sans intervention de l'observateur**

Certes, BQM aboutit aux mêmes prédictions que SQM (à la fin, le vecteur d'onde est un vecteur propre de l'observable), mais de façon continue (selon l'équation de Schrödinger). Cela se produit du fait de l'environnement que constitue l'appareil de mesure. Si le processus de mesure en SQM est marqué par une discontinuité dans l'évolution de la fonction d'onde – discontinuité décrétée axiomatiquement – il n'en est pas de même en BQM. BQM ne nécessite aucun principe spécifique au processus de mesure, contrairement à SQM.

Notons que la mesure pour BQM est concevable sans observateur (c'est un processus détachable de l'homme et de la conscience). En effet, les paquets d'ondes sont tous vides sauf un, que l'observateur ait mis ou non un appareil de mesure  $M$  pour savoir dans quel état est le système  $S$ . On peut se passer de la mention de l'observateur dans les scénarios descriptifs de la mesure.

## **3.3 Quelques propriétés quantiques de la mesure**

### **3.3.1 Qu'est-ce que la « contextualité » de la mesure ?**

#### **La mesure classique revient au « prélèvement » d'une propriété intrinsèque à un objet réel**

Dans le monde classique qui correspond à notre expérience quotidienne, les expériences que nous pouvons faire sur des objets (comme mesurer une masse, une longueur. . .) donnent les mêmes résultats quel que soit en particulier l'ordre que l'on a choisi pour réaliser ces mesures (par exemple en déterminant d'abord la masse puis la longueur ou bien en faisant préalablement la mesure de la longueur et ensuite celle de la masse). Dit autrement, les réponses obtenues aux questions que l'on se pose sur les objets classiques ne dépendent ni du nombre de questions, ni de leur ordre et quand les questions sont répétées, les réponses sont toujours identiques.

Aussi, inconsciemment, nous sommes conduits à nous dire qu'il y a quelque chose de caractéristique à l'objet étudié, qui lui est propre (on dit alors qu'on a mesuré *la* masse de l'objet, *sa* longueur. . .). Tout se passe comme si l'expérience revenait en quelque sorte à « prélever » (grâce aux instruments de mesure) des propriétés intrinsèques aux objets. Un glissement s'effectue, « on passe de la phénoménologie à l'ontologie de façon complètement inconsciente. Ainsi se construit l'intuition que les propriétés sont des "états" qui appartiennent aux objets »<sup>37</sup>. Selon cette vision, nous dit le physicien belge Jean Bricmont,

37. AUFFÈVES 2016.

la « mesure » signifie réellement une mesure, c'est-à-dire que les expériences révèlent plutôt qu'elles ne créent les propriétés existantes du système. Suivant cette conception, les particules ont des propriétés telles que la position, le moment, le moment angulaire et, quand nous mesurons une observable  $\hat{A}$ , nous découvrons simplement la valeur que le système a assigné à cette observable indépendamment de toute mesure<sup>38</sup>.

Cette intuition que l'on a forgé du fait de notre expérience quotidienne dans le cadre de la physique classique doit être déconstruite lorsque l'on s'intéresse au monde microscopique.

**La contextualité se caractérise par le fait qu'une mesure effectuée sur un système ne révèle pas une valeur préexistante d'une propriété du système mais dépend essentiellement de la façon dont est conduite l'expérience (du contexte)**

Pour comprendre cette contextualité, considérons un polariseur (il s'agit d'un appareil d'optique que l'on trouve au laboratoire). On positionne ce polariseur en  $z = 0$  le long de l'axe  $Oz$  de propagation de la lumière. Le polariseur a un axe  $\Delta$  dans le plan  $xOy$  qui le caractérise. On envoie maintenant de la lumière à travers ce polariseur. Plus exactement, on imagine qu'on dispose d'une source de lumière qui envoie un photon après l'autre. Avec le polariseur, deux possibilités se présentent : soit le photon n'est pas transmis, soit il est transmis, mais alors sa polarisation est devenue  $\Delta$  et il ne sera pas transmis à travers un second polariseur d'axe orthogonal à  $\Delta$ . Une interprétation classique de la transmission du photon après le polariseur serait que le photon *est* de polarisation  $\Delta$  alors que, s'il n'est pas transmis, on pourra dire qu'il *n'est pas* de polarisation  $\Delta$ .

La figure 3.5, qui récapitule les résultats de mesure possibles quand on intervertit les deux polariseurs, montre clairement que la réponse aux questions (notées «  $v?$  » et «  $h?$  ») dépend de l'ordre dans lequel on a posé ces deux questions<sup>39</sup>. Par conséquent, on ne peut pas associer de propriété intrinsèque («  $v$  » ou « non- $v$  » par exemple) à l'objet. Si l'on associe cela à des propriétés classiques, on voit bien que cela heurte l'intuition et que la mesure présentée ne révèle pas une valeur préexistante d'une propriété du système.

SQM explique cette **contextualité** par le fait qu'une première mesure affecte les possibilités de mesures ultérieures. Prenons comme deuxième exemple les mesures de position et de vitesse<sup>40</sup>. Les résultats des mesures de la position et de la vitesse d'un objet microscopique dépendront du protocole expérimental, en particulier de l'ordre choisi pour ces mesures, comme le montre l'expérience de pensée du « microscope de Heisenberg » expliquée par Bohr :

**Heisenberg** se base, à ce propos, sur la considération suivante. D'une part on peut, au moyen d'un instrument d'optique, par exemple, mesurer avec toute la précision désirée la situation d'une particule, à condition d'employer pour la formation d'images un rayonnement de longueur d'onde suffisamment petite. Mais, d'après la théorie des quanta, la diffusion du rayonnement par l'objet est toujours liée à un changement fini de quantité de mouvement, et ce changement est d'autant plus grand que les ondes sont plus courtes. D'autre part, l'impulsion subie par une particule peut être mesurée avec toute la précision désirée, par exemple en mesurant sa vitesse par l'effet Doppler du rayonnement diffusé, à condition que la lumière employée ait une longueur d'onde si grande que le recul puisse être négligé ; mais alors la précision dans la détermination du lieu diminue en conséquence<sup>41</sup>.

38. BRICMONT 2007, p. 16.

39. La contextualité a un sens plus large encore que ce qui est présenté ici à titre d'exemple : le résultat d'une mesure d'une unique quantité peut dépendre de la façon dont on procède.

40. en fait plutôt d'impulsion qui est le produit de la masse par la vitesse pour une particule non relativiste.

41. I. SOLVAY 1928, Intervention de Bohr p. 224.

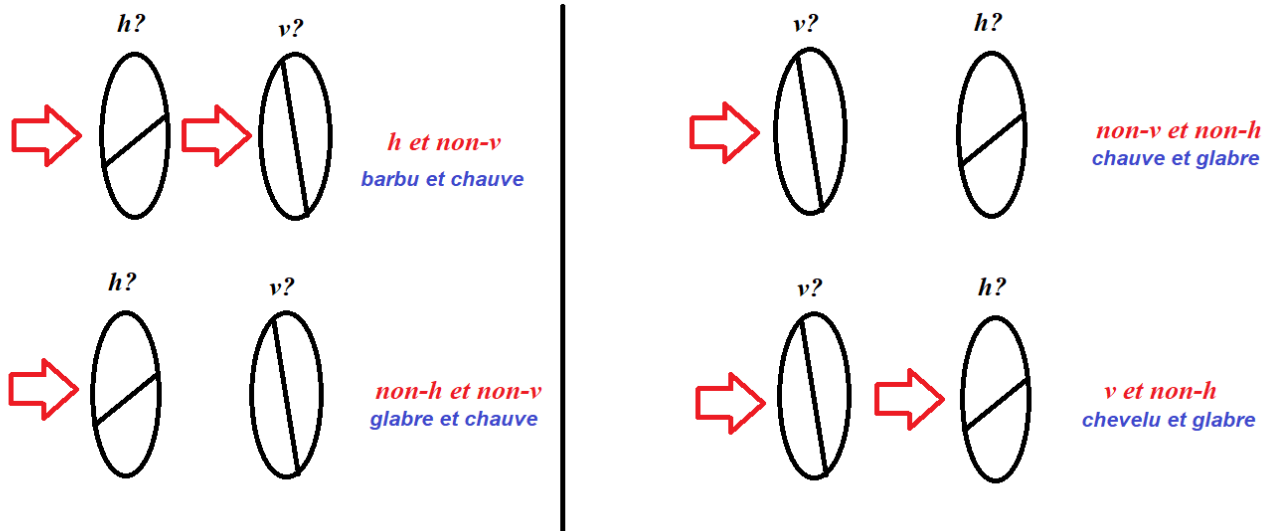


FIGURE 3.5 – Exemple de mesures contextuelles avec des polariseurs.

La première expérience est représentée à gauche : deux polariseurs se suivent, d’axes respectifs  $\Delta_1 = Ox$  (noté  $h$  pour horizontal) et  $\Delta_2 = Oy$  (noté  $v$  pour vertical).

- si le premier polariseur transmet le photon alors nécessairement le second ne le transmettra pas et on pourrait être tenté de dire classiquement que la polarisation du photon est  $h$  et non- $v$  ;
- si le premier polariseur ne transmet pas le photon alors nécessairement le second ne le transmettra pas non plus et on pourrait être tenté de dire classiquement que la polarisation du photon est non- $h$  et non- $v$ .

La seconde expérience où l’on a inversé l’ordre des mesures est représentée à droite : les axes respectifs des polariseurs sont maintenant  $\Delta_1 = Oy$  (noté  $v$  pour vertical) et  $\Delta_2 = Ox$  (noté  $h$  pour horizontal).

- si le premier polariseur ne transmet pas le photon alors nécessairement le second ne le transmettra pas non plus et on pourrait être tenté de dire classiquement que la polarisation du photon est non- $v$  et non- $h$  ;
- si le premier polariseur transmet le photon alors nécessairement le second ne le transmettra pas et on pourrait être tenté de dire classiquement que la polarisation du photon est  $v$  et non- $h$ .

Si l’on associe cela à des propriétés classiques ( $v$  pour chevelu, non- $v$  pour chauve,  $h$  pour barbu et non- $h$  pour glabre), les mesures peuvent donner les résultats suivants : « glabre et chauve », « barbu et chauve » ou encore « glabre et chevelu » !

On retrouve dans ce qui précède la **complémentarité** dans la mesure : soit l'on mesure la position, soit l'on mesure la vitesse, mais le dispositif expérimental sera dans les deux cas différents. Et si l'on veut mesurer une de ces deux grandeurs après l'autre, la première mesure aura en quelque sorte transformé la fonction d'onde associée au système. De sorte que les résultats des mesures seront différents *a priori* suivant l'ordre choisi pour mener les expériences. Ainsi, la mesure préalable de la position va avoir un effet sur la vitesse qui, si elle est mesurée ensuite sera différente. Inversement, si la mesure se porte d'abord sur la vitesse, alors cela aura un effet sur la position qui, mesurée ensuite, risque de ne plus donner la même valeur que précédemment.

Cet exemple de la position et de la vitesse montre que les mesures quantiques peuvent être marquées par la **contextualité** qui se caractérise par le fait qu'une mesure effectuée sur un système ne révèle pas une valeur préexistante d'une propriété du système mais dépend essentiellement de la façon dont est conduite l'expérience (du contexte).

### **En SQM, toutes les mesures sont contextuelles conformément au fait que toutes les grandeurs sont indéterminées**

On ne s'étonnera pas que pour SQM, toutes les mesures soient contextuelles : elles ne révèlent rien de propre ou spécifique au système car les grandeurs sont indéterminées.

Le vocable d'« **observable** » est là pour rappeler que l'expérience ne détermine pas de propriétés intrinsèques du système. Ce dernier est en quelque sorte comme privé de propriétés, les grandeurs qu'on lui aurait attribuées en physique classiques sont « indéterminées ».

C'est pour cette raison que **Bell** n'aimait pas le mot « mesure » et qu'il lui préférait celui d'« expérience » parce que quand on dit que quelque chose est mesuré, c'est difficile de ne pas penser au résultat comme à une propriété pré-existante de l'objet étudié.

Ainsi, selon SQM, l'expérience qui porte sur une **observable** fait (comme nous l'avons vu précédemment) interagir le système avec l'appareil de mesure. La « mesure » donne un résultat qui dépend de la façon dont l'expérience est menée (du « contexte »), c'est-à-dire en particulier de l'ordre des expériences (notons les *A* et *B*). En effet, le résultat d'une première expérience (*A*) modifiant la fonction d'onde (du fait de l'**effondrement du paquet d'ondes**), le catalogue des résultats possibles pour une seconde expérience *B* est différent de celui qu'il serait si l'expérience *B* avait été effectuée avant *A*. Dit autrement, ma mesure ne porte pas sur un système, puisqu'il s'agit du résultat d'une interaction de ce dernier avec un appareil de mesure.

### **La mesure en BQM est bien souvent contextuelle aussi**

En BQM, la plupart des mesures dépendent de la méthode utilisée pour faire la mesure<sup>42</sup>. Ainsi, même si le système est dans le même état initial (avec en particulier la même position pour la particule), des résultats différents de mesures de la même grandeur sont possibles, du fait de différentes procédures expérimentales.

Le résultat obtenu lors de la mesure d'une observable sur une particule n'est pas déterminé uniquement par la fonction d'onde et la position associées à cette particule avant la mesure. Elle dépend également de la fonction d'onde et de la position associées initialement à l'appareil de mesure. Il s'en suit que la valeur de l'observable obtenue au terme d'une mesure est une propriété qui doit être assignée non pas au système considéré individuellement, mais conjointement au système et à l'appareil de mesure. **Bohm** et **Hiley** de soutenir : [...] nous ne pouvons pas dire que les propriétés quantiques appartiennent au

42. HARDY 1996.

système observé tout seul, [...] ces propriétés n'ont pas de signification en dehors du contexte total qui est pertinent dans chaque situation particulière. En ce sens, la théorie de l'onde pilote peut être qualifiée de « contextuelle »<sup>43</sup>.

Comme pour SQM, la **contextualité** pour BQM est une manifestation de l'impossibilité de séparer concrètement, en pratique, le comportement des objets microscopiques et l'interaction avec les instruments de mesure – macroscopiques – qui servent à définir les conditions sous lesquelles le phénomène apparaît. Cette similarité de SQM et BQM pour la **contextualité** de la mesure ne doit pas faire oublier que, BQM fournit un scénario de ce qui se passe tout au long de la mesure alors que SQM s'y refuse, et prétend même que c'est impossible.

### **Certaines grandeurs en BQM, nommées « étrables », sont caractéristiques de la particule, comme sa position**

Ce n'est pas la seule différence entre SQM et BQM sur ce sujet. En BQM, la trajectoire est une propriété du système : la position, comme la vitesse – fixée d'après l'**équation de guidage** par la position<sup>44</sup> – sont donc des propriétés du système microscopique (c'est-à-dire de la particule). Mais ce n'est pas le cas de toutes les grandeurs mesurées.

Pour autant, **Bohm** et Hiley ne pensent pas que toute « propriété » est relative au contexte. D'après eux, il faut opérer une distinction entre les propriétés d'un système qui sont effectivement relatives au contexte – c'est à elles que renvoient les « observables » de la mécanique quantique – et les propriétés « intrinsèques » d'un système, qui elles sont indépendantes du contexte. Tandis que les premières peuvent être potentielles ou actuelles (cela dépend du contexte), les secondes sont toujours actuelles. Dans la théorie de l'onde pilote, écrivent **Bohm** et Hiley, « il y a une propriété qui est intrinsèque et qui n'est pas dépendante [...] de l'ensemble du contexte. Il s'agit de la position  $x$  de la particule ». Il en va de même de la quantité de mouvement  $p$ , puisque cette grandeur physique peut être dérivée directement de la position de la particule par la relation  $(\vec{p}(t) = m \frac{d\vec{x}(t)}{dt})$ <sup>45</sup>.

Afin de distinguer des autres les grandeurs non soumises à la **contextualité**, **Bell** a introduit le concept de « beable » (« étrables » en français<sup>46</sup>) pour ces grandeurs intrinsèques, possédées en propre par le système, qui ne dépendent donc pas du contexte de l'expérience. Ces « beables » sont définis comme des « propriétés objectives assignées aux objets »<sup>47</sup>, ce sont ces éléments qui pourraient correspondre à des éléments de

43. BÄCHTOLD 2009, pp. 89-90.

44. L'affirmation que position et vitesse soient parfaitement déterminées dans BQM pourrait sembler contradictoire avec les **inégalités de Heisenberg**, mais cela n'est pas le cas, cf. **D**. En effet, les **inégalités de Heisenberg** portent sur les observables : l'observable position (identique à la position intrinsèque de la particule) et l'observable quantité de mouvement (qui est, elle, différente de la quantité de mouvement intrinsèque de la particule). En effet, d'après la théorie de l'onde pilote, la position et la quantité de mouvement intrinsèques de la particule possèdent toutes deux une valeur actuelle bien définie à chaque instant. Par conséquent, il n'existe aucune limitation théorique à leur détermination simultanée. « Il convient alors de ne pas confondre cette quantité de mouvement intrinsèque de la particule, avec l'observable quantité de mouvement, c'est-à-dire la quantité de mouvement observée lors d'une mesure. La mesure de la quantité de mouvement de la particule implique inévitablement une « perturbation » de cette quantité de mouvement (contrairement à la mesure de la position, qui elle peut très bien ne pas être perturbatrice). Ce qui se traduit par les inégalités d'Heisenberg supposées porter sur la position intrinsèque de la particule et sur l'observable - quantité de mouvement, et non sur la quantité de mouvement intrinsèque de la particule. En effet, d'après la théorie de l'onde pilote, la position et la quantité de mouvement intrinsèques de la particule possèdent toutes deux une valeur actuelle bien définie à chaque instant. Par conséquent, il n'existe aucune limitation théorique à leur détermination simultanée » (BÄCHTOLD 2009, pp. 89-90).

45. BÄCHTOLD 2009, pp. 89-90.

46. Bricmont utilise cette traduction (BRICMONT 2007, p. 19) et (BRICMONT 2020, p. 294).

47. John S. BELL 1987, p. 41, ma traduction.



réalité, à des choses qui existent. Attribuer une valeur particulière à certains « beables » ne peut pas changer les valeurs particulières déjà attribuées aux autres « beables »<sup>48</sup>.

Si les autres grandeurs sont contextuelles, on peut leur réserver le terme d'« observables », comme en SQM. Ces « observables » doivent être faits, d'une manière ou d'une autre, de « beables », les « beables » doivent contenir et donner une signification physique précise aux « observables »<sup>49</sup>.

### 3.3.2 Qu'est-ce que la « non localité » ?

**La physique classique est locale : elle suppose que des objets suffisamment éloignés l'un de l'autre n'ont pas d'influence mutuelle**

La **localité** est un concept général en physique classique. Il pourrait être exprimé simplement sous la forme « l'influence mutuelle des événements décroît lorsque leur distance croît » ; ou « l'influence d'objets distants peut être négligée s'ils sont suffisamment éloignés »<sup>50</sup>. Cette notion de **localité** est une des bases de la méthode scientifique : « le scientifique suppose que les observations faites dans un laboratoire dépendent de ce qui se passe dans le laboratoire, mais pas d'événements arbitraires ou de choix qui sont faits ailleurs et très loin. Imaginons la situation si les observations dans chaque laboratoire dépendaient de tous les choix de paramètres faits dans tous les autres laboratoires du monde, il deviendrait probablement alors impossible de faire une expérience qui ait un sens »<sup>51</sup> ! En effet, la **localité** semble nécessaire à la physique<sup>52</sup>, comme le faisait remarquer le physicien néerlandais Hendrik Casimir (1909 - 2000) :

Si les résultats des expériences sur la chute libre ici à Amsterdam dépendaient de façon significative de la température du Mont-Blanc, de la hauteur de la Seine à Paris et de la position des planètes, alors nous n'irions pas très loin<sup>53</sup>.

**L'expérience de pensée EPR prévoit un comportement paradoxalement non local selon SQM**

C'est en partant du principe que la physique était nécessairement locale qu'en 1935, avec les physiciens Boris Podolsky et Nathan Rosen, Albert **Einstein** a formulé une expérience de pensée (nommée « EPR » d'après les initiales de ses auteurs) qui aboutissait dans le cadre de SQM, avec cette hypothèse de **localité**, à un paradoxe. Afin de comprendre la problématique d'EPR, je donne ici la version que Louis **de Broglie** a proposé (L. d. BROGLIE 1959, pp. 963-964),

un peu schématique<sup>54</sup>, mais qui montre bien la nature des paradoxes auxquels on est amené. Considérons un corpuscule enfermé dans une boîte  $B$  dont les parois lui sont infranchissables. Son onde  $\Psi$  est répandue dans la boîte et le corpuscule est « potentiellement » présent<sup>55</sup> dans toute la boîte  $B$  avec une

48. John S. BELL 1987, pp. 42-43, ma traduction.

49. John S. BELL 1987, p. 52, ma traduction.

50. LALOË 2011, pp. 76-77.

51. LALOË 2011, pp. 76-77.

52. Remarquons tout de même que la gravitation newtonienne n'est pas locale, *stricto sensu*.

53. BRICMONT 2020, citation d'Hendrik Casimir p. 133.

54. En fait EPR proposaient une mesure simultanée de position et de quantité de mouvement. **Bohm** et Aharonov ont proposé une autre version (nommée EPRB), dont la possibilité de test expérimental est plus accessible, qui revient à des mesures de polarisation : « While the paradox of ERP [EPR] is most clearly expressed in terms of the correlations of spins of a pair of atoms, it is at present practicable to test it experimentally only in the study of the polarization properties of correlated photons » (D. BOHM et Y. AHARONOV 1957, p. 1072).

55. Cette formulation est plutôt conforme à la vision de BQM. Selon SQM, nous devrions dire : « la densité de probabilité de mesurer l'observable position est  $|\Psi|^2$  ».

probabilité localement égale à  $|\Psi|^2$ .

Supposons que par un procédé quelconque, par exemple en glissant une double cloison en travers de la boîte  $B$ , on divise cette boîte en deux parties isolées  $B_1$  et  $B_2$  et qu'ensuite on transporte les deux boîtes  $B_1$  et  $B_2$  en deux lieux très éloignés par exemple à Paris et à Tokyo. Le corpuscule reste alors potentiellement présent dans l'ensemble des boîtes  $B_1$  et  $B_2$  et sa fonction d'onde  $\Psi$  comprend deux parties dont l'une  $\Psi_1$  est localisée dans  $B_1$  et l'autre  $\Psi_2$  dans  $B_2$ . La fonction  $\Psi$  est donc alors de la forme :

$$\Psi = C_1 \Psi_1 + C_2 \Psi_2$$

où  $C_1$  et  $C_2$  sont deux constantes, généralement complexes, telles que  $|C_1|^2 + |C_2|^2 = 1$ . Les lois de probabilité de la mécanique ondulatoire nous disent que, si l'on fait à Paris, sur la boîte  $B_1$  une expérience permettant de déceler la présence du corpuscule dans cette boîte, la probabilité pour que cette expérience donne un résultat positif est  $|C_1|^2$  tandis que la probabilité pour qu'elle donne un résultat négatif est  $|C_2|^2$ .

D'après l'interprétation usuelle [SQM], ceci aurait la signification suivante : le corpuscule étant présent « potentiellement » dans l'ensemble des deux boîtes avant l'expérience de localisation, il se localiserait brusquement dans la boîte  $B_1$  à Paris dans le cas d'un résultat positif et il se localiserait brusquement dans la boîte  $B_2$  à Tokyo dans le cas d'un résultat négatif<sup>56</sup>.

Tout semble se passer « comme si » ce qui se produit à Paris a instantanément un effet à grande distance (à Tokyo). Pour [Einstein](#), cette non [localité](#) (impliquant en quelque sorte un signal plus rapide que la lumière) est inacceptable. La résolution du paradoxe vient du fait qu'il doit exister des variables cachées qui donnent l'impression d'une communication immédiate, pense [Einstein](#), tout comme [de Broglie](#) qui continue ainsi :

Une telle manière de voir ne me paraît pas admissible. La seule interprétation raisonnable me paraît être la suivante : le corpuscule était avant l'expérience de localisation dans l'une des deux boîtes  $B_1$  et  $B_2$ , mais nous ignorions laquelle et les probabilités envisagées par la Mécanique ondulatoire usuelle traduisent cette ignorance ; si nous le décelons dans la boîte  $B_1$ , c'est qu'il y était déjà et si nous ne pouvons l'y déceler, c'est qu'il était dans la boîte  $B_2$ . Alors tout redevient clair parce que nous revenons à l'interprétation classique de la probabilité dont l'intervention résulte de notre ignorance. Mais, dès que l'on admet ce point de vue, il apparaît que la description du corpuscule par l'onde  $\Psi$ , bien que conduisant à une représentation parfaitement exacte des probabilités, ne nous donne pas une description complète de la réalité physique puisque le corpuscule doit avoir une localisation avant l'expérience qui la décèle et que l'onde  $\Psi$  ne nous dit rien à ce sujet<sup>57</sup>.

En fait, le paradoxe EPR voulait mettre en évidence la non complétude de SQM en acceptant la localité comme principielle.

### **Les inégalités de Bell permettent d'imaginer un test quantitatif de la localité suivant l'expérience de pensée EPR, des expériences sont réalisées qui montrent que les inégalités de Bell sont violées : la physique quantique est non locale**

En 1964 John S. [Bell](#)<sup>58</sup> formalise la question en aboutissant à des inégalités (les inégalités de Bell) qui pourraient être évaluées au cours de l'expérience si elle était réalisée. Si les inégalités de Bell ne sont pas respectées alors il faut se résoudre à admettre le caractère non local de la nature.

56. L. d. BROGLIE [1959](#), pp. 963-964.

57. L. d. BROGLIE [1959](#), pp. 963-964.

58. John S. BELL [1964](#).

À partir du début des années 1970, de nombreuses et différentes expériences ont lieu après la formalisation effectuées par Bell<sup>59</sup>. Elles ont été sans cesse améliorées et perfectionnées :

en 1982, l'équipe d'Alain Aspect, de l'Institut d'optique, à Orsay, met au point une expérience pour vérifier les inégalités de Bell. Dans le dispositif, des paires de photons intriqués sont produites, puis chacun des photon d'une paire est dirigé vers un détecteur pour mesurer sa polarisation. Les deux instruments sont suffisamment éloignés l'un de l'autre pour éviter qu'une communication à la vitesse de la lumière puisse fausser le résultat de la mesure (On parle d'échappatoire de communication, ou échappatoire de localité). Alain Aspect et ses collègues montrent que, dans ce dispositif, les inégalités de Bell sont violées, confirmant ainsi le caractère non local de la physique quantique. [...] Cependant,] pour pouvoir tirer une conclusion de l'expérience, il faut faire l'hypothèse que l'échantillonnage des photons observés est représentatif des photons émis. Cette échappatoire est difficile à maîtriser. [...]

Ronald Henson et son équipe ont aujourd'hui mis au point un système qui traite les deux failles en même temps. [...] Ainsi, l'échappatoire de détection est résolue [en même temps que] l'échappatoire de communication. Les physiciens [...] ont confirmé que les inégalités de Bell étaient violées<sup>60</sup>.

De nos jours, la communauté scientifique s'accorde sur le fait que les inégalités de Bell sont violées. Résumons : « ce que EPR ont inventé, c'est une situation où l'introduction de variables cachées leur semblait inévitable, à moins d'admettre qu'il existe des "actions à distance" c'est-à-dire qu'il soit possible, dans certaines circonstances bien précises, d'influencer instantanément l'état physique de certains corps à des distances aussi grandes qu'on veut »<sup>61</sup>. Et ce que les tests expérimentaux des inégalités de Bell ont montré, c'est que la mécanique quantique est non locale. Cela ne disqualifie pas pour autant les théories à variables cachées (comme BQM), mais cela implique que toute théorie à variables cachées doit être nécessairement non locale.

### SQM est non locale

SQM est non locale (ou implique une non séparabilité, ce qui revient au même). La raison profonde de la non localité de SQM réside dans le fait que  $\Psi$  n'a pas les propriétés classiques d'une fonction d'onde associée une onde en physique classique,  $\Psi(x, y, z, t)$  définie sur l'espace « réel »<sup>62</sup>.

Dans le cadre de SQM, le paradoxe EPR est résolu : « si l'on suit John von Neumann [...] on va utiliser un postulat de réduction [du paquet d'ondes] qui n'est pas local. Si l'on suit Bohr, on utilise la description globale de l'expérience, qui n'est pas un événement de l'espace-temps et qui n'est donc pas locale non plus »<sup>63</sup>. Dès lors que l'on admet cette non localité, il n'y a pas lieu d'imaginer des variables cachées et la complétude de SQM n'est pas mise en cause.

### BQM est non locale

Que tirer du paradoxe EPR concernant BQM ? Il faut bien comprendre que ce que le paradoxe EPR et les inégalités de Bell nous enseignent, ce n'est pas que la complétude de SQM est prouvée. La conclusion

59. Cela commence avec Freedman (FREEDMAN et CLAUSER 1972). Les expériences menées par Aspect (ASPECT, DALIBARD et ROGER 1982) sont centrales. Le dernier test est celui de Hensen (HENSEN et al. 2015).

60. BAILLY 2015.

61. BRICMONT 2007, p. 23.

62. « The quantum mechanical wavefunction is defined on the configuration space of the system. This is in sharp contrast to any other physical field. The non-locality is closely related to this feature » (PASSON 2005, p. 5).

63. LALOË 2014.

à tirer est la suivante : si l'on forme une théorie à variables cachées (comme l'est BQM), alors cette théorie est nécessairement non locale.

Il se trouve justement que BQM est non locale, du fait qu'elle utilise, tout comme SQM, cette fonction d'onde définie sur l'espace de configuration :

$$\Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t) = R(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t) \exp\left(\frac{S(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t)}{\hbar}\right)$$

Ainsi, la vitesse de la particule n°1 est déterminée par l'équation de guidage :

$$m_1 \vec{v}_1 = \overrightarrow{\text{grad}}_1 S(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t)$$

qui indique que la vitesse  $\vec{v}_1$  de la particule n°1 dépendra *a priori* de la particule n°2 puisque  $\Psi$  dépend de la position de cette particule n°2 <sup>64</sup>.

Une autre façon de se convaincre de la non **localité** de BQM est de voir que le **potentiel quantique**  $Q$  qui va influencer sur la particule n°1 dépend de la position de la particule n°2. De plus, dans la mesure où l'influence de la fonction d'onde  $\Psi$  dans  $Q$  est indépendante de l'intensité  $R = |\Psi|$ , même si la distance entre les deux particules est grande, leur influence mutuelle est tout de même importante <sup>65</sup>.

### La non localité quantique est due à l'intrication

La non **localité** est liée à l'**intrication** qui naît souvent d'un passé commun. Pour comprendre l'**intrication**, raisonnons sur l'exemple de deux particules (repérées par les indices 1 et 2), l'une en  $(x_1, y_1, z_1)$  et l'autre en  $(x_2, y_2, z_2)$  à la date  $t$ . La fonction d'onde relative à l'ensemble des deux particules  $\Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t)$  est définie sur l'**espace de configurations** (ici à 7 dimensions).

C'est parce que la fonction d'onde totale  $\Psi$  ne se factorise pas en produit de deux fonctions d'ondes  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$  relatives à chacune des particules

$$\Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t) \neq \Psi_1(x_1, y_1, z_1, t) \Psi_2(x_2, y_2, z_2, t)$$

qu'il y a **intrication**. Dans le cas contraire, l'évolution de la particule n°2 n'aurait aucune influence sur celle de la particule n°1 <sup>66</sup> du fait de l'absence d'interférence entre les deux fonctions d'onde : la **localité** serait bien assurée dans le cas où il n'y aurait pas d'intrication.

La figure 3.6 illustre le fait que, si  $\Psi = \Psi_1 \Psi_2$ , il n'y a pas **intrication** car une mesure sur un des deux sous-systèmes (la particule n°2 par exemple) fixe la valeur de  $y_2$  mais laisse tous ses paquets d'ondes à la particule n°1. Au contraire si  $\Psi \neq \Psi_1 \Psi_2$  (on a considéré comme dans l'exemple proposé par Louis de Broglie que  $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$  <sup>67</sup>) il y a au contraire **intrication** car la mesure de  $y_2$  sur la particule n°2 ne laisse plus qu'une possibilité de paquet d'ondes à la particule n°1 : les résultats de mesures sont corrélés. On parle aussi de non-séparabilité (ou enchevêtrement).

-

64. « The wavefunction  $\Psi$  (hence its phase  $S$ ) at a given time is a function on the configuration space  $\mathbb{R}^{3N}$ . It is exactly this non-locality which allows the deBroglie-Bohm theory to violate the Bell inequalities as demanded by experiment » (PASSON 2005, p. 2).

65. Cf. la métaphore déjà citée qui compare  $\Psi$  à des ondes radio. Ces dernières guident un navire sur pilote automatique même si leur intensité est faible (PASSON 2005, pp. 5-6).

66. « this non-locality vanishes if the wavefunction factorizes in the contributions of the different particles » (PASSON 2005, p. 2).

67. Il faudrait en toute rigueur multiplier par un coefficient de normalisation mais cela ne changerait rien à l'allure qui est tracée.

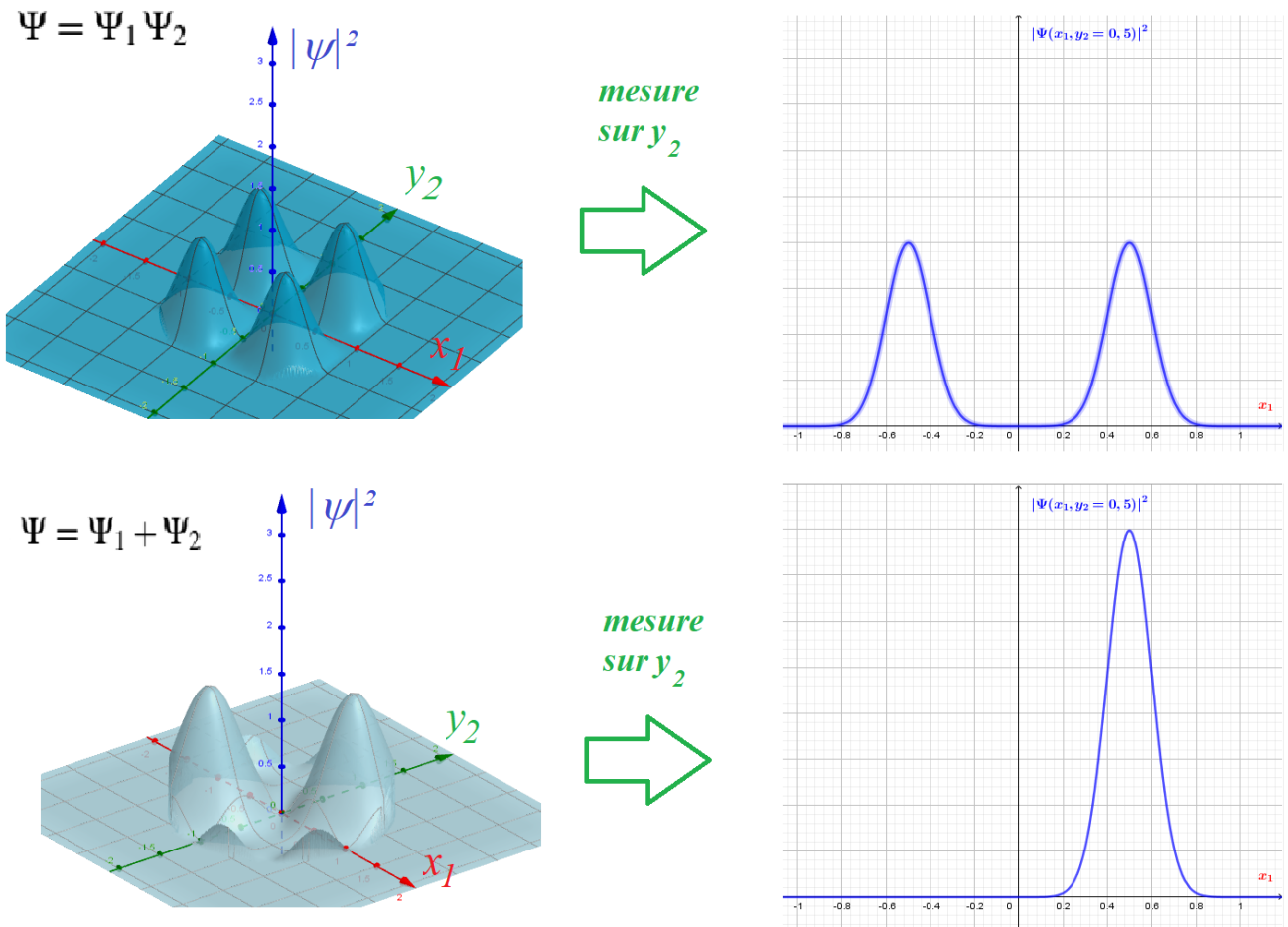


FIGURE 3.6 – Représentation des densités de probabilités  $|\psi(x_1, y_2)|^2$  dans le cas de deux particules, ayant chacune une fonction d’onde avec deux paquets d’ondes, la particule n°1 ayant une fonction d’onde  $\psi_1(x_1)$  qui ne dépend que de sa coordonnée  $x_1$ , la particule n°2 ayant une fonction d’onde  $\psi_2(y_2)$  qui ne dépend que de sa coordonnée  $y_2$ .

Les densités de probabilité sont données à gauche avant la mesure, à droite après la mesure sur la particule n° 2 ( $y_2$  est fixée à 0,5).

En haut :  $\psi(x_1, y_2) = \psi_1(x_1) \psi_2(y_2)$ . Après la mesure sur la particule n° 2, la particule n°1 garde ses deux paquets d’ondes : il n’y a pas intrication.

En bas :  $\psi(x_1, y_2) = \psi_1(x_1) + \psi_2(y_2)$ . Après la mesure sur la particule n° 2, la particule n°1 n’a alors plus qu’un unique paquet d’ondes : il y a intrication.



## **Deuxième partie**

### **Défauts et qualités comparés de SQM et BQM**





# Chapitre 4

## Le « problème de la mesure »

### 4.1 Le « problème de la mesure » pour SQM

« Avec l'apparition de l'interprétation "orthodoxe" de Copenhague, d'autres interprétations de la mécanique quantique ont été proposées depuis longtemps » comme le note le physicien français Franck Laloë dans son ouvrage (LALOË 2011) qui s'intéresse justement à ces autres interprétations. Il poursuit : « l'objectif général reste toujours le même : résoudre les problèmes et les questions qui sont conséquences du processus de mesure quantique »<sup>1</sup>. On peut effectivement parler d'un véritable « problème de la mesure » pour SQM dont nous allons voir les différentes facettes.

#### **Le concept de mesure, non défini en SQM, implique une rupture dans l'évolution de la fonction d'onde**

Pour SQM, lors de la mesure, l'évolution de la fonction d'onde  $\Psi$  change profondément (cf. 3.2.2) : alors que  $\Psi$  était préalablement soumise à une évolution linéaire et déterministe selon l'équation de Schrödinger, l'effondrement du paquet d'ondes provoque soudainement une évolution brutale, non linéaire et indéterministe. Les deux lois d'évolution sont opposées en tout point, or c'est justement la mesure qui fait passer de l'une à l'autre<sup>2</sup>. SQM ne dit rien des raisons de la différence entre ces deux types d'interaction : celle qui intervient dans l'évolution de la fonction d'onde suivant l'équation de Schrödinger et celle qui, au contact d'un appareil de mesure, provoque l'effondrement du paquet d'ondes.

Comment peut-on savoir quand il faut utiliser l'axiome<sup>3</sup> d'évolution selon l'équation de Schrödinger plutôt que celui d'effondrement du paquet d'ondes ou inversement ? Dit autrement : savoir quand l'une des évolutions plutôt que l'autre s'applique revient à demander ce qu'est une mesure, suivant la critique du bohémien Bell :

En y réfléchissant, le concept de « mesure » devient tellement flou que c'est très étonnant de le voir apparaître dans une théorie physique au niveau le plus fondamental. [...] Est-ce que l'analyse de ces mesures requiert des concepts plus fondamentaux que la mesure elle-même ? Mais alors si c'était le cas,

---

1. LALOË 2011, pp. 207-208.

2. « The "measurement problem" is the problem of how to reconcile this with the continuous evolution of the specimen-apparatus system into the final state, which is clearly still capable of revealing interference effects in the form of probabilities that do depend on the phases of the  $\alpha_i$  » (MERMIN 1998, p. 14).

3. Cf. l'annexe C.1 relative aux axiomes de SQM et BQM.

la théorie ne devrait-elle pas plutôt porter sur ces concepts plus fondamentaux ?<sup>4</sup>

Une première composante du problème de la mesure pour SQM est donc celle-ci : la théorie repose sur un concept de mesure qui n'a aucune définition au sein de la théorie. Certes la mesure est approchée de manière purement pragmatique (« nous savons bien ce qu'est une mesure » pourrait-on dire). Mais cela n'est pas satisfaisant puisque les axiomes de la théorie font usage de manière fondamentale du concept de mesure. En particulier, le choix des axiomes à utiliser se fait relativement à ce concept.

### Le processus de mesure pour SQM s'adosse à la physique classique

Le second problème de la mesure SQM est mis en évidence par l'expérience de pensée du [chat de Schrödinger](#) : en 1935 [Schrödinger](#) lie un système microscopique (un noyau radioactif) à un système macroscopique (un chat enfermé avec le noyau atomique dans une boîte contenant un dispositif qui libère un poison si il y a émission radioactive). Selon que le noyau a émis une particule radioactive (ou non), l'observation du chat aboutit à soit un chat mort, soit un chat vivant. D'une certaine façon, on peut comprendre que l'aiguille inanimée d'un instrument de mesure de la radioactivité est remplacée par un chat. Selon SQM, la fonction d'onde associée au système comportant le noyau radioactif et le chat présente une [intrication](#) se caractérisant par une [superposition](#) de deux possibilités pour le chat : mort et vivant. En reprenant les notations de la partie [3.2.1](#) :

$$\Psi(x, y, t \gg \tau) = c_1 \alpha_1(x) \beta(y - y_1) + c_2 \alpha_2(x) \beta(y - y_2)$$

avec  $y = y_1$  si le chat est vivant et  $y = y_2$  si le chat est mort.

C'est parce que l'appareil de mesure se comporte de façon classique (et non quantique) que la [superposition](#) ne peut perdurer : il faut bien que le chat observé soit mort ou vivant. D'une certaine façon, cela revient à attribuer un caractère classique à l'instrument de mesure (l'aiguille de l'appareil de mesure ou bien le chat) et à lui dénier le statut d'objet quantique.

Pragmatiquement, la superposition *doit* disparaître et une seule possibilité subsiste alors : le chat est ou bien mort, ou bien vivant. C'est donc ce qui se passe lors de l'[effondrement du paquet d'ondes](#) : de deux paquets (l'un « chat mort », l'autre « chat vivant »), un seul doit subsister :

$$\Psi = \alpha_1(x) \beta(y - y_1) \quad \text{ou bien} \quad \Psi = \alpha_2(x) \beta(y - y_2)$$

Ainsi, puisqu'il recourt à un comportement classique, le processus de mesure SQM présuppose « une conception classique du monde macroscopique [qui] vient logiquement avant la conception quantique du monde microscopique »<sup>5</sup>. Cela induit corrélativement que le cas classique ne peut se réduire à un cas limite du cas quantique pour SQM<sup>6</sup>.

### La mesure en SQM nécessite une division – problématique – du monde entre microscopique obéissant à la physique quantique et macroscopique obéissant à la physique classique

La mesure selon SQM présuppose donc une division entre monde macroscopique (qui obéit à la physique classique) et monde microscopique (qui obéit à la mécanique quantique), problématique selon certains manuels de mécanique quantique (qui présentent SQM) :

4. John S. BELL 1987, pp. 117-118, ma traduction.

5. J. S. BELL 1976, p. 11, ma traduction.

6. Cf. à ce propos la partie [2.3.1](#).

Ceci n'est clairement pas satisfaisant. Si la mécanique quantique s'applique à tout, elle doit s'appliquer à l'appareil de mesure d'un physicien et aux physiciens eux-mêmes. En revanche, si la mécanique quantique ne s'applique pas à tout, alors il faut savoir où tracer la limite de sa zone de validité. S'applique-t-elle uniquement aux systèmes qui ne sont pas trop volumineux ? <sup>7</sup>

Au delà de la division classique / quantique présumée par la conception de la mesure SQM, il apparaît donc aussi une division macroscopique / microscopique, cette séparation étant parfois bien difficile à faire : qu'est-ce qui fait qu'à un certain niveau (de taille ?, de masse ?, de complexité ?), une entité (atome ?, molécule ?, agrégat ?, cristal ?) est-elle « suffisamment macroscopique » pour se comporter de façon classique ?

### La mesure en SQM suppose l'existence d'un sujet conscient qui réalise l'expérience

En plus de la distinction énigmatique entre classique / quantique et macroscopique / microscopique, un autre problème se pose : SQM ne dit pas quand une mesure se produit, ce qui « provoque » l'**effondrement du paquet d'ondes**. Est-ce l'observateur lui-même ? Certains auteurs <sup>8</sup> se sont demandés avec ironie si un animal pouvait provoquer l'**effondrement du paquet d'ondes**, ou bien si, au contraire, un homme était nécessaire, quels devraient être les diplômes de l'observateur.

Au delà des caractéristiques de l'observateur se pose le problème de l'interaction entre cet observateur et l'appareil de mesure. L'**effondrement du paquet d'ondes** a-t-il lieu « si une mesure est effectuée par un appareil automatique et qu'aucun humain ne lit le résultat » <sup>9</sup> ? Pour que se déclenche l'**effondrement du paquet d'ondes**, certains auteurs ont évoqué la nécessité d'une conscience. Ainsi, les physiciens Fritz London, Edmond Bauer et Eugene Wigner <sup>10</sup> ont fait l'hypothèse que c'était la conscience de l'observateur qui opérait l'**effondrement du paquet d'ondes**. Selon cette conception, la mesure requiert donc l'intervention d'un sujet conscient. Ni l'observateur ni la conscience n'étant définis dans le cadre théorique de SQM, il faudrait les prendre en compte dans le corpus des axiomes de SQM comme des « éléments ajoutés non-physiques » <sup>11</sup>, et de plus il faudrait les définir, ce qui n'est pas sans difficulté.

D'autre part, si l'**effondrement du paquet d'ondes** n'a lieu que lorsque l'observateur humain devient conscient lors de la lecture du résultat de mesure sur l'appareil qui permet cette mesure, qu'en est-il du pointeur (l'aiguille de l'appareil de mesure) lorsqu'il n'est pas regardé <sup>12</sup> ? Ce dernier point a souvent été résumé par la formule désormais bien connue du physicien Nathaniel David Mermin (né en 1935) qui pose la question : « la Lune était-elle déjà en un point de son orbite avant que le premier homme lève les yeux pour la voir dans le ciel ? » <sup>13</sup>. En refusant de dire quoi que ce soit des « choses » en absence de leur observation, SQM nie en somme toute existence propre aux objets étudiés. Quoi qu'il en soit, cette vision revient à mettre l'observateur au centre du processus scientifique de la mesure (« l'homme est acteur et non pas spectateur dans le théâtre de la vie ») <sup>14</sup>. Cette *subjectivation du réel* va à l'encontre de l'entreprise historique de la physique qui avait bien pris bien soin, depuis des siècles, d'éliminer toute référence explicite au *sujet* au sein des comptes rendus scientifiques, afin de rendre l'observation la plus *objective* possible.

On le voit, la théorie de la mesure selon SQM pose de nombreux problèmes. C'est certainement un

7. WEINBERG 2013, p. 82, ma traduction.

8. ORIOLS et MOMPART 2012, p. 47.

9. WEINBERG 2013, p. 82, ma traduction.

10. Cf. (ZWIRN 2001, p. 3).

11. TOWLER 2020, Cours 4 - transparent 12, ma traduction.

12. TOWLER 2020, Cours 4 - transparent 12, ma traduction.

13. MERMIN 2008.

14. BRICMONT 2007.

de ses points faibles. De nombreuses interprétations<sup>15</sup> essaient de donner du sens à ce qui se passe lors d'une expérience car, en fait, la mécanique quantique standard décrit les conséquences d'une mesure mais n'explique pas le processus de mesure en lui-même.

## 4.2 La décohérence, solution au problème de la mesure SQM ?

**La décohérence, fondée sur le « brouillage » des interférences quantiques, a pour but d'expliquer l'émergence, pour un système microscopique, d'un comportement classique**

La **décohérence** (théorie très développée depuis les années 1980) résoudrait-elle le problème de mesure de SQM ? Pour répondre à cette question<sup>16</sup>, commençons par définir la **décohérence**, non pas vraiment comme une théorie, mais comme un ensemble de modèles qui

permettent de comprendre l'émergence des comportements classiques à partir des lois quantiques. [La décohérence] résulterait d'un « brouillage » des interférences quantiques, brouillage dû aux interactions avec l'environnement et qui se manifesterait systématiquement dans des systèmes formés d'un grand nombre de particules. Le nom de « décohérence » a été choisi pour définir ce phénomène. [...] L'aiguille d'un appareil de mesure, par exemple, subit des interactions incontrôlées avec le gaz qui la baigne et avec le rayonnement ambiant. Suivant sa position, elle subit des chocs avec des molécules ou des photons différents qui emportent une information sur son état. La simple existence de cette information détruit les interférences quantiques associées aux superpositions. [...] Cette interprétation, popularisée par Wojciech Zurek du laboratoire américain de Los Alamos, cherche à faire émerger le classique du quantique, sans imposer de coupure artificielle entre les deux mondes<sup>17</sup>.

La théorie de la **décohérence** est fondée sur la perte de cohérence, c'est-à-dire une disparition des interférences entre différents paquets de la fonction d'onde. Cette perte de cohérence se produit en raison de l'établissement de multiples interactions entre le système mesuré et son environnement (l'appareil de mesure dans le cas d'une mesure). D'une certaine façon, la **décohérence** n'est rien d'autre que le processus à l'œuvre lors de la séparation des paquets d'ondes qui a lieu lors d'une mesure (exposé précédemment, cf. 3.2.1<sup>18</sup>).

Aussi, il nous faut reprendre le raisonnement de **von Neumann** (et **Bohm**) relatif au processus de mesure (cf. 3.2.1). Lors de l'interaction entre le système et l'appareil de mesure, la fonction d'onde de ce dernier

15. Citons parmi elles : la théorie des « multivers d'Everett » (LOUJOZ 2017), les « histoires consistantes » de Robert B. Griffiths, Roland Omnès, Murray Gell-Mann, « Contextes, Systèmes et Modalités » d'Alexia Auffèves et Philippe Grangier (AUFFÈVES 2016), « le solipsisme convivial » d'Hervé Zwirn (ZWIRN 2020).

16. La discussion est menée par Bacciagaluppi (BACCIAGALUPPI 2020).

17. La citation est issue d'un article de vulgarisation écrit par trois chercheurs contemporains dont le lauréat du prix Nobel Serge Haroche (HAROCHÉ, RAIMOND et BRUNE 1997). J'ai supprimé de la citation la phrase suivante – à laquelle je ne souscris pas : « l'environnement "mesure" ainsi en permanence l'état des systèmes macroscopiques et les force à choisir entre les états possibles, éliminant toutes les superpositions bizarres (chat "vivant" et "mort" par exemple) » car cette assertion confond **décohérence** et fin de la **superposition**.

18. On pourrait dire que **Bohm**, lorsqu'il décrit ce processus de mesure (David BOHM 1952, sous partie "QUANTUM THEORY OF MEASUREMENTS", pp. 180-182), est en quelque sorte un peu l'« inventeur » de la décohérence : « Concept invented by **Bohm** in 1952 - strictly speaking was the only thing added by him to de Broglie's 1927 pilot-wave theory. It was general lack of understanding of its role in measurement theory in 1920s that led to **de Broglie** being discouraged by people like Pauli. Decoherence arguments began to be discussed again in the 1980s and today they are widely used » (TOWLER 2020).

évolue, et l'on peut l'écrire, à l'instant  $t < \tau$  sous la forme d'une somme de paquets  $\beta_n$  :

$$\phi_m(y,t) = \sum_{n=1}^N \beta_n(y,t)$$

La figure 4.1 présente un exemple d'évolution de  $\phi_m$ . Si dans la phase initiale ( $t$  proche de 0), les différents paquets d'ondes  $\beta_n$  relatifs à l'appareil de mesure se superposent et interfèrent, à la fin du processus (si  $t \gg \tau$ ) les paquets d'ondes de l'appareil ne se chevauchent plus dans l'espace repéré par  $y$  : il n'y a plus d'interaction possible entre chacun de ces paquets d'ondes et donc il n'y a plus d'interférence. Ainsi, parce que les  $\beta(y - y_n)$  ne se recouvrent pas, l'effet de l'intrication disparaît. Il y a de fait « décohérence par l'appareil de mesure »<sup>19</sup>.

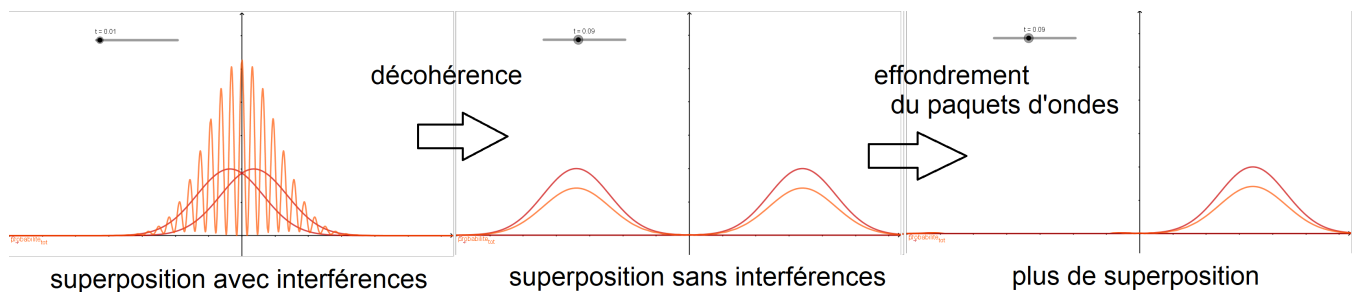


FIGURE 4.1 – Modélisation de l'évolution de  $\phi_m(y,t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\beta_{\frac{1}{2}}(y,t) + \beta_{-\frac{1}{2}}(y,t)]$  où  $\beta_n$  est un paquet d'ondes gaussien. En rouge :  $|\beta_n(y,t)|^2$ , en orange  $|\phi_m(y,t)|^2$  en fonction de  $y$  (la date  $t$  est fixée).

À gauche ( $t < \tau$ ) : il y a superposition de deux paquets d'ondes qui se recouvrent et donc interfèrent.

Au centre ( $t \gg \tau$ ) : il y a superposition de deux paquets d'ondes qui sont disjoints et n'interfèrent donc plus.

À droite ( $t \gg \tau$ ) : il n'y a plus de superposition car un seul paquet d'ondes subsiste.

Le passage du schéma de gauche à celui du centre est un exemple de **décohérence** ; tandis que le passage du schéma du centre à celui de droite est un exemple d'**effondrement du paquet d'ondes**.

### La décohérence est due aux interactions du système étudié avec l'environnement

Si la **décohérence** est un processus mis en œuvre volontairement lors du processus de mesure, elle s'établit aussi sans décision d'un opérateur, dès lors que le système microscopique n'est pas parfaitement isolé. La **décohérence** se produit en effet en raison de l'établissement de corrélations entre le système mesuré et son environnement. D'ailleurs, plus l'objet est plus grand, plus vite cela se produit. Un des grands succès de la théorie de la décohérence réside en l'estimation de la durée nécessaire à la décohérence, c'est-à-dire à la disparition des phénomènes d'interférence dans une **superposition**, suivant les interactions entre le système et son environnement.

Dans le cas d'une mesure, la **décohérence** est compatible avec les axiomes de SQM et permet donc d'éliminer la distinction entre microscopique (gouverné par SQM) et macroscopique (qui suit les lois de la physique classique), en expliquant l'évolution – selon l'**équation de Schrödinger** – de l'appareil de mesure vers une **superposition** de paquets d'ondes qui n'interfèrent plus entre eux. C'est l'autre grand succès de la **décohérence** que d'avoir permis de comprendre ainsi un peu mieux la transition quantique - classique.

19. BOUCHENE 2017.

## Si, grâce à elle, l'articulation problématique entre microscopique et macroscopique disparaît, la décohérence n'explique pas l'effondrement du paquet d'ondes dont la nécessité subsiste

Résumons :

La théorie de la décohérence [...] est aujourd'hui largement acceptée par la communauté des physiciens. Néanmoins, il règne une certaine confusion concernant la portée de cette théorie. Certains physiciens pensent qu'elle résout le problème de la mesure. La diffusion de cette idée a notamment été favorisée par certaines affirmations ambiguës de Zurek dans ses premiers articles. Toutefois, il est reconnu aujourd'hui par la majorité des spécialistes que la théorie de la décohérence ne résout pas le problème de la mesure<sup>20</sup>.

Cohen-Tannoudji résume tout à fait ce qu'est – et n'est pas – la **décohérence** :

les propriétés ondulatoires (interférences) ont disparu grâce aux interactions avec l'environnement et la fonction d'onde apparaît comme une superposition de nombreux états (les états propres associés aux valeurs propres, seules mesures possibles) qui n'interfèrent plus entre eux. Cependant, en aucun cas, la décohérence n'explique l'unicité du résultat final de la « mesure », ni de façon plus générale l'unicité du monde macroscopique<sup>21</sup>.

Ainsi, si la **décohérence** est pertinente pour expliquer – en partie – l'émergence de la « classicalité » elle ne peut, en aucun cas, permettre de se passer de l'axiome d'**effondrement du paquet d'ondes** qui est nécessaire en SQM pour assurer l'unicité du résultat (cf. figure 4.1).

Autrement dit, la **décohérence** ne permet pas de résoudre en totalité le problème de la mesure SQM : si l'articulation problématique entre microscopique et macroscopique disparaît, la nécessité d'un **effondrement du paquet d'ondes** subsiste, et la **décohérence** n'explique ni comment ni par quoi est générée la discontinuité de l'évolution de la fonction d'onde.

### 4.3 La dissolution du « problème de la mesure » par BQM

Etudions maintenant la gestion par BQM du processus de mesure pour voir si se pose aussi pour cette théorie un « problème de la mesure ».

#### La mesure en BQM est un processus comme un autre qui n'implique aucune règle spécifique

En BQM, la mesure est le résultat « naturel » de l'évolution de la fonction d'onde qui se produit, selon l'**équation de Schrödinger**, sans rupture ni intervention d'axiomes spécifiquement dédiés (voir 3.2.3). « Il n'est aucun besoin d'introduire deux postulats différents pour la dynamique quantique. Le processus de mesure est un processus physique d'interaction tout à fait ordinaire »<sup>22</sup>.

En fait, la mesure est le résultat d'une interaction entre le système étudié (disons une particule quantique) et un appareil de mesure, et est traitée par **Bohm** de façon exactement « similaire au problème impliquant l'interaction entre deux particules dans un processus de diffusion »<sup>23</sup>. De ce point de vue, la mesure ne présente rien de spécifique pour BQM puisqu'il s'agit d'un processus comme un autre.

20. BÄCHTOLD 2009, pp. 82-83.

21. COHEN-TANNOUJJI 2010.

22. LALOË 2014, p. 237.

23. David BOHM 1952, p. 181, ma traduction.

## La mesure en BQM ne présuppose pas de division microscopique / macroscopique ni quantique / classique

Puisque la mesure est traitée par [Bohm](#) de façon similaire à une interaction entre deux particules, l'appareil de mesure est donc, du point de vue BQM, purement quantique<sup>24</sup>. Ceci est rendu possible en particulier par le fait de formaliser le processus de mesure (cf. [3.2.1](#)) *in fine* comme la détection d'une position (celle du pointeur de l'appareil de mesure). Comme cette position est définie pour BQM (c'est un « beable »), le comportement classique de l'appareil de mesure vient de la « réalité » sous-jacente de la position du pointeur. En effet, l'observation de la position de l'« aiguille » de l'appareil de mesure, qui est selon BQM une « variable cachée », fait justement que cette variable n'est plus « cachée ». Avec BQM « la [décohérence](#) assure automatiquement l'unicité macroscopique, contrairement à la théorie standard où l'application d'un postulat est nécessaire pour supprimer des branches du vecteur »<sup>25</sup> ou, dit autrement, des paquets d'ondes (pour n'en conserver plus qu'un).

Ainsi BQM, contrairement à SQM, ne fait aucune distinction entre macroscopique et microscopique et traite la totalité du système et de l'appareil de mesure de façon quantique sans faire référence à un comportement classique, « ce qui réintroduit une unité dans la théorie et évite toute distinction entre mondes mesurant et monde mesuré »<sup>26</sup>.

### La mesure en BQM est détachable de l'observateur

De même, BQM, contrairement à SQM, ne fait aucun appel à un observateur ni à une conscience. Elle réussit totalement à éliminer tout rôle de l'observateur au cours des mesures. En présentant une mesure détachée de tout observateur, BQM permet de restaurer une vision classique de la physique puisqu'aucune mention explicite de l'observateur n'est nécessaire au sein de la théorie. BQM permet des interprétations – dites réalistes – qui postulent l'existence d'un monde indépendant, qu'une mesure ait été effectuée ou non sur ce monde réel.

### BQM n'est pas une solution au problème de la mesure, mais présente en fait une absence de problème, ce qui lui confère sur ce sujet une grande supériorité sur SQM

BQM fournit « une solution élégante au problème de la mesure grâce aux ondes vides qui disparaissent de la superposition de la fonction d'onde à la fin d'une mesure »<sup>27</sup>. Aussi BQM élimine les postulats liés au processus de mesure, sans parler du fait que ces postulats sont peu convaincants en SQM.

Pour conclure, les différents points critiquables (*les* problèmes de la mesure) de SQM ont disparu dans BQM, dans le cadre de laquelle, plus exactement, il n'y a pas de problème de la mesure. C'est un « grand succès de la théorie [BQM] »<sup>28</sup> que de dissoudre le problème épineux de la mesure pour SQM. Il n'est pas étonnant que les bohmiens mettent l'accent sur la supériorité de BQM sur ce point<sup>29</sup>. Mais les physiciens et

24. « For any quantum experiment we merely take as the relevant Bohmian system the combined system, including the system upon which the experiment is performed as well as all the measuring instruments and other devices used to perform the experiment (together with all other systems with which these have significant interaction over the course of the experiment) » (GOLDSTEIN 2017).

25. LALOË 2014, p. 237.

26. LALOË 2014, p. 237.

27. PASSON 2005, pp. 3-4, ma traduction.

28. LALOË 2014, p. 237.

29. Par exemple, l'auteur d'un article dont le titre est « Why isn't every physicist a Bohmian ? » qui ne laisse aucun doute sur sa préférence pour BQM : « Bohmian mechanics is an alternative interpretation of quantum mechanics. [...] Most notably it does

les philosophes de la physique qui connaissent BQM – sans être nécessairement adeptes de cette théorie – reconnaissent aussi sa supériorité pour ce qui concerne la mesure, comme l’attestent les échanges suivants :

Franck Laloë [physicien français né en 1940] nous a exposé la théorie de l’onde pilote, en insistant sur ses côtés positifs, en particulier le fait qu’on peut considérer qu’elle résout le problème de la mesure de façon plus convaincante que les autres méthodes, dont la théorie de la décohérence.<sup>30</sup>

Michel Bitbol [philosophe des sciences français né en 1954] : en décohérence standard, on peut très bien avoir perte des effets d’interférence sans apparition d’unicité. On n’a pas encore démontré (et sans doute n’y arrivera-t-on jamais) que la décohérence peut faire émerger l’unicité du résultat expérimental<sup>31</sup>.

Hervé Zwirn [physicien et épistémologue français né en 1954] : il est possible d’exprimer cette théorie [BQM] sans faire référence à aucun observateur – ce que ne permet pas la mécanique quantique [SQM]. La première chose consisterait donc à dire que grâce à la théorie de [Bohm](#), nous pouvons rester réalistes (dans un sens un peu différent du réalisme classique) puisque nous pouvons nous passer de l’observateur<sup>32</sup>.

Bernard d’Espagnat [physicien français, 1921 – 2015] : Pour ce qui est de la résolution du problème de la mesure j’estime [...] que la théorie de [Bohm](#) est hautement plus sympathique, si je puis dire, que n’importe quelle autre.<sup>33</sup>

Le moins qu’on puisse reconnaître à BQM est que l’élégance dont elle fait preuve dans sa gestion de la mesure est particulièrement séduisante. Au delà de cette élégance, BQM fournit un compte rendu de la mesure là où SQM n’en fournit aucun.

---

provide a simple solution to the infamous measurement problem of quantum mechanics » (PASSON 2006, résumé).

30. LALOË 2014, p. 261.

31. LALOË 2014, Citation de Bitbol p. 239.

32. LALOË 2014, Citation de Zwirn p. 250.

33. LALOË 2014, Citation de d’Espagnat p. 267.



# Chapitre 5

## Simplicités comparées de BQM et SQM

### 5.1 Différentes composantes de la simplicité

**Vouloir comparer les simplicités de SQM et BQM nécessite de lister les différents sens qu'on peut attribuer à la « simplicité »**

Dans ce chapitre, nous allons comparer SQM et BQM en terme de simplicité. La simplicité d'une chose est, pour cette dernière, la qualité

- de ce qui n'est pas composé ou décomposable ;
- de ce qui est facile à comprendre ;
- de ce qui est facilement utilisable ou réalisable ;
- de ce qui est dépouillé d'éléments non indispensables <sup>1</sup>.

Le premier point n'est évidemment pas pertinent pour comparer deux corpus théoriques, nécessairement composés de nombreux éléments. Il nous faut scinder la discussion qui suit sur la simplicité comparée de SQM et BQM en trois parties qui seront associées aux trois dernières qualités listées dans la définition que l'on vient de donner.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à la simplicité en tant que qualité de ce qui est dépouillé d'éléments non indispensables. La discussion se portera sur une comparaison des formalismes (voir sous-partie 5.2). Il s'agira de comptabiliser les éléments des deux formalismes (celui de SQM et celui de BQM) pour voir si l'un des deux est plus simple au sens où il engage moins d'éléments, ou bien si au contraire il utilise des éléments non indispensables.

Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons à la simplicité en tant que qualité de ce qui est facilement utilisable ou réalisable. Il s'agira alors d'une comparaison des simplicités opérationnelles (voir sous-partie 5.3), c'est-à-dire des processus opérationnels engagés dans le cas de SQM et dans le cas de BQM.

Il nous faudra enfin nous intéresser à la simplicité comparée de SQM et BQM au sens de « ce qui est facile à comprendre ». Disons donc quelques mots à ce sujet, avant de développer notre propos dans un chapitre ultérieur (voir chapitre 6).

---

1. Définition du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales disponible à l'adresse <https://www.cnrtl.fr/definition/simplicité>.

## La comparaison des simplicités de SQM et BQM au sens de « ce qui est facile à comprendre » est assez subjective

Nous paraît facile à comprendre ce à quoi on est habitué. Cela dépend de la biographie scientifique de chacun, de ses études antérieures et de sa personnalité. C'est donc tout à fait subjectif. C'est également directement relié à l'« intuition » et engage une discussion approfondie sur des points que la didactique éclairera. Cela fera l'objet d'un chapitre spécifique (voir chapitre 6).

## 5.2 Simplicité formelle

### 5.2.1 SQM nécessite moins d'objets mathématiques pour définir l'état du système

#### Le rasoir d'Ockham est souvent invoqué contre BQM

Commençons par nous intéresser à la simplicité en tant que qualité de ce qui est dépouillé d'éléments non indispensables. À ce propos, le « rasoir d'Ockham » est souvent invoqué pour préférer SQM à BQM<sup>2</sup>. Commençons donc par définir ce rasoir philosophique :

Le Rasoir d'Ockham est un principe méthodologique, en particulier dans le contexte de questions ontologiques, selon lequel la philosophie et la science devraient supposer aussi peu d'entités théoriques que possible à des fins de justification, explication, définition, etc. Il apparaît en deux versions : « Pluralitas non est ponenda sine necessitate » [Aucune entité ne devrait être inutile] et « Frustra fit per plura, quod potest fieri per pauciora » [Il est vain d'employer plus de moyens, là où cela peut se faire avec moins d'entre eux] ; la forme souvent citée « Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem (sine necessitate) » (les entités ne doivent pas être multipliées au-delà du nécessaire) n'existe pas chez Ockham. [...] Ockham s'oppose aux termes pseudo-explicatoires ou autres termes sans signification ou superflus. [...] Le principe de parcimonie est le plus proche de la version d'origine en demandant une prudente discrétion avant de créer de nouveaux termes et concepts<sup>3</sup>.

Le principe de parcimonie auquel le rasoir d'Ockham fait référence va nous demander de « compter » en quelque sorte les objets et les règles mis en jeu par SQM et BQM. Il nous faudra considérer plus tard l'intérêt de l'introduction de tels objets.

#### La parcimonie des concepts utilisés est un des points caractéristiques de SQM

En rejetant toute réalité associée aux objets auxquels elle s'intéresse, et en utilisant un unique objet mathématique pour déterminer tout ce que l'on peut dire de la réalité, en affirmant donc la complétude de la description de la réalité par la fonction d'onde  $\Psi$ , SQM revendique une économie évidente. Mais cette parcimonie est à relativiser. En effet, l'évolution de  $\Psi$  via l'équation de Schrödinger<sup>4</sup> demande la spécification du potentiel dans lequel évolue le système, d'une part, et l'évolution brutale de  $\Psi$  (l'effondrement du paquet d'ondes) lors d'une mesure, d'autre part, met en jeu un appareillage extérieur non défini et une interaction du système étudié avec cet appareil.

2. Voir en particulier les critiques *contra* BQM que reportent – pour y répondre – des articles *pro* BQM (HARDY 1996, p. 67), (PASSON 2005, p. 4), (PASSON 2006, p. 8), (TOWLER 2020).

3. GERNERT 2007, pp. 1-2.

4. ou celle de Dirac si la particule considérée est relativiste.

## En ajoutant les positions à la fonction d'onde, BQM est moins simple que SQM

SQM, pour qui toute l'information réside dans la fonction d'onde, peut sembler certes plus simple que BQM. En effet, BQM ajoute à cette fonction d'onde la notion complémentaire de position des particules. Mais, si cette « variable cachée », ajoutée à la fonction d'onde, est bien supplémentaire, on peut se demander si elle ne spécifie davantage l'état du système. La question se reformule de la façon suivante : est-ce que les trajectoires bohmiennes apportent quelque chose qui ne réside pas déjà dans la fonction d'onde ?

### Puisque BQM est moins simple que SQM sans apporter de prédictions différentes, elle pourrait être à rejeter selon le « rasoir d'Ockham »

Les prédictions de SQM et de BQM sont les mêmes : les probabilités de mesure sont identiques pour les deux théories à partir du moment où le système a la même fonction d'onde<sup>5</sup>. Et ceci, alors que BQM utilise des variables supplémentaires, les positions. On pourrait penser que ces variables supplémentaires (les positions) ne sont pas nécessaires du point de vue des prédictions, puisque la détermination des résultats possibles de mesures et des probabilités de ces possibles réside entièrement dans la fonction d'onde.

L'analyse que l'on vient de faire conforte le rejet de BQM selon le rasoir d'Ockham et la préférence accordée à SQM du fait d'une plus grande simplicité formelle. Mais on ne peut s'arrêter au décompte des objets utilisés par SQM et BQM.

## 5.2.2 BQM utilise moins d'axiomes

Si SQM utilise moins de variables que BQM, la rendant plus simple du point de vue formel, nous allons comparer maintenant les corpus axiomatiques de ces deux théories.

### SQM a plus d'axiomes que BQM car certains axiomes SQM sont spécifiquement dédiés au problème de la mesure

On peut fonder SQM sur six axiomes (cf. annexe C.1) alors que BQM est fondée, elle, sur trois axiomes (cf. annexe C.2), c'est-à-dire deux fois moins. Il n'est bien sûr pas suffisant de compter le nombre d'axiomes sur lesquels une théorie est fondée pour la comparer à une autre en terme de simplicité (puisque le décompte des entités utilisées – fait précédemment – est aussi à prendre en compte). Il est plutôt intéressant de se demander pourquoi SQM mobilise plus d'éléments dans son corpus axiomatique que BQM.

Ce qui est notable c'est que SQM introduit des éléments axiomatiques à portée spécifique : le principal postulat SQM spécifique à la mesure est celui d'[effondrement du paquet d'ondes](#) qui est là pour apporter une réponse *ad hoc* au « problème de la mesure » (cf. partie 4.1). Nous avons vu (cf. partie 4.3) qu'au contraire en BQM aucun problème de mesure n'existant et l'évolution se faisant pendant la mesure toujours selon l'[équation de Schrödinger](#), aucun axiome spécifique n'a besoin d'être invoqué.

---

5. Certes, les partisans de BQM peuvent invoquer une caractéristique « rétrodictive » aux trajectoires bohmiennes : partant de la position mesurée de la particule, on peut remonter le temps le long de sa trajectoire bohmienne et savoir où elle se trouvait avant qu'on ne la détecte. Mais aucune mesure ne permet de confirmer ou d'infirmer cette rétrodiction.

**Puisque SQM a plus d'axiomes que BQM pour régler de façon *ad hoc* le problème de la mesure, elle pourrait être à rejeter selon le « rasoir d'Ockham »**

Certes, BQM introduit, avec l'équation de guidage (ou l'équation de la dynamique bohmiennne pour sa version avec le potentiel quantique), une loi de plus dans ses axiomes non présente en SQM. Mais globalement, le décompte des axiomes est à l'avantage de BQM qui en possède moins.

L'idée sous-jacente du « principe de parcimonie » selon Ockham est plutôt d'exclure, autant que faire se peut, l'introduction d'éléments axiomatiques à portée spécifique, comme c'est le cas en SQM pour résoudre le problème de la mesure. De ce point de vue, le rasoir d'Ockham serait tout à fait favorable à BQM plutôt qu'à SQM.

### 5.2.3 BQM et SQM présentent une simplicité formelle équivalente

A ce point de la discussion, le rasoir d'Ockham peut disqualifier alternativement SQM et BQM selon que l'on considère les ajouts de variables (les positions en plus de la fonction d'onde pour BQM) ou d'axiomes (le postulat d'effondrement du paquet d'ondes en plus de celui d'évolution selon l'équation de Schrödinger pour SQM). Une certaine symétrie semble se dessiner.

#### Il est possible de mettre en parallèle les éléments des formalismes de SQM et BQM

Ainsi, « la théorie [BQM] complète la mécanique quantique ordinaire [SQM] par une équation de mouvement pour les particules quantiques, mais élimine les postulats liés au processus de mesure »<sup>6</sup>. Si BQM ajoute des variables et des lois à SQM, qui de son côté a plus d'axiomes, un équilibre est peut-être sous-jacent. Je me propose dans ce qui suit de mettre en regard trois types de postulats en BQM et SQM.

- On peut commencer par regrouper sous le terme de « postulats descriptifs » à la fois les axiomes mais aussi les concepts qui ont trait à la description du monde quantique proposée par chacune des deux théories. En SQM, il s'agit des postulats de description de l'état d'une particule quantique (par la fonction d'onde  $\Psi$ <sup>7</sup>) et de celui relatif aux grandeurs physiques (grâce aux opérateurs  $\hat{A}$  et à ses valeurs propres, seuls résultats possibles). Ces axiomes peuvent être mis en regard de ce qui fonde la description en BQM à la fois par la fonction d'onde  $\Psi$  et aussi par une variable supplémentaire (la position  $\vec{r}(t)$ ).
- Les postulats d'évolution font apparaître l'équation de Schrödinger (présente en SQM et BQM). Il faut ajouter l'effondrement du paquet d'ondes pour SQM qui est l'évolution que subit  $\Psi$  lors de la mesure en SQM. Pour BQM, il existe une loi d'évolution de la trajectoire de la particule guidée par  $\Psi$  (l'équation de guidage ou, si l'on préfère, l'équation de la dynamique bohmiennne).
- Enfin, il serait possible de mettre en regard les postulats relatifs aux probabilités de mesure. Il s'agit de la règle de Born pour SQM et de l'équilibre quantique pour BQM. Ces probabilités permettent d'accéder aux mesures moyennes (cf. annexe C.4).

L'analogie entre les constructions formelles de SQM et BQM est résumée dans le tableau 5.1.

6. PASSON 2005, p. 4, ma traduction.

7. ou le vecteur  $|\Psi(t)\rangle$ .

théorie	SQM	BQM
éléments descriptifs	$\Psi = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n$ décrit l'état $\hat{A}$ de vecteurs propres $\{\alpha_n\}$ décrit la mesure	$\Psi$ décrit toutes les trajectoires possibles $\vec{r}$ décrit la trajectoire de la particule
postulats d'évolution	avant la mesure : $\Psi$ suit Schrödinger mesure : effondrement du paquet d'ondes	tout le temps : $\Psi$ suit Schrödinger tout le temps : $\Psi$ guide la particule
postulats relatifs à la mesure	probabilité de mesure de la valeur propre $a_n$ selon la règle de Born $\mathcal{P}_n =  c_n ^2$ $\langle \mathcal{A} \rangle = \int \Psi^* \hat{A} \Psi d\tau$	probabilité de présence de la particule selon l'équilibre quantique $\rho =  \Psi ^2$ $\langle \mathcal{A} \rangle = \int \rho A_B d\tau$

TABLE 5.1 – Tableau récapitulatif des éléments et règles constitutifs de SQM et BQM.

**SQM et BQM présentent une simplicité formelle équivalente si sont pris en compte les axiomes et les objets impliqués**

Il apparaît que, si BQM ajoute la position de la particule comme variable supplémentaire, SQM ajoute – dans ses axiomes – des « objets » supplémentaires (les opérateurs et leurs valeurs propres) qui ont trait à la mesure. De même, un postulat d'évolution est ajouté dans chacune des théories : l'effondrement du paquet d'onde pour  $\Psi$  dans SQM et celui qui détermine l'évolution de la trajectoire dans BQM par le guidage par la fonction d'onde. Les probabilités de mesure (et partant, les moyennes des mesures) sont données en SQM par un axiome (la règle de Born) dont le pendant en BQM est aussi un axiome (l'équilibre quantique qui donne  $\rho$ ).

BQM utilise les trajectoires (et la variable supplémentaire « position ») avec sa loi d'évolution due au guidage par la fonction d'onde. C'est ce point marquant qui lui confère souvent le nom de « théorie de l'onde pilote ». SQM de son côté postule le fait que la fonction d'onde doit s'effondrer<sup>8</sup> lors d'une mesure dans un paquet d'onde qui correspond à un vecteur propre d'une « fonction supplémentaire », l'opérateur - observable, auquel BQM ne fait pas appel.

**Aussi, il n'est pas convaincant d'évoquer le « rasoir d'Ockham » pour préférer SQM ou BQM**

Cette mise en parallèle des objets et règles formelles de SQM et BQM montre qu'il y a un équilibre où les deux théories se répondent. Aucune des deux ne peut être rejetée selon le rasoir d'Ockham car la suppression d'axiomes pour résoudre le problème de la mesure est contrebalancé par l'ajout de variables supplémentaires : l'introduction des trajectoires est « le prix à payer » pour se passer du postulat d'effondrement du paquet d'ondes.

8. On pourrait qualifier SQM de « théorie de l'onde qui s'effondre »...

## 5.3 Simplicité opérationnelle

### 5.3.1 La voie « analytique » de BQM est plus compliquée que SQM à cause de la détermination des trajectoires bohmiennes

Passons maintenant à l'étude de la simplicité en tant que qualité de ce qui est facilement utilisable ou réalisable : nous allons comparer BQM et SQM en terme de simplicité opérationnelle.

#### En SQM, il suffit de déterminer la fonction d'onde

En SQM, toute l'information est dans  $\Psi$ . Il s'agit donc de déterminer la solution  $\Psi(\vec{r}, t)$  de l'équation de Schrödinger. De façon à faire apparaître les coefficients  $c_n$  qui donnent (selon la règle de Born) accès aux probabilités des mesures accessibles  $a_n$  dans le cas d'une observable  $\hat{A}$ , il peut être nécessaire de transformer son expression afin d'obtenir  $\Psi$  sous la forme

$$\Psi = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n$$

où les  $\alpha_n$  sont des vecteurs propres de valeurs propres  $a_n$ .

#### Aussi, BQM peut sembler plus compliquée du point de vue opératoire du fait de la détermination des trajectoires

Pour BQM, une fois la fonction d'onde  $\Psi$  déterminée, le travail continue pour déterminer la trajectoire si l'on prend une condition initiale ou les trajectoires pour plusieurs conditions initiales. Du fait de la sensibilité aux conditions initiales, de nombreuses conditions initiales proches peuvent donner lieu à des trajectoires très différentes.

En ajoutant la détermination des trajectoires BQM, on complexifie le point de vue opératoire :

si l'on veut aller plus loin et faire comme Holland, c'est-à-dire montrer des trajectoires explicites et donc faire plus que la mécanique quantique standard, c'est là que de nouveaux calculs deviennent nécessaires, qui peuvent être difficiles<sup>9</sup>.

Certains physiciens trouvent ces calculs additionnels particulièrement ardues, à l'instar de Le Bellac, un enseignant-chercheur (né en 1939), qui déclare :

la mathématique complète [...] par exemple dans l'ouvrage de Peter Holland, est absolument abominable. Je n'ai pas pu aller jusqu'au bout. [...] Ce sont des équations absolument épouvantables<sup>10</sup>.

En fait, l'outil informatique s'avère indispensable, aucune résolution littérale n'étant possible. Malgré tout, les règles BQM pour accéder aux trajectoires sont simples à édicter. C'est leur mise en œuvre qui est compliquée comme on va le voir.

9. LALOË 2014, p. 234.

10. LALOË 2014, Déclaration de Le Bellac pp. 233-234.

## La détermination des trajectoires BQM est compliquée surtout par l'introduction du potentiel quantique

Connaissant à un instant donné la position de la particule, pour déduire de la fonction d'onde

$$\Psi(\vec{r}, t) = R \exp\left(i \frac{S}{\hbar}\right)$$

toutes les positions  $\vec{q}(t)$  occupées au cours du temps (dans son passé comme dans son futur) par la particule, c'est-à-dire la trajectoire de cette dernière, on peut indifféremment utiliser deux méthodes. Le tableau 5.2 récapitule les opérations à effectuer suivant la méthode choisie.

— soit on utilise l'équation de guidage :

$$m \frac{d\vec{q}}{dt} = m \vec{v}(t) = \overrightarrow{\text{grad}} S(\vec{r} = \vec{q}(t))$$

Il s'agit donc, préalablement de déterminer à partir de la fonction d'onde  $\Psi$  l'action  $S(\vec{r}, t)$ . Dans la mesure où l'on en déduit les vitesses grâce au gradient de  $S$ , il convient de dériver  $S$  pour obtenir le champ de vitesse  $\vec{v} = \frac{\overrightarrow{\text{grad}} S}{m}$ . Enfin, puisque les vitesses coïncident en eulérien et en lagrangien si la particule est en  $\vec{r} = \vec{q}(t)$ , il faut intégrer une fois cette équation différentielle du premier ordre pour trouver la position  $\vec{q}(t)$ . Il suffit de se donner comme condition initiale uniquement la position  $\vec{q}(t = t_0)$  de la particule à  $t = t_0$  pour déterminer la constante d'intégration.

— soit on utilise l'équation de la dynamique bohmiennne :

$$m \frac{d^2 \vec{q}}{dt^2} = m \vec{a} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) - \overrightarrow{\text{grad}}(Q)$$

Selon cette méthode, il faut préalablement déduire de la fonction d'onde  $\Psi$  son module  $R(\vec{r}, t)$ . Ensuite, puisque l'on déduit l'accélération  $\vec{a}$ , via les potentiels classique  $V$  et quantique  $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R}$ , il convient de calculer ce potentiel quantique en opérant une double dérivation. Il faut ensuite intégrer deux fois (car il s'agit cette fois d'une équation du second ordre) pour trouver la position au cours du temps. Cette double intégration nécessite la donnée de deux conditions initiales (en position  $\vec{q}(t = t_0)$  et vitesse  $\vec{v}(t = t_0)$ ). Le plus simple est alors d'utiliser l'équation de guidage à l'instant initial :  $m \vec{v}(t = t_0) = \overrightarrow{\text{grad}} S(\vec{r} = \vec{q}(t = t_0))$ .

De toute évidence la première méthode (utilisant l'équation de guidage plutôt que le potentiel quantique pour déterminer l'accélération) est plus simple. L'utilisation du potentiel quantique a donc pour effet d'augmenter la complexité opérationnelle et la recherche de solutions à l'équation de guidage est opérationnellement plus facile que si l'on utilise l'équation de la dynamique bohmiennne.

S'il peut être bien utile<sup>11</sup>, le potentiel quantique n'a donc pas que des avantages. Mais le potentiel quantique n'a rien de fondamental, il n'apparaît pas dans les axiomes de BQM que nous avons présentés. Autrement dit, on peut très bien se passer du potentiel quantique en BQM ! Certains bohmiens préconisent d'ailleurs d'oublier le concept de potentiel quantique<sup>12</sup>.

Pour la comparaison avec SQM, il convient de retenir la version opérationnellement la plus simple de BQM, c'est-à-dire celle utilisant l'équation de guidage plutôt que l'équation de la dynamique bohmiennne.

11. En particulier, le potentiel quantique  $Q$  permet de passer à la limite classique de façon très élégante, cf. 2.3.2.

12. « Bohm's "quantum potential" is, like the "luminiferous ether", a concept best abandoned » note un physicien bohmienn (VALENTINI 1996).

	équation de guidage	équation de la dynamique bohmiennne
calcul de	$S = \hbar \arg(\Psi)$	$R =  \Psi $
dérivation	simple : $\overrightarrow{\text{grad}}(S)$	double : $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R}$
dérivation		simple : $-\overrightarrow{\text{grad}}(Q)$
intégration	simple : $m \frac{d\vec{q}}{dt} = \overrightarrow{\text{grad}}(S)$	double : $m \frac{d^2\vec{q}}{dt^2} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) - \overrightarrow{\text{grad}}(Q)$
constante(s)	$\vec{q}(t = t_0)$	$\vec{q}(t = t_0)$
d'intégration		$\vec{v}(t = t_0)$

TABLE 5.2 – Tableau récapitulatif des opérations à effectuer pour déterminer les trajectoires BQM.

### 5.3.2 La voie « synthétique » de BQM, alternative dans le but de la détermination de la fonction d’onde, est moins simple que SQM

**BQM propose deux voies opérationnelles : la détermination des trajectoires à partir de la fonction d’onde ou l’inverse**

Ce qui vient d’être présenté, c’est-à-dire la détermination des trajectoires une fois la fonction d’onde connue n’est en fait qu’une des deux possibilités opérationnelles offertes par BQM <sup>13</sup> :

- la première voie – nommée voie analytique – vient d’être explicitée. Elle part de la détermination de la fonction d’onde pour arriver aux trajectoires possibles de la particule ;
- l’autre possibilité – nommée voie synthétique <sup>14</sup> – part au contraire de la détermination des trajectoires possibles de la particule pour aboutir à la fonction d’onde.

**Ainsi, BQM ajoute une autre méthode opérationnelle possible de détermination de la fonction d’onde fondée sur les calculs de trajectoires bohmiennes**

Cette seconde voie est fondée sur la vision lagrangienne pour laquelle il s’agit de partir des trajectoires avec les vitesses  $\vec{v}$  (qui coïncident en eulérien et en lagrangien si la particule est en  $\vec{q}(t) = \vec{r}$ ), sans calculer d’abord la fonction d’onde puis déduire de ces trajectoires la fonction d’onde selon l’équation (le détail des calculs est donné en annexe, cf. C.3) :

$$\Psi(\vec{r}(t_1), t_1) = K_{t_0 \rightarrow t_1} \Psi(\vec{r}(t_0), t_0)$$

où le propagateur est

$$K_{t_0 \rightarrow t_1} = \exp\left(-\int_{t=t_0}^{t=t_1} \frac{1}{2} (\text{div}(\vec{v}))_{\vec{r}(t)} dt\right) \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{t=t_0}^{t=t_1} L(t) dt\right) \quad \text{avec } L = E_c - Q - V$$

Il y a là une analogie avec les diagrammes de Feynman <sup>15</sup>.

13. La distinction entre voies analytique et synthétique est développée par (ORIOLS et MOMPART 2012).

14. « In the scientific literature, the Bohmian computing technique to find the trajectories (without directly computing the wavefunction) is also known as a syntectic technique » (ORIOLS et MOMPART 2012, p. 7).

15. « In Feynman’s path integral formulation of quantum mechanics the equivalent propagator may be written as »

$$K_{t_0 \rightarrow t_1} = N \sum_{\text{tous les chemins}} \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{t=t_0}^{t=t_1} L_{\text{classique}}(t) dt\right)$$



Si cette voie synthétique est peu usitée, il n’en reste pas moins que c’est une possibilité offerte par BQM que SQM ne propose pas : la détermination de  $\Psi$  en SQM ne se fait que comme solution de l’équation d’évolution. Reconnaissons tout de même que cette voie synthétique est du point de vue opérationnel moins simple que celle traditionnellement employée pour déterminer  $\Psi$ .

### 5.3.3 SQM est plus simple que BQM du point de vue de la simplicité opérationnelle

**Pour BQM, il est possible de se limiter à la détermination de la fonction d’onde comme dans le cas SQM**

Revenons à la première voie – la voie analytique – qui est la plus utilisée en BQM. Il s’agit, dans un premier temps, de déterminer la solution  $\Psi(\vec{r}, t)$  de l’équation de Schrödinger, comme en SQM. Il est à noter que BQM et SQM sont équivalentes de ce point de vue : il s’agit de déterminer la fonction d’onde à partir de son équation d’évolution (l’équation de Schrödinger) pour faire des prédictions.

Il est possible de faire en BQM la même chose qu’en SQM : déterminer  $\Psi$  et... s’arrêter là ! Il n’y a en effet aucune obligation à déterminer la trajectoire de la particule dans le cadre BQM. C’est une possibilité offerte. D’ailleurs, avant les années 1990<sup>16</sup>, aucune publication scientifique n’a fait état de calcul de telles trajectoires bohmiennes (ce qui n’empêchait pas d’utiliser BQM au même titre que SQM). Aussi, avec BQM, si l’on veut juste retrouver ce que prévoit SQM, il n’y a pas de problème et aucun effort particulier à faire : il s’agit tout simplement de faire les mêmes calculs que ceux de SQM.

**BQM est moins simple que SQM du point de vue opérationnel puisqu’elle propose, en plus de la détermination de la fonction d’onde, la détermination de trajectoires**

BQM du point de vue opérationnel est plus complexe que SQM, en ceci que, si l’on veut connaître les trajectoires, d’autres calculs sont nécessaires, qui n’existent pas en SQM. On peut aller plus loin dans la compréhension des choses diront les physiciens bohmiens, puisqu’on connaît alors les trajectoires des particules (on reviendra plus loin, cf. 6.2.4, sur l’intérêt en terme de représentation mentale que cela peut avoir).

Pour conclure, si BQM peut présenter une complexité opératoire accrue comparativement à SQM (cf. tableau 5.3), il ne faut pas oublier que BQM peut rester « aussi simple » que SQM du point de vue opératoire (si l’on reste à la simple détermination de la fonction d’onde sans s’intéresser aux trajectoires bohmiennes). Une discussion aura lieu plus loin de l’intérêt ou non – pas seulement pédagogique – de la détermination de ces trajectoires (cf. chapitre suivant 6).

théorie voie	SQM	BQM analytique	BQM synthétique
détermination de $\Psi$	nécessaire	nécessaire	facultative
détermination de la trajectoire	sans objet	facultative	nécessaire

TABLE 5.3 – Tableau récapitulatif des éléments opérationnels pour SQM et BQM.

avec  $L_{\text{classique}} = E_c - V$  (TOWLER 2020).

16. Le premier article qui présente des calculs de trajectoires bohmiennes est celui de Holland en 1993 (HOLLAND 1993).



# Chapitre 6

## Intelligibilité comparée de SQM et BQM

### 6.1 Représentations mentales de SQM et BQM

#### 6.1.1 Les représentations mentales procédurales pour SQM et BQM : robustes

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la simplicité comparée de SQM et BQM au sens de « ce qui est facile à comprendre », c'est-à-dire de l'intelligibilité.

#### **La mécanique quantique est accusée d'être incompréhensible, ce qui implique un défaut de représentation mentale que l'on peut s'en faire**

C'est quasiment un lieu commun, partagé par l'homme de la rue mais aussi par les physiciens, que de dire que la mécanique quantique est complexe, difficile à saisir, voir incompréhensible. Un quanticien et vulgarisateur, Richard Feynman, a déclaré que « personne ne comprend vraiment la physique quantique ». Par physique quantique, il faut bien sur entendre ici SQM, puisque c'est la seule qui soit connue du grand public (et même de la plupart des physiciens), mais la question de l'intelligibilité se pose aussi pour BQM. Pour s'intéresser au problème de l'intelligibilité de SQM aussi bien que de BQM (et en faire une étude comparative), il nous faut nous demander ce que c'est que « comprendre vraiment » la physique quantique et, pour ce faire, il nous faut préalablement définir les différentes représentations mentales que l'on peut associer à SQM et BQM.

#### **Les représentations mentales peuvent être déclinées sous diverses formes (procédures, concepts, images), qu'il s'agit d'étudier spécifiquement**

Le concept de « représentation mentale » est utilisé dans divers champs des sciences humaines (sociologie, psychanalyse, neurosciences...). Par la suite, nous nous fonderons sur les différentes formes que peuvent prendre les représentations mentales, telles que définies dans l'extrait suivant :

Depuis un siècle, les psychologues ont [...] identifié trois grands types de représentations mentales : les procédures, les images mentales et les concepts. [...]

À la différence de l'image mentale, le concept ne possède pas de caractère figuratif. [...] Il est une représentation générale et abstraite d'un objet ou d'une classe d'objets, ayant des propriétés qualitatives communes (forme, couleur, taille) ou des propriétés fonctionnelles communes (les chiens). C'est un objet logique stable, caractérisé d'un double point de vue en compréhension (l'ensemble des caractères qui le définit) et en extension (l'ensemble des objets auxquels le concept s'étend).

Les représentations procédurales, quant à elles, sont mises en œuvre dans l'exécution d'une tâche. Elles sont, parfois, verbalisées sous forme de recettes et correspondent à la catégorie des connaissances non verbales. Elles sont obtenues au cours d'un apprentissage par l'action <sup>1</sup>.

Commençons donc par étudier ces dernières, les représentations procédurales, qui sont, au moins en partie pour ce qui concerne la détermination de  $\Psi$  (cf. 5.3.1), communes à SQM et BQM.

### La détermination de la fonction d'onde procure une représentation mentale de type procédural particulièrement robuste en SQM et BQM

Jean Dalibar, un enseignant-chercheur en physique quantique né en 1958, a fait un commentaire sur le caractère compréhensible ou non de SQM :

Il n'y a aucun flou dans la démarche à suivre pour aborder un nouveau problème avec les outils de la mécanique quantique ; ils ne souffrent pas d'ambiguïté, chacun peut suivre l'intégralité du chemin conduisant des premiers principes jusqu'aux prédictions pour un schéma expérimental donné, et ces prédictions sont (jusqu'à maintenant) en accord avec les résultats mesurés. Bien sûr, « prédire n'est pas expliquer » comme l'a écrit René Thom, qui n'était par ailleurs pas tendre avec la théorie quantique, mais cette mécanique quantique est bien plus qu'une machine à prédire : elle fournit un cadre général pour la description du monde physique [...]. Dans ces conditions, dire « qu'on ne comprend pas » me semble difficilement... compréhensible <sup>2</sup>.

Ce qui ressort de cette analyse, c'est que la réponse à la question « SQM est-elle compréhensible ? », la réponse est positive si l'on s'en tient aux représentations mentales de type procédural.

Détaillons ces procédures. Dans le cadre de la mécanique ondulatoire développée en 1926 par Schrödinger <sup>3</sup>, il s'agit de déterminer une fonction de plusieurs variables, la fonction d'onde  $\Psi(x, y, z, t)$  <sup>4</sup>, qui suit une équation aux dérivées partielles <sup>5</sup>, l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + V \Psi$$

D'autre part, la « mécanique des matrices » développée par Max Born, Pascual Jordan et Werner Heisenberg <sup>6</sup> utilise plutôt l'algèbre linéaire. Il s'agit dans ce cadre de déterminer le vecteur d'état  $|\Psi\rangle$  à partir de l'équation de Schrödinger écrite sous la forme :

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle$$

où  $\hat{H}$  est un opérateur (dit hamiltonien) <sup>7</sup>.

1. MEYER 2001, §§9-10.

2. DALIBAR 2010.

3. SCHRÖDINGER 1926b ; SCHRÖDINGER 1926c ; SCHRÖDINGER 1926d ; SCHRÖDINGER 1926a.

4. si l'on s'intéresse à une unique particule.

5. Les physiciens connaissent depuis longtemps ce genre de problèmes mathématiques qui sont apparus avec la théorie de d'Alembert des cordes vibrantes en 1747.

6. Werner HEISENBERG 1925 ; M. BORN et JORDAN 1925 ; M. BORN, W. HEISENBERG et JORDAN 1926.

7. C'est un opérateur hermitien, c'est-à-dire un endomorphisme d'espace de Hilbert qui est son propre adjoint. Les outils mathématiques ont été mis en place à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, ce qui explique certainement les réticences initiales des physiciens contre ce formalisme : des physiciens dans les années 1920 ont ainsi fait part de leur préférence pour la version ondulatoire comme Uhlenbeck. Sommerfeld a écrit « bien que l'exactitude de la mécanique matricielle soit incontestable, sa manipulation est extrêmement complexe et effroyablement abstraite. Schrödinger est maintenant venu à notre secours ».

D'une façon ou d'une autre, le praticien (SQM ou BQM) est ramené pour chaque problème à la détermination de  $\Psi$  (ou sa version vectorielle) et à la déduction qu'il en fait des mesures possibles et des probabilités associées à chacune de ces mesures. Pour reprendre la citation de Dalibar, en suivant « l'intégralité du chemin conduisant [...] aux prédictions », il se forge ainsi une représentation mentale procédurale particulièrement robuste dans la mesure où « les outils de la mécanique quantique [...] ne souffrent pas d'ambiguïté ». Dit autrement : la procédure guide celui qui l'utilise sur un « chemin » bien balisé, donnant ainsi une représentation – procédurale – claire.

## 6.1.2 Les représentations mentales de BQM (RB) : proches de celles de la mécanique classique

Nous allons voir ce qu'il en est pour BQM des autres représentations (conceptuelles et imagées) et comment ces dernières s'articulent aux représentations procédurales.

### BQM est fondée sur le concept de dualité qui donne lieu à deux images qui coexistent en permanence : l'onde et la particule

BQM donne un sens physique imagé aux propriétés mathématiques utilisées :  $|\Psi|^2$  est la probabilité de trouver une particule dans une certaine région (une particule se trouve dans une certaine région parce qu'en fait, elle est là). BQM préserve ainsi le concept classique de position pour une particule. En interprétant le flux quantique  $\vec{J} = |\Psi|^2 \vec{v}$  comme un flux de particules en mouvement, BQM préserve aussi le concept de vitesse  $\vec{v}$  associé à la particule. Le fait que les concepts de position et de vitesse soient valides en BQM (cf. 2.2)<sup>8</sup> permet l'existence d'une représentation mentale imagée, celle de la trajectoire (courbe parcourue par la particule au cours du temps) :

la différence fondamentale entre la trajectoire de Bohm et les approches « conventionnelles » [ie SQM] est que la mécanique de Bohm [BQM] traite systématiquement une « particule » comme une particule réelle à tout moment, pas seulement aux instants où une mesure [...] de sa position est faite<sup>9</sup>.

Aussi, BQM lie de façon intime les représentations mentales de types procédural et imagé *via* le concept classique de point matériel – préservé en BQM.

Si BQM s'appuie sur le concept de point matériel associé à une particule, cette théorie utilise aussi le concept de champ associé à une onde. En effet, lorsqu'il présente la théorie de l'onde pilote en 1927, Louis de Broglie déclare « nous avons considéré les corpuscules comme "extérieurs" à l'onde  $\Psi$ , leur mouvement étant seul déterminé par la propagation de l'onde »<sup>10</sup>. BQM est donc fondée sur le concept d'onde et de particule qui coexistent.

En s'appuyant sur les concepts d'onde et de particule, BQM propose des images claires et stables. À titre d'exemple, on peut s'intéresser à l'expérience de Young. BQM donne une image mentale unique, claire et non ambiguë de cette expérience (voir aussi figure 6.1) :

8. Ce n'est pas contradictoire avec les inégalités de Heisenberg : « les relations d'incertitude nous apprennent que, plus une observation nous permet de préciser l'un des aspects du corpuscule, plus l'autre s'estompe. [...] Mais de ce que les procédés de mesure ne peuvent pas nous permettre d'attribuer simultanément à un corpuscule une position et un état de mouvement, est-on nécessairement obligé de conclure que, dans la réalité, le corpuscule n'ait pas de position, ni de vitesse? » (L. d. BROGLIE 1956b, p. 61). Voir aussi à ce sujet l'annexe D.

9. LEAVENS 1996, p. 127, ma traduction.

10. I. SOLVAY 1928, p. 122, dans l'intervention de Louis de Broglie.

L'électron-onde passe [...] par les deux fentes à la fois, mais la particule existe également tout au long de l'expérience et par conséquent l'électron-corpuscule passe effectivement par l'une des fentes. [...] Ce sont ces différentes trajectoires qui expliquent à la fois les impacts des électrons sur l'écran de détection et les franges d'interférence. [...] La position d'un impact est simplement la position de la particule au moment de l'impact<sup>11</sup>.

Bohm dit que dans BQM « cette expérience est décrite de manière causale et continue en terme d'un modèle conceptuel unique et précisément définissable »<sup>12</sup>. La dualité des concepts d'onde et de particules permet l'émergence d'images mentales claires et faciles à mobiliser (les deux existent en permanence).

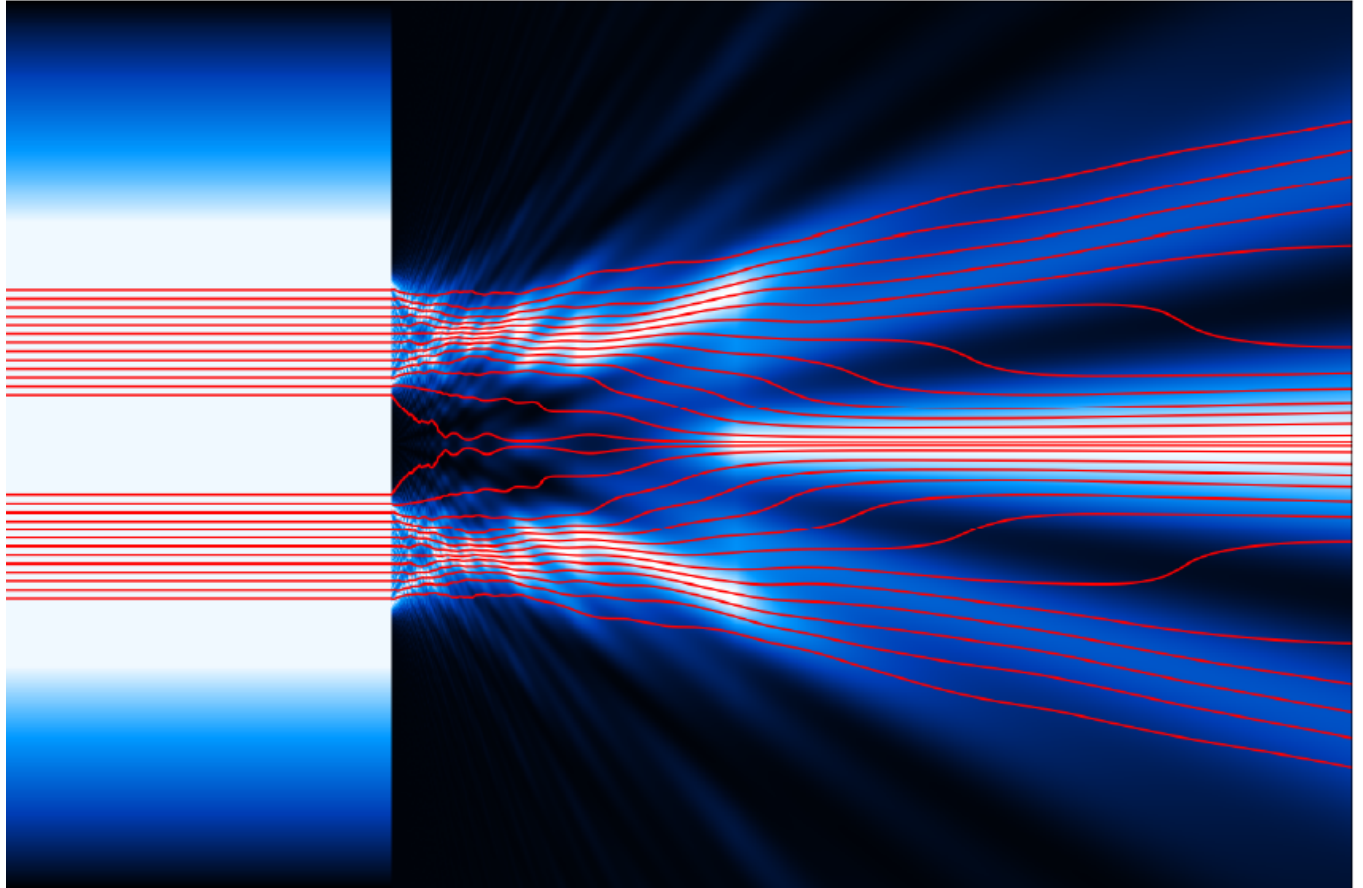


FIGURE 6.1 – Deux images mentales BQM coexistant pour l'expérience de Young (M. GONDRAN, A. GONDRAN et NOÛS 2021) :

- l'onde (en bleu dont l'intensité  $|\Psi|^2$  est d'autant plus grande que c'est plus lumineux) ;
- la particule (trajectoires tracées en rouge).

### Images et concepts BQM fournissent cependant des représentations mentales qui s'éloignent un peu de celles de la mécanique classique

Cependant, les images que l'on peut se faire à partir des trajectoires bohmiennes sont parfois étonnantes (« surréelles ») car, comme il a déjà été dit, les trajectoires BQM sont bien peu classiques (cf. figure 2.3),

11. A. GONDRAN et M. GONDRAN 2015.

12. David BOHM 1952, p. 174, ma traduction.

en particulier du fait qu'elles ne peuvent se croiser.

D'autre part, comme il déjà été dit (cf. 2.2), il faut se rappeler que la fonction d'onde utilisée par BQM fait référence à une onde qui présente des caractéristiques un peu différentes de celles qu'ont les ondes en physique classique. Dans le cas de plusieurs particules,  $\Psi$  se « propage » dans l'espace de configurations, qui n'est pas l'espace réel. Se faire une image mentale d'une telle « onde » pose problème à Louis de Broglie lui-même :

quelle idée intelligible peut-on se faire des coordonnées d'un corpuscule qui n'est pas localisé dans l'espace physique ?<sup>13</sup>

Aussi, BQM utilise bien deux concepts issus de la physique classique (onde *et* particule), mais l'on peut reconnaître que ces concepts n'ont plus les propriétés qu'ils avaient en mécanique classique (ce qui n'est pas un problème en soi).

### 6.1.3 Les représentations mentales de SQM (RS) : fragmentaires

Passons maintenant aux représentations (conceptuelles et imagées) de SQM.

#### SQM rejette les représentations conceptuelles et imagées classiques

SQM rejette l'idée que l'on puisse – entre deux mesures effectuées – parler de position ou de vitesse du fait de l'indéterminisme. Ainsi, pour SQM la représentation mentale conceptuelle de point matériel disparaît, ainsi que la représentation imagée de trajectoire, comme expliqué par Bohm dans le cas de l'expérience de Young :

l'interprétation habituelle de la théorie quantique [SQM] non seulement ne cherche pas à fournir un seul modèle conceptuel défini avec précision pour l'explication des phénomènes [observés dans le cas de l'expérience des fentes de Young], mais elle affirme qu'aucun modèle de ce type n'est même concevable. [...] Ainsi, pendant que l'électron traverse le système de fentes, sa position est dite intrinsèquement ambiguë, de sorte que si nous souhaitons obtenir un motif d'interférence, il est inutile de demander par quelle fente un électron unique est réellement passé<sup>14</sup>.

D'une part SQM rejette le point matériel, d'autre part elle admet la complétude de la description par la fonction  $\Psi$ . Mais il ne faudrait pas pour autant conclure que SQM s'appuie sur le concept unique d'onde. En effet,  $\Psi$  est relative à des ondes mais ces « ondes sont des ondes de probabilité »<sup>15</sup>.

#### En SQM, les représentations conceptuelles et imagées ne sont pas uniques, elles changent brusquement lors de la mesure

Sur quel(s) concept(s) et image(s) SQM s'appuie-t-elle donc ? Born et Heisenberg déclarent :

nous attribuons à la matière aussi une double nature : leur description exige que nous parlions de corpuscules (discontinuités) aussi bien que d'ondes (processus continus)<sup>16</sup>.

Mais contrairement à BQM, SQM ne s'appuie pas sur une dualité onde - corpuscule mais plutôt sur une complémentarité entre ces deux concepts (et les images qui s'y rattachent).

Pour l'expérience de Young, Bohm nous dit que :

13. L. d. BROGLIE 1959, p. 968.

14. David BOHM 1952, p. 126, ma traduction.

15. I. SOLVAY 1928, p. 165, exposé de Born et Heisenberg.

16. I. SOLVAY 1928, p. 164, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

au lieu d'un seul modèle conceptuel défini avec précision, [SQM] fournit [...] une paire de modèles complémentaires, à savoir, particule et onde, dont chacun ne peut être rendu plus précis que dans des conditions qui nécessitent une diminution réciproque du degré de précision de l'autre <sup>17</sup>.

SQM peut faire appel en effet au concept bohrien de **complémentarité**. Dans le cas de l'**expérience de Young** par exemple, la **complémentarité** est mise à contribution pour se faire une représentation mentale complémentaire que nous noterons *RSC* :

Durant toute l'expérience l'électron [peut avoir pour représentation mentale] une onde ; l'électron [peut avoir pour représentation mentale] un corpuscule [...] lors de son impact avec l'écran ([après] réduction du paquet d'onde). [...] Par quelle fente est passée la particule ? Dans l'interprétation de Copenhague, cette question n'a pas de sens puisque l'électron n'existe, au moment du passage des fentes, que sous la forme d'une onde <sup>18</sup>.

Ainsi les représentations en terme d'onde et de particule s'excluent mutuellement, l'interprétation que l'on peut faire d'une expérience (voir par exemple figure 6.2) faisant appel à certains moments à l'une des images (l'onde – *RSCa*) et à d'autres moments à l'autre (la particule – *RSCb*).

Plutôt que la **complémentarité**, une autre description du monde microscopique par SQM, utilisée principalement dans les manuels <sup>19</sup>, est celle d'« état » (nous noterons cette représentation mentale *RSE*), lié à la grandeur mathématique  $\Psi$  :

- initialement, l'état est une « **superposition** » floue et indéterminée *RSEa*, comme mis en évidence avec le **chat de Schrödinger** (l'état est dans ce cas une **superposition** de chat vivant et mort à la fois) ;
- sous l'action de la mesure, il y a **effondrement du paquet d'ondes** et l'état se réduit brusquement à un état unique et bien déterminé *RSEb* (dans le cas du **chat de Schrödinger**, l'état se « réduit » à un chat vivant ou bien un chat mort).

On voit que cette représentation conceptuelle est aussi duale et donne naissance à des images mentales fragmentées.

Les représentations conceptuelles de SQM, aussi bien la **complémentarité** que le concept d'état, donnent lieu à chaque fois à deux types d'images, l'une étant mobilisée plutôt que l'autre suivant qu'il y a eu ou non mesure, comme récapitulé dans le tableau 6.1. Or le processus de mesure en SQM est holistique (cf. la partie qui était consacrée à ce point, 3.2.2) : c'est un tout indissociable mais on ne peut rien en dire d'autre, on ne peut spécifier les détails de l'interaction. Il y a là un renoncement affirmé à scruter ce qui se passe, donc à en fournir une représentation conceptuelle. La mesure elle-même est donc non définie en SQM, ce qui introduit un certain flou dans les représentations conceptuelles de SQM qui, comme on vient de le voir, lui sont adossées.

## Le langage révèle que les images mentales mobilisées par SQM sont problématiques

Édifiantes sont les difficultés sémantiques soulevées lorsque l'on veut simplement nommer ce que l'on étudie en SQM : puisqu'il ne s'agit ni d'une particule ni d'une onde, certains auteurs ont essayé de forger de nouveaux mots. Ainsi, des actes d'un congrès <sup>20</sup> s'intéressant à la pédagogie de SQM listent les substantifs (nous les avons déjà vus, cf. 2.1 : « particule », « ondicule », « quanton ») pour nommer l'objet d'étude ! En fait, il faudrait uniquement parler du vecteur d'état du système (ce qui est moins un concept qu'une entité

17. David BOHM 1952, p. 126, ma traduction.

18. A. GONDRAN et M. GONDRAN 2015.

19. Ainsi, la **complémentarité** fait une seule apparition dans l'index du manuel de Cohen-Tannoudji (COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018, p. 51).

20. LAUTESSE, VILA VALLS et al. 2014.



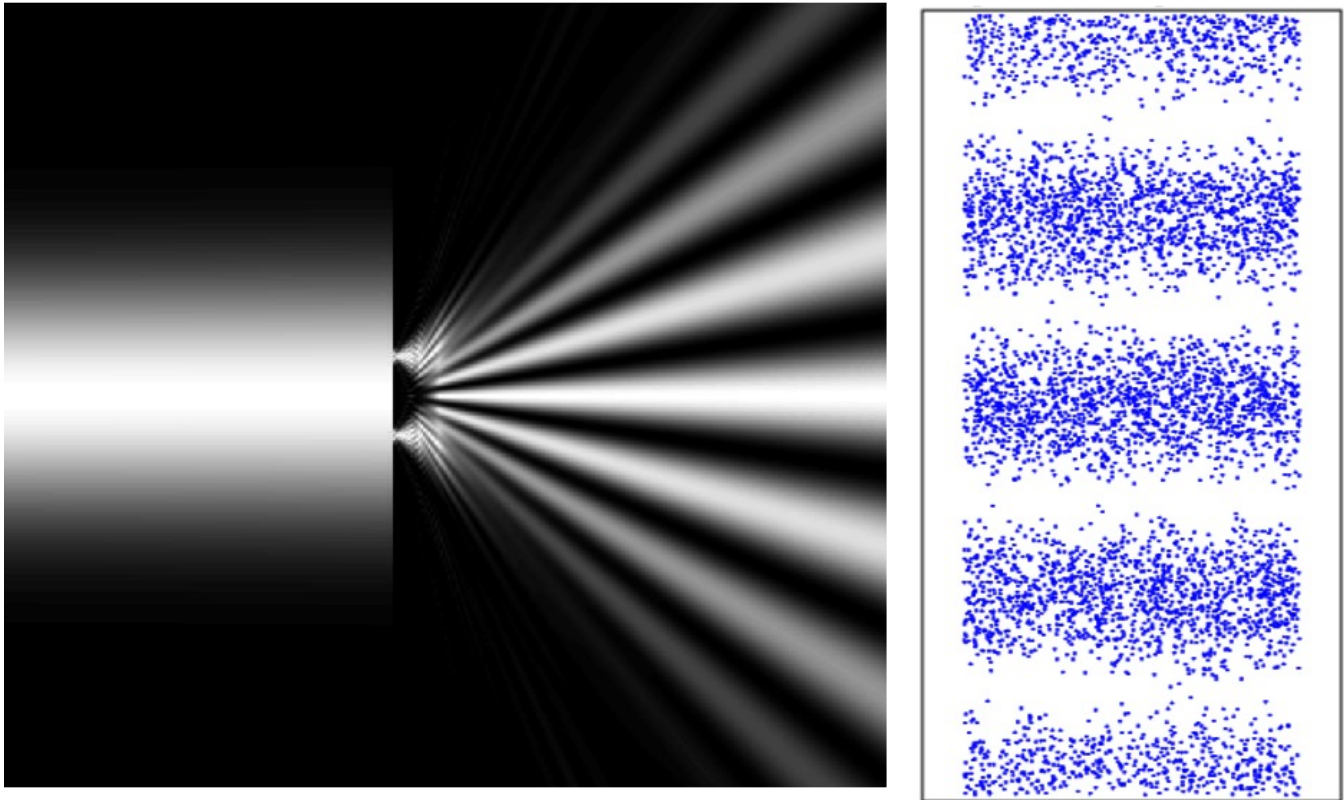


FIGURE 6.2 – Deux images mentales complémentaires SQM pour l'expérience de Young (A. GONDRAN et M. GONDRAN 2015) :

- à gauche (avant l'écran), l'onde de probabilité  $RSCa$  (dont l'intensité  $|\Psi|^2$  est d'autant plus grande que c'est plus lumineux), l'état  $\Psi$  est une superposition continue de paquets d'ondes  $RSEa$  ;
- à droite (sur l'écran), la particule détectée  $RSCb$  (dont la position est repérée par un point bleu), l'état  $\Psi$  s'est réduit à un paquet d'onde très localisé  $RSEb$ .

représentations mentales	<i>RSE</i>	<i>RSC</i>	<i>RB</i>
théorie	SQM état	SQM complémentarité	BQM dualité
avant la mesure	<i>RSEa</i> : superposition de paquets d'ondes	<i>RSCa</i> : onde	onde et particule
après la mesure	<i>RSEb</i> : réduction à un unique paquet d'ondes	<i>RSCb</i> : particule	onde et particule

TABLE 6.1 – Tableau récapitulatif des représentations mentales (concepts et images) mobilisées par SQM et BQM.

mathématique), même si le qualificatif « état » facilite un glissement rapide vers une ontologie par ailleurs rejetée.

Heisenberg lui-même reconnaît que les représentations fragmentaires utilisées en SQM sont « floues » :

Le concept de complémentarité introduit par Bohr dans l'interprétation de la théorie quantique a encouragé les physiciens à utiliser un langage ambigu plutôt que non ambigu, à utiliser les concepts d'une manière plutôt vague en conformité avec le principe d'incertitude, à appliquer alternativement différents concepts classiques qui mèneraient à des contradictions si on les utilisait simultanément<sup>21</sup>.

Le flou des représentations conceptuelles et imagées de SQM provoquerait une ambiguïté du langage utilisé.

Si les images mentales sont oxymoriques – onde et particule par exemple – c'est parce que notre langage est limité répond Bohr :

il est nécessaire de reconnaître que, même si les phénomènes dépassent la portée de l'explication physique classique, l'explication que l'on peut fournir des expériences doit être exprimée en termes classiques<sup>22</sup>.

De quoi dépendons-nous, finalement, nous autres êtres humains ? De nos mots. Nous flottons dans le langage. Notre devoir est de communiquer aux autres des expériences et des idées. Nous devons continuellement essayer d'étendre le domaine de nos descriptions sans que pour autant nos messages perdent leur caractère d'objectivité et d'absence d'ambiguïté<sup>23</sup>.

Ainsi, selon Bohr, la contradiction apparaît du fait que nos mots, associés à des images classiques, sont impuissants à décrire correctement (c'est-à-dire de façon unifiée) le monde quantique.

### Ceux qui utilisent SQM se « raccrochent » souvent à une représentation mentale purement procédurale du fait de la faiblesse des représentations imagées

On a vu (6.1.1) que l'algorithme des actions à effectuer pour le physicien (appairer telle formule avec tel résultat prédit ou observé) pouvait être appliqué indépendamment de toute image. C'est lorsqu'il s'agit d'associer des images et ou des concepts à la procédure utilisée que le bât blesse pour SQM. Heisenberg ne dit rien d'autre lorsqu'il propose comme échappatoire au flou des images utilisés en SQM de ramener la représentation mentale à sa dimension uniquement procédurale :

Quand cet emploi vague et non systématique du langage mène à des difficultés, le physicien est forcé

21. Werner HEISENBERG 1989, p. 179.

22. BOHR 1949, ma traduction.

23. PERUZZI 1999, Citation de Bohr.

de se rabattre sur le schéma mathématique et sur sa corrélation sans ambiguïté avec les faits expérimentaux<sup>24</sup>.

Confronté aux difficultés sémantiques et aux images fragmentaires, le physicien qui utilise SQM est parfois tenté de se taire, de n'utiliser que le formalisme mathématique (« shut up and calculate ! »<sup>25</sup>) et de ne faire appel qu'aux représentations procédurales. Ce peut être une tentation aussi pour le professeur qui enseigne SQM, comme nous allons le voir.

## 6.2 Utilisations didactiques de SQM et BQM

### 6.2.1 Les « conceptions », obstacles à l'apprentissage

#### Enseigner la mécanique quantique constitue un véritable défi

Si des chercheurs chevronnés sont à l'aise avec SQM, il n'en est pas de même avec des étudiants qui découvrent la mécanique quantique (dans la quasi-totalité des cas, l'enseignement de la mécanique quantique est celui de SQM). La question que nous allons aborder maintenant est : comment faire (au mieux) pour enseigner la physique quantique ? Et est-ce que ce qui précède peut nous aider à répondre à cette question ?

Grande est la difficulté à « faire entrer [les étudiants] dans la logique du monde quantique (ni magique, ni irrationnelle), au sens où sa "compréhension" exige le bouleversement des cadres de pensée par lesquels nous nous représentons notre monde physique »<sup>26</sup>. Mais est-elle spécifique à l'enseignement de SQM ? Est-elle relative à l'« étrangeté » du monde microscopique ? En serait-il de même avec BQM ? Est-ce le monde microscopique lui-même, du fait des phénomènes qu'il nous permet de mesurer, qui va contre notre intuition, ou bien est-ce SQM qui ne fournit pas, ou pas assez, d'outils qui nous permettent de nous représenter plus simplement les phénomènes microscopiques (ou tout simplement de nous en faire une image mentale) ?

#### L'apprentissage implique un conflit entre connaissances antérieures et nouvelles

La didactique nous apprend<sup>27</sup> que le prolongement des acquis se fait parfois par rupture avec les connaissances antérieures. Aussi, tout apprentissage est le produit d'une confrontation entre des savoirs anciens et des informations nouvelles. La résolution de ce conflit ne peut se faire qu'au prix d'une transformation complète de l'ensemble de la structure mentale de l'apprenant. Comme le note un document du ministère de l'éducation nationale<sup>28</sup> : « il s'agit d'effectuer avec les élèves un long travail de fissuration et de dépassement de conceptions intuitives tenaces et de contribuer de manière efficace à la mise en place d'un raisonnement nouveau ».

La notion clé ici est celle de « conception » (c'est-à-dire de conception antérieure) :

24. Werner HEISENBERG 1989, p. 179.

25. La citation, reprise *ad nauseam* est de Mermin (MERMIN 2004, §1) : « I declared myself to be among those who feel uncomfortable when asked to articulate what we really think about the quantum theory, adding that "If I were forced to sum up in one sentence what the Copenhagen interpretation says to me, it would be "Shut up and calculate !" ».

26. LAUTESSE, CHAUSSARD et al. 2019, §79.

27. GIORDAN 1996.

28. Il s'agit d'un document d'accompagnement de première S de 2002.

Une conception n'est jamais gratuite, c'est le fruit de l'expérience antérieure de l'apprenant (qu'il soit enfant ou adulte). C'est à la fois sa grille de lecture, d'interprétation et de prévision de la réalité que l'individu a à traiter et sa prison intellectuelle. Il ne peut comprendre le monde qu'à travers elle. Elle renvoie à ses interrogations (ses questions). Elle prend appui sur ses raisonnements et ses interprétations (son mode opératoire), sur les autres idées qu'il manipule (son cadre de références), sur sa façon de s'exprimer (ses signifiants) et sur sa façon de produire du sens (son réseau sémantique)<sup>29</sup>.

L'image de la conception comme « prison intellectuelle » éclaire la problématique de l'enseignement : libérer celui qui apprend de ses conceptions est la condition de l'apprentissage de nouvelles connaissances.

### **Le dépassement des conceptions antérieures n'est pas une problématique propre à l'enseignement de la mécanique quantique**

Ces « conceptions » sont bien documentées en ce qui concerne l'apprentissage de la mécanique classique (dans l'enseignement secondaire) :

Il a fallu un changement radical de la conception de la science [...] pour que les idées d'Aristote sur le mouvement soient dépassées 2000 ans après leur élaboration. De la même façon, [comme le dit Bachelard] « l'adolescent arrive en classe de physique avec des connaissances empiriques déjà constituées », notamment parce que les notions manipulées en mécanique, telles que la force, la vitesse ou l'accélération font partie de la vie courante avant leur introduction dans un cours de sciences physiques. L'enseignement de la mécanique se fait donc le plus souvent contre les conceptions erronées des élèves. Les raisonnements communs [...] sont en effet des structures profondes de pensée qui fonctionnent comme des théories naïves [...] et différents auteurs [...] ont expliqué qu'il était difficile de les faire évoluer notamment parce que ces conceptions étaient pertinentes dans la vie quotidienne<sup>30</sup>.

Le physicien et philosophe des sciences (né en 1938) Michel Paty soutient que les difficultés relatives à l'apprentissage de la mécanique quantique ne sont pas, dans leur essence, différentes de celles relatives à la mécanique classique :

On assigne, en fin de compte, aux systèmes quantiques des propriétés décrites par leurs grandeurs abstraites d'une manière aussi naturelle qu'on le fait pour la physique classique avec les concepts d'énergie ou de points (singuliers) d'une trajectoire (continue). Pour ces derniers aussi, il fallut la familiarisation avec des concepts construits, parfois peu clairs au début (la masse, le point matériel, la force, l'énergie, le potentiel...), et sous-tendus par un outil mathématique qui avait été créé pour l'occasion, le calcul différentiel et intégral. L'exceptionnelle abstraction des grandeurs physiques n'est, à cet égard, une spécificité de la mécanique quantique que par un effet de perspective rapprochée. L'histoire de la physique nous rappelle que sa mathématisation a toujours opéré par l'intervention de grandeurs abstraites qui paraissaient initialement éloignées des phénomènes<sup>31</sup>.

D'ailleurs Paty note que la pratique des outils mathématiques impliqués par le formalisme quantique (aussi bien SQM que BQM) ne se pose plus de nos jours de façon aussi aigüe qu'il y a un siècle. Ainsi, l'apprentissage de la mécanique quantique ne présente pas *dans son essence* de différences didactiques avec celui de la mécanique classique : dans un cas comme dans l'autre, il s'agit de dépasser des conceptions.

---

29. GIORDAN 1996, p. 48.

30. COPPENS 2007, Analyse bibliographique d'études didactiques en mécanique, p. 14-29.

31. PATY 2000, p. 21.

**Les conceptions acquises propres à la mécanique classique font obstacle à l'apprentissage de la mécanique quantique**

Or on peut admettre comme hypothèse ce qui apparaît comme une évidence : dans les curricula et programmes officiels, la mécanique classique est abordée avant la mécanique quantique et il n'est pas prodigué de cours de celle-ci à celles et ceux qui n'auraient pas eu connaissance de celle-là.

Il semble donc que, pour la plupart des personnes confrontées à l'apprentissage de la mécanique quantique, les conceptions à surmonter soient justement celles acquises en mécanique classique. Apprendre la physique quantique demande donc de se libérer des notions classiques de point matériel (avec ses propriétés non contextuelles), d'onde (définie dans l'espace réel à 4 dimensions), de *localité*, etc., pour mettre en place les nouvelles connaissances relatives à SQM ou BQM.

Reste à savoir comment faire. En s'appuyant sur les travaux du didacticien Pascal Duplessis<sup>32</sup>, on peut discerner trois positionnements possibles de l'enseignant vis-à-vis des conceptions :

- la conception comme obstacle à éliminer en la niant ;
- la conception comme obstacle à éliminer en la réfutant ;
- la conception comme obstacle à dépasser (« faire avec pour aller contre »).

Nous allons voir que chacun de ces positionnements implique un choix relatif à SQM ou BQM, que nous pouvons associer à trois stratégies didactiques distinctes qui sont résumées dans le tableau 6.2 et que nous allons maintenant expliciter.

stratégie didactique	S1	S2	S3
théorie	SQM	SQM	BQM
position vis-à-vis des conceptions classiques	niées et éliminées	réfutées et éliminées	acceptées et dépassées
mobilisant les représentations mentales	uniquement procédurales (RS0)	RSC : onde ou particule ; RSE : paquets d'ondes superposés ou paquet d'ondes réduit	RB : onde et particule

TABLE 6.2 – Tableau récapitulatif des stratégies didactiques d'apprentissage de la mécanique quantique pour SQM et BQM.

**6.2.2 Stratégie didactique S1 : SQM avec des représentations mentales uniquement procédurales**

**L'enseignant peut présenter SQM sans aucune autre représentation mentale que procédurale (ce qui est résumé dans la formule « shut up and calculate »)**

Dans un article où ils veulent mettre en avant les attraits de BQM<sup>33</sup>, Oriols et Mompert se posent la question de l'enseignement de la mécanique quantique. Ils listent des positionnements possibles de l'enseignant face au questionnement des étudiants. La première possibilité qu'ils présentent est la suivante :

Imaginez qu'un étudiant demande à son professeur, « qu'est-ce qu'un électron ? » La réponse d'un professeur [...] pourrait être : « l'électron n'est ni une onde ni une particule. Mais ne t'inquiète pas ! Tu

32. DUPLESSIS 2008, pp. 10-12.

33. ORIOLS et MOMPART 2012.

n'as pas à savoir ce qu'est un électron pour calculer les résultats observables et réussir l'examen. » Si l'étudiant insiste, le professeur pourrait répondre, « Tais-toi et calcule »<sup>34</sup>.

La méthode pédagogique se résumerait donc à ce slogan « shut up and calculate ! ». Si c'est un peu caricatural bien sûr, on pourrait dire que le discours de l'enseignant est « en dehors des mathématiques, point de salut ! » :

il n'est pas d'enseignement plus jubilatoire qu'un cours d'introduction à la mécanique quantique. Enseigner ce qu'on ne comprend pas compte parmi les expériences pédagogiques les plus étranges et excitantes : on invite les élèves à partager notre ignorance en les plongeant dans un état de cécité totale du monde physique où le bon sens perd son statut de juge suprême. Dans ces ténèbres, un seul fil d'Ariane salvateur : les mathématiques<sup>35</sup>.

Il n'est pas évident que la dernière phrase soit ironique. La métaphore de la cécité est particulièrement adaptée du fait de l'absence d'images nouvelles (ou des anciennes images inadaptées). En filant la métaphore on pourrait dire : « autant fermer les yeux et se raccrocher au fil de la procédure mathématisée ».

### **Du fait qu'il ne compte pas sur les images et les concepts SQM pour remplacer ceux issus de la mécanique classique, l'enseignant élimine ainsi les conceptions antérieures, sans les remplacer**

Il faut avouer que c'est une bonne méthode pour que l'enseignant (qui « enseigne ce qu'on ne comprend pas ») évite d'utiliser un vocabulaire inadapté ou aille un peu trop loin dans l'utilisation d'une image ou d'un concept réfuté par SQM.

Il s'agirait donc de demander à l'étudiant de ne pas se poser de question afin de ne pas lui apporter de réponses fausses. Il faut voir dans ce qui précède l'utilisation des procédures mathématisées comme uniques représentations mentales offertes à l'apprenant (aussi nous noterons ce type de représentations mentales *RS0*, cf. tableau 6.2).

Ce qui précède est cohérent avec un des trois positionnements didactiques (noté *S1*, cf. tableau 6.2) qui revient à éliminer la conception préalable (issue de la mécanique classique) en la niant :

Pour de nombreux enseignants, les conceptions ne sont que des phénomènes parasites [...] Il est alors préférable d'en faire table rase pour mieux asseoir le cours<sup>36</sup>.

Si, comme on l'a vu, SQM a quelques faiblesses en terme d'images fondées sur des concepts clairs, une méthode consiste donc à ne pas s'appuyer sur ces deux types de représentations mentales (ni image, ni concept renvoyant à des objets ou processus ontologiques). Interdire ces représentations mentales en mécanique quantique revient d'une certaine façon à combattre les anciennes représentations mentales issues de la mécanique classique.

### **6.2.3 Stratégie didactique *S2* : SQM avec des représentations mentales enrichies mais fragmentaires**

**La deuxième stratégie consiste à éliminer les conceptions classiques en les réfutant**

Passons à une deuxième méthode pédagogique (notée *S2*, cf. tableau 6.2), développée par Duplessis :

34. ORIOLS et MOMPART 2012, pp. 13-14.

35. GRATIAS 2010.

36. DUPLESSIS 2008, pp. 10-11.

une autre stratégie, soucieuse cette fois-ci de prendre en compte l'importance des conceptions, va consister à les réfuter. A la suite des travaux de Bachelard, l'idée « d'obstacle épistémologique » a contribué à constituer la conception en tant qu'erreur qui doit être combattue avant de commencer tout apprentissage. Une pédagogie de la « réfutation » est née qui, selon Giordan et de Vecchi, propose la méthode suivante : une phase d'expression et de prise de conscience des représentations des élèves débute le cours. Elle est suivie d'une action contradictoire du maître ou du groupe, puis de propositions d'une série de corrections successives. Enfin, la séance se termine par une formulation conceptuelle grâce à un langage commun<sup>37</sup>.

Un cas pourra illustrer cette méthode. Il s'agit de l'exemple introductif souvent utilisé dans les manuels, l'[expérience de Young](#) (voir aussi figure 6.2) :

Ni les prédictions de la théorie ondulatoire, ni celles de la théorie corpusculaire ne sont vérifiées. En effet [...] il faut donc rejeter l'interprétation purement corpusculaire [et] il faut [...] aussi rejeter l'interprétation purement ondulatoire. [...] L'analyse qui précède montre qu'il est impossible d'expliquer tous les phénomènes observés si l'on ne s'attache qu'à l'un des deux aspects, corpusculaire ou ondulatoire, de la lumière. Or ces deux aspects semblent s'exclure mutuellement<sup>38</sup>.

Dans ce précède, on s'appuie sur les anciennes conceptions issues de la mécanique classique (les concepts d'onde et de particule) afin de les remplacer par une nouvelle image mentale. Les anciennes images (d'onde et de particule) pourront demeurer mais de manière fragmentaire (*RSCa* ou *RSCb*) et métaphorique ou bien l'enseignant utilisera les nouvelles images d'état avec des paquets d'ondes superposés (*RSEa* avant la mesure) ou avec un paquet d'ondes réduit (*RSEb* après la mesure).

### **L'enseignant remplace les images mentales antérieures par des images complémentaires et fragmentaires qui confèrent à SQM une aura d'étrangeté attrayante pour les étudiants**

La nouvelle représentation mentale (*RSC*, parfois onde, parfois particule, une image mentale excluant l'autre) est associée à un nouveau concept, celui de « quanton » (cf. 2.1). *In fine*, une nouvelle image mentale aura pris place dans la tête de l'élève : ni onde ni particule mais parfois l'une parfois l'autre.

Il est indéniable que la complémentarité onde - particule en SQM est bien difficile à cerner. Ainsi, un enseignant rapporte que les étudiants « sont perturbés par l'image [d'un quanton] qui peut se retrouver à deux endroits différents après avoir été "découpé" par une séparatrice »<sup>39</sup>. Si ce cas montre que les images mobilisées par SQM sont étranges, ce n'est que parce que l'étudiant les a mal utilisées : plutôt que de parler de particule, il aurait dû s'intéresser à l'onde tant que la mesure n'a pas été faite. Une fois la mesure faite, la particule se serait trouvée d'un côté ou de l'autre de la lame.

Il faut dire que le défi d'enseigner ce qui semble peu intelligible est grand. Mais ce qui est une difficulté peut être aussi un atout : SQM a une aura mystérieuse dont l'étrangeté est attrayante pour les étudiants. Cet attrait peut contrebalancer les difficultés de compréhension que présente SQM lors de l'apprentissage comme le note un universitaire :

Quand on demande ce qu'est la mécanique quantique, généralement la seule explication qu'on obtienne consiste à dire qu'elle est étrange, bizarre même, en tout cas contre-intuitive. [...] Ses contradictions apparentes redeviennent pourtant bien utiles dès qu'il s'agit de l'enseigner. On se livre alors à un salutaire exercice de funambulisme qui suscite en général l'intérêt, l'étonnement même, face aux propriétés

37. DUPLESSIS 2008, p. 10.

38. COHEN-TANNOUJJI, LALOË et DIU 2018, pp. 13-14.

39. DIMARCQ 2010.

remarquables de l'infiniment petit. Puis la rationalité profonde émanant de la théorie réapparaît, sa compréhension venant de la normalisation, du cadre mathématique et, il faut bien le dire, de l'habitude. On est alors très proche de l'intuition et, à force, on ne sait plus : bizarre ou non ?<sup>40</sup>

Que l'enseignant utilise cet aspect « étrange » ou « bizarre » de SQM pour s'attirer l'intérêt des étudiants, cela peut participer d'une stratégie pédagogique. Mais il faut évidemment que ce premier stade laisse la place à une seconde étape où l'« habitude » et la « rationalité » restaure la scientificité du discours.

### 6.2.4 Stratégie didactique S3 : BQM avec des représentations mentales enrichies non fragmentaires

**La troisième stratégie consiste à dépasser les conceptions classiques en les utilisant**

Une dernière stratégie didactique (notée S3, cf. tableau 6.2) consiste à s'appuyer sur les anciennes conceptions afin de les dépasser :

La conception n'est pas uniquement saisie comme un obstacle à vaincre ou à ignorer, mais également comme un appui, une base et une aide à partir de laquelle construire de nouvelles connaissances. [...] Si] le savoir est construit par l'apprenant, il devient nécessaire de s'appuyer sur les connaissances déjà présentes chez lui, sur son « déjà là » cognitif. Ce dernier offre ainsi des « structures d'accueil » permettant de faciliter de nouveaux apprentissages [...] qui] jouent pour le sujet un rôle d'intermédiaire entre connaissances antérieures et nouvelles. La conception devient ainsi le pivot, la base fondatrice de nouvelles acquisitions. C'est ainsi que l'obstacle doit, pour le didacticien, devenir une aide à l'apprentissage. D'où cette formule quelque peu paradoxale [...] : « faire avec pour aller contre ». « Faire avec » puisque les conceptions des élèves [...] sont les seuls outils cognitifs dont ils disposent ; « aller contre », parce que le savoir scolaire va généralement à l'encontre des évidences immédiates qui nourrissent les conceptions<sup>41</sup>.

Ainsi, l'idée est d'utiliser les anciennes représentations mentales pour les faire évoluer vers de nouvelles (RB, cf. tableaux 6.1 et 6.2), proches mais différentes. Or la proximité des images mentales de BQM avec celles de la mécanique classique permet justement une utilisation cohérente avec cette stratégie didactique S3.

### BQM permet de s'appuyer sur les représentations mentales de la mécanique classique pour mieux les dépasser

A l'étudiant qui demande à son professeur, « qu'est-ce qu'un électron ? » une réponse alternative à celle proposée précédemment peut être donnée :

un professeur alternatif (bohémien) répondrait « les électrons sont des particules dont les trajectoires sont guidées par un champ pilote qui est la solution de la fonction d'onde de l'équation de Schrödinger. Il y a une certaine incertitude dans les conditions initiales des trajectoires, de sorte que les expériences ont aussi quelques incertitudes. » Avec une explication aussi simple, l'étudiant comprendrait parfaitement le rôle de l'onde et de la particule dans la description des phénomènes quantiques<sup>42</sup>.

Avec cette stratégie, l'enseignant pourrait<sup>43</sup> utiliser la proximité de la mécanique classique et de BQM pour introduire la mécanique quantique. Bien entendu, il faudrait dans un second stade dépasser les analogies

40. TREPS 2010.

41. DUPLESSIS 2008, pp. 11-12.

42. ORIOLS et MOMPART 2012, pp. 13-14.

43. Je n'ai pas trouvé de cours ni de manuel utilisant BQM pour présenter la mécanique quantique à des étudiants novices.



avec la physique classique et mettre en évidence les spécificités quantiques (telles que la [contextualité](#), la non [localité](#), l'[intrication](#), ...).

## 6.3 Comparaison de SQM et BQM pour comprendre et apprendre la mécanique quantique

### 6.3.1 De l'intuition

**L'intelligibilité de la mécanique quantique est liée à l'intuition que l'on peut s'en faire**

Si l'on veut savoir qui de SQM ou BQM a la plus grande intelligibilité, il nous faut nous interroger sur le lien que peuvent entretenir ces théories avec l'intuition. Mais préalablement, il s'agirait de définir l'intuition. Or « la difficulté consiste à définir précisément ce que l'on entend par intuition »<sup>44</sup>. La définition offerte par un dictionnaire<sup>45</sup> renvoie à

l'aptitude à l'action de deviner, pressentir, sentir, comprendre, connaître quelque chose d'emblée, sans parcourir les étapes de l'analyse, du raisonnement ou de la réflexion.

Aussi, l'intuition engage souvent les représentations mentales de types conceptuel et imagée, en se passant des représentations procédurales.

Bien entendu, l'intuition n'est pas une donnée intangible, elle « se travaille », puisque lors de l'apprentissage en particulier, on peut se faire de nouvelles images mentales, s'appuyer sur de nouveaux concepts, à moins de se restreindre à une stratégie (S1) d'apprentissage limitée uniquement aux procédures (le fameux « shut up and calculate »).

**SQM est souvent accusée d'être contre-intuitive, à tort**

Qu'en est-il des rapports qu'entretient SQM avec l'intuition ? Un ancien professeur de philosophie, Jérôme Ferrari<sup>46</sup>, dit que la mécanique quantique (comprendre SQM) mène à des résultats « simplement invraisemblables et scandaleux » et qu'« elle fait voler en éclats nos intuitions les plus spontanées »<sup>47</sup>. Certains physiciens eux-mêmes remarquent que « le praticien de la mécanique quantique [SQM] aboutit régulièrement à des prédictions contraires à son intuition initiale »<sup>48</sup>. On peut lire dans les manuels eux-même que SQM « est difficile à saisir intuitivement »<sup>49</sup>.

Certes les idées que procurent l'intuition doivent toujours être confrontées aux résultats que les procédures donnent dans le cadre du formalisme mathématique. Un hiatus peut apparaître lors de la confrontation des deux visions (immédiate avec l'intuition et réflexive avec les calculs). Remarquons que, si l'on essaie de se représenter le monde quantique avec les images et les concepts classiques, cela ne pourra qu'aboutir à des contradictions. De la même façon, la mécanique classique elle-même peut sembler contre-intuitive si l'on n'a pas assez développé de représentations mentales adaptées. Il est possible que, si SQM est accusée

44. La citation est de Stanislas Dehaene dans son cours au Collège de France (*Psychologie cognitive expérimentale*, p. 278).

45. Définition du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales disponible à l'adresse <https://www.cnrtl.fr/definition/intuition>.

46. Jérôme Ferrari est aussi auteur du roman *le principe* sur Heisenberg.

47. FERRARI 2018.

48. DALIBAR 2010.

49. MESSIAH 1969, p. 126.

d'être incompatible avec l'intuition, c'est certainement par manque de développement des représentations mentales imagées et conceptuelles.

Il me semble que les représentations mentales de SQM (*RSC* et *RSE*) peuvent permettre de se forger une intuition, même si elles sont déroutantes car fragmentaires. En un mot : c'est parce qu'on s'est limité au « shut up and calculate » (soit la stratégie didactique *S1*) que SQM semble contraire à l'intuition. Aussi, SQM n'est pas nécessairement contre-intuitive, il n'y a rien d'intrinsèque à cela.

### 6.3.2 Conclusion sur l'intérêt didactique comparé de SQM et BQM

#### Se réduire à des représentations purement procédurales n'est pas satisfaisant du point de vue pédagogique

Si on développe un unique type de représentation mentale, celui relatif aux procédures, on risque bien d'aboutir à ne pas développer assez son intuition. Ainsi, la mécanique quantique semblera toujours contre-intuitive (et du coup incompréhensible en grande partie) à celui qui l'a apprise selon la stratégie *S1*. En appauvrissant les représentations mentales possibles lors de l'apprentissage, le risque est grand de laisser en chemin bon nombre d'apprenants, comme le note [Cohen-Tannoudji](#) :

Je suis persuadé que la meilleure approche pour pénétrer dans le monde quantique consiste [à] se forger des images simples [...] Bien sûr, il faudra aussi résoudre des équations mais il faut « faire parler » ces équations, saisir les idées qu'elles renferment<sup>50</sup>.

Excluons donc la stratégie *S1* (« shut up and calculate ») et réduisons la discussion sur l'apprentissage comparé de la mécanique quantique aux deux dernières stratégies didactiques (*S2* et *S3*, cf. tableau 6.2). *S2* et *S3* impliquent en effet la possibilité de représentations conceptuelles et imagées pour l'étudiant et, pour l'enseignant, d'un discours qui ne soit pas réduit au formalisme mathématique. Or il semble absolument nécessaire que l'enseignant puisse « faire parler les équations ».

#### En voulant donner une interprétation au formalisme, parfois les manuels de mécanique quantique « ontologisent » de façon indue

« Faire parler les équations », c'est ce à quoi s'attellent souvent les manuels de mécanique quantique. Or il est parfois délicat, dans le cadre de SQM, de bien faire la différence entre le système lui-même, la fonction d'onde qui permet des prédictions de mesure, et les représentations mentales que l'on se donne. Ainsi, comme le note Albert Messiah (1921-2013) qui écrivit le premier manuel très répandu dans l'enseignement français :

La fonction d'onde ne représenterait pas l'état objectif du système étudié, ce serait plutôt un objet mathématique contenant la totalité des renseignements que l'on possède sur un système incomplètement connu<sup>51</sup>.

Mais on voit souvent la transformation lexicale qui fait passer de « la fonction d'onde comme combinaison linéaire de paquets d'ondes » au « système dans une superposition d'états »<sup>52</sup>. En parlant ainsi, on fait comme si, avant toute mesure, l'ensemble des possibles répertoriés par la fonction d'onde était *réel*

50. COHEN-TANNOUJJI 2010.

51. MESSIAH 1969, p. 128.

52. Cf. par exemple des citations déjà données de deux lauréats du prix Nobel : Cohen (« la fonction d'onde apparaît comme une superposition de nombreux états ») (COHEN-TANNOUJJI 2010) et Haroche (« les états possibles, éliminant toutes les superpositions bizarres ») (HAROUCHE, RAIMOND et BRUNE 1997).

et comme si le système existait sous la forme d'une sorte de juxtaposition (étrange) de plusieurs sous-systèmes. Pour bien comprendre ce glissement sémantique, reprenons le paradoxe du [chat de Schrödinger](#). Il conviendrait de dire selon SQM que le chat a une certaine probabilité d'être observé vivant (et une autre mort). Mais a parfois lieu un passage de la phénoménologie à une ontologie injustifiée. C'est le cas si l'on dit que le chat est à la fois mort *et* vivant, avant qu'on ne l'observe (cf. figure 6.3). Une telle interprétation est bien sûr contradictoire avec l'indétermination des grandeurs physiques tant qu'on ne les a pas mesurées, indétermination principielle pour SQM. En effectuant un tel glissement sémantique, on présente  $\Psi$  comme une description des propriétés du système plutôt qu'un catalogue de mesures possibles.

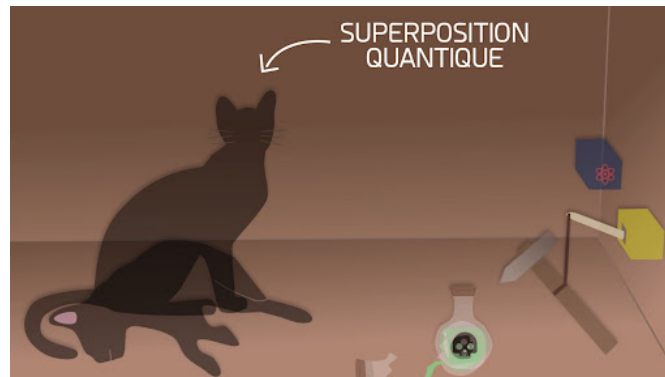


FIGURE 6.3 – Exemple d'« ontologisation » induite : le chat de Schrödinger sous la forme d'une superposition mort et vivant à la fois. Source : CEA (<http://irfu.cea.fr/Phocea/Video/index.php?id=305>).

Une autre difficulté qui se présente – en particulier pour le pédagogue qui présente SQM – est de ne pas confondre l'image mentale que l'on se fait de l'objet d'étude (*RSCa* ou *RSCb*) et le système microscopique lui-même. Un auteur de manuel français, l'enseignant-chercheur Jean-Marc Lévy-Leblond (né en 1940), appelle notre attention sur le risque de confusion possible :

On ne peut pas non plus dire, comme on le fait parfois, que les particules « deviennent » des ondes dans le domaine quantique et que réciproquement, les ondes « se transforment » en particules. Ni même, que les objets quantiques ont une dualité d'essence, à fois ondes et corpuscules<sup>53</sup>.

Cependant, on peut lire dans les manuels de mécanique quantique des expressions qui sont inadéquates du point de vue de SQM.

Citons comme exemple une phrase du manuel de Hecht dont l'auteur est un physicien américain professeur à Adelphi University (Garden City, New York) :

Les entités microscopiques (électrons, protons, photons, atomes, etc.) se propagent comme des ondes<sup>54</sup>.

La phrase précédente assimile ainsi l'objet quantique microscopique et son image mentale (*RSCa*), une « onde qui se propage » (une onde classique en somme, bien loin de l'onde de probabilité pour SQM).

De même, les manuels peuvent faire référence à une « particule » et à sa « trajectoire » alors même que SQM rejette le concept de point matériel avec une position bien déterminée. On trouve ainsi dans l'ouvrage précédemment cité la phrase suivante :

des faisceaux d'atomes peuvent se superposer sur un écran<sup>55</sup>.

53. LÉVY-LEBLOND et F. BALIBAR 1984, p. 66.

54. HECHT, BECHERRAWY et MARTIN 1999, 31.2 - Principe de complémentarité.

55. HECHT, BECHERRAWY et MARTIN 1999, 31.2 - Principe de complémentarité.

Les faisceaux font référence à des rayons (comme en optique géométrique) qui matérialisent des trajectoires qui aboutissent à un écran. Là encore, le risque de confusion est certain entre l'image mentale (*RSCb*) et l'objet quantique « atome ».

Tous ces glissements – sémantiques ou imagés – qui mélangent plusieurs registres (l'entité mathématique  $\Psi$ , le système, et les représentations mentales que l'on s'en donne) laissent entendre que l'objet sous-jacent aurait des propriétés que pourtant SQM réfute. On peut parler d'une véritable « ontologisation », induite.

Cela est révélateur à mon avis de deux problèmes didactiques propres à SQM. D'abord, cela met en évidence la difficulté pour SQM à nommer l'objet d'étude, difficulté déjà relevée (cf. 2.1). Ensuite, si SQM se revendique comme une épistémologie sans ontologie (qui ne fournit que des indications sur les résultats de mesure et se refuse à dire quoi que ce soit sur le réel), les exemples précédents montrent bien la difficulté à tenir une telle position, tout particulièrement pour le pédagogue qui voudrait que ses élèves « comprennent de quoi il retourne ».

### **BQM présente un intérêt pédagogique supérieur à SQM parce qu'elle fournit des images mentales non fragmentaires**

On vient de voir que la recherche pédagogique d'explications peut amener à solliciter des images inadéquates, fausses dans le cadre de SQM. Il n'est pas étonnant que cette incohérence dans certaines présentations de SQM soit pointée par les physiciens bohmiens, comme les chercheurs Oriols et Mompert :

Nous pouvons trouver [dans un cadre SQM] des descriptions [...] telles que « un électron traverse une barrière à effet tunnel résonnant et interagit avec un autre électron à l'intérieur du puits ». Cependant, un « électron traversant une région tunnel », ce n'est pas – du point de vue strict – rigoureux dans [SQM], mais c'est le cas dans [BQM]. Ainsi, contrairement à la formulation de Copenhague, la formulation bohmiennne permet une visualisation facile des phénomènes quantiques en termes de trajectoires, ce qui a pour conséquences – importantes - de démystifier et de clarifier les choses<sup>56</sup>.

Avec ces auteurs, nous pouvons reconnaître que BQM permet au pédagogue de s'affranchir de ce risque de déclarations inadéquates.

Un autre physicien bohmien, Oliver Passon, renchérit sur le fait que BQM propose un point de vue alternatif à SQM qui a un grand intérêt pédagogique :

La « pédagogie de Bohm » fournit un outil très utile pour illustrer la relation entre la physique classique et la physique quantique et éclaire les particularités de cette dernière. [...] Et nous n'avons pas besoin d'accepter la philosophie de Bohm pour accepter la pédagogie de Bohm<sup>57</sup>.

De même, les étudiants peuvent s'appuyer sur des trajectoires bohmiennes sans avoir à les déterminer par eux-mêmes (on a vu, cf. 5.3.1, que cela pouvait être complexe). En effet, ces trajectoires peuvent être fournies par l'enseignant. Rien que l'idée qu'on puisse se faire l'image d'une trajectoire bohmiennne peut peut-être aider celui qui découvre les spécificités du monde microscopique. Grâce à BQM, on peut se faire une représentation plus classique (car fondée sur des trajectoires et détachable de l'observateur<sup>58</sup>) et plus intuitive, en quelque sorte de « dire plus de choses » sur la nature au niveau microscopique (que ces « choses » soient nécessaires à dire ou non, qu'elles soient réelles ou pas !)

56. ORIOLS et MOMPART 2012, p. 6, ma traduction.

57. PASSON 2004, Introduction et p. 5, ma traduction.

58. « Trajectories have great explanatory power ! » (TOWLER 2020).

BQM peut donner aux étudiants la possibilité de disposer d'une vision imagée – non fragmentaire et proche des images classiques – du monde microscopique<sup>59</sup>. Reconnaissons que l'interprétation bohémienne se renforce de la présence de l'onde et de la particule, tandis que SQM fait appel à l'un des concepts ou bien à l'autre, en une exclusion qui peut être délicate à maîtriser, pour l'élève mais aussi pour l'enseignant. Il semble bien que, sur ce point, la simplicité pédagogique de BQM s'oppose à la vision de SQM, assez absconse.

Aussi, il est dommage de se passer de la simplicité interprétative qu'offre BQM, et de l'intelligibilité qui en découle, tout particulièrement nécessaire aux novices. SQM, avec son mode imagé et ses représentations mentales, complémentaires donc fragmentaires, sert moins bien l'intuition et la compréhension nourrie par le cadre classique proche de BQM<sup>60</sup>. Pour conclure, la stratégie didactique *S3* utilisant BQM semble offrir plus d'intérêt pédagogique que la stratégie *S2* qui s'appuie sur SQM, en tout cas pour s'initier à la mécanique quantique.

### 6.3.3 Conclusion sur l'intérêt heuristique comparé de SQM et BQM

#### L'intérêt des images mentales pour les praticiens de la mécanique quantique est discutable

Le problème de l'intelligibilité se pose évidemment en des termes différents pour le novice – qui découvre la mécanique quantique – et pour le chercheur – qui l'utilise. Pour celui-ci, contrairement à celui-là, il ne s'agit plus d'apprendre mais de découvrir.

Or un traitement rigoureux dans le cadre du corpus mathématisé de SQM (ou BQM) assure toutes les garanties épistémologiques car menant à des prédictions jamais encore contredites par l'expérience. Ce traitement mathématisé montre une grande solidité de la représentation mentale procédurale dans SQM. Aussi, on peut se demander ce que peuvent apporter aux quanticiens les autres représentations mentales (images et concepts).

Pour sa part, le quanticien Alain Aspect défend la nécessité des images mentales dans son travail de chercheur :

Certains physiciens acceptent [...] de renoncer aux images, mais d'autres, dont je suis, ont besoin de visualiser les phénomènes pour guider leur intuition, avant de passer au calcul<sup>61</sup>.

Contrairement à Aspect, d'autres physiciens peuvent tout à fait se passer d'images mentales. C'est ce que montre l'échange qui suit, qui eut lieu lors du cinquième Conseil Solvay de 1927, révélateur des différences cognitives qui peuvent exister entre physiciens :

M. de Broglie – On peut [...] considérer le photon comme un point matériel ayant une position et une vitesse. Cela permet de se représenter la trajectoire suivie par les photons [...]

M. Kramers – Je ne vois pas bien, pour ma part, l'avantage qu'il y a, pour la description des expériences, à se faire une image où les photons parcourent des trajectoires bien définies<sup>62</sup>.

Ainsi, certains quanticiens se satisfont des seules représentations procédurales de SQM. On peut d'ailleurs supposer que l'éducation scientifique fondée sur la stratégie *S1* a pour effet de « forger » certains types d'esprits qui se satisfont de ces seules représentations procédurales (ce qui n'est pas grave en soi). Mais

59. Il est à noter que, connaissant la position à un instant donné (par exemple *in fine* grâce à une mesure qui revient à détecter la particule), il est possible de déterminer *à rebours* le trajet que celle-ci a suivi avant qu'elle n'atteigne le détecteur.

60. Notre conclusion s'oppose à l'idée, défendue par un manuel (ASLANGUL 2016, pp. 362-363) que, si BQM essaie de « renouer avec le *bon sens*, au total, l'intuition n'y gagne pas grand chose ».

61. ASPECT 2010.

62. I. SOLVAY 1928, p. 266, dans la discussion générale.

cette stratégie *SI* a peut être l'inconvénient d'éliminer des futurs scientifiques certains étudiants qui – eux – ne seraient pas satisfaits de ces seules représentations procédurales. Le fait de réduire le « vivier » des physiciens apparaît comme un véritable problème.

### **Du fait de leur caractère fragmentaire, les représentations mentales de SQM sont parfois boudées par les chercheurs**

Comme le formule Louis de Broglie, puisque « l'idée de complémentarité [est] un peu fuyante », les physiciens se limitent parfois à « un formalisme abstrait sans images physiques »<sup>63</sup>, la faute au caractère fragmentaire des images mentales de SQM.

Face à cette incohérence dans les images, le physicien peut se rassurer en vérifiant que le formalisme mathématique de la mécanique quantique ne présente pour sa part aucun problème : il est suffisamment sophistiqué pour décrire de façon unifiée les deux comportements<sup>64</sup>.

On comprend que certains praticiens se réfugient dans les calculs et n'utilisent pas ces images SQM « incohérentes ».

La **complémentarité** se réduit alors à un argument, et non pas un concept activé dans le travail de tous les jours :

les physiciens, même si d'aventure ils se souciaient de comprendre la **complémentarité**, n'en avaient pas besoin pour développer les conséquences de la mécanique quantique, et n'y faisaient guère référence que comme à une arme philosophique contre l'arrière-garde réaliste dominée par Einstein<sup>65</sup>.

Ainsi, peu convaincus par l'efficacité des représentations mentales de SQM (*RSC* et *RSE*), certains physiciens sont enclins à renoncer aux images mentales, à toute explication « physique », on dit souvent « avec les mains »<sup>66</sup>.

### **BQM présente un intérêt heuristique certain pour le chercheur**

Si Bohr ne croit pas à « un modèle conceptuel défini avec précision [car] le principe de complémentarité stipule que nous sommes limités aux paires de complémentarité de concepts définis de manière intrinsèquement imprécise, tels que la position et la quantité de mouvement, la particule et l'onde, etc », Bohm, lui, ne veut pas « renoncer à toute possibilité de concevoir un système individuel comme un ensemble unifié et précisément définissable, dont tous les aspects sont, en quelque sorte, simultanément et sans ambiguïté accessibles à notre regard conceptuel »<sup>67</sup>. C'est le propre des représentations mentales de BQM (*RB*) d'être unifiées, contrairement à celles (*RSE* et *RSC*) de SQM qui sont fragmentaires et conditionnelles. Comme pour BQM l'onde et la particule existent tout le temps, il n'y a pas à choisir entre ces deux visions complémentaires. Ainsi en BQM, l'affirmation d'une réalité sous-jacente (la particule et sa trajectoire) permet de se faire une représentation mentale plus riche que dans le cas proposé par SQM, et nous avons souligné l'intérêt que cela pouvait avoir dans le cadre de l'apprentissage par les étudiants. Mais on peut se demander s'il est, par exemple, vraiment intéressant pour le physicien de déterminer les trajectoires possibles, ce qui

63. L. d. BROGLIE 1956b, pp. 59 et 61.

64. ASPECT 2010.

65. DARRIGOL 1985, pp. 309-310.

66. S. BALIBAR 2010.

67. David BOHM 1952, pp. 167-168, ma traduction.

serait techniquement difficile à appliquer à un problème de physique atomique par exemple, et le bénéfice pour l'expérimentateur serait contestable (l'intérêt pour le spectroscopiste de connaître la trajectoire des électrons au sein des atomes est très faible)<sup>68</sup>.

Pourtant, loin de ce dernier avis, je pense que l'intérêt est grand pour l'expérimentateur (ou le théoricien d'ailleurs) de disposer (pas nécessairement de calculer) de trajectoires bohmiennes. Car renoncer aux images peut être dommageable dans l'activité de découverte. Louis de Broglie a souligné l'intérêt qu'il trouvait aux images mentales : malgré « l'absence de garantie épistémologique que nous offrent les représentations concrètes, [...] elles sont néanmoins à l'origine des progrès les plus significatifs de la physique »<sup>69</sup>. Les représentations imagées peuvent ainsi avoir un intérêt heuristique pour les chercheurs :

le fait que la mécanique de Bohm [BQM] fournit des images [mentales] qui manquent dans l'explication orthodoxe [SQM], est une caractéristique attrayante pour les chercheurs intéressés à réfléchir sur les limites ou les extensions de la théorie quantique<sup>70</sup>.

Ainsi, l'ensemble des images mentales BQM (dont les trajectoires en particulier) « peut fournir une compréhension plus approfondie de la physique sous-jacente du microsysteme »<sup>71</sup>. Ceci peut être facteur de progrès scientifique.

Mais ce n'est pas tout. Le fait même qu'il existe plusieurs théories (BQM en plus de SQM) permet aux chercheurs non seulement de se poser différemment les problèmes mais aussi de se poser d'autres problèmes :

des formulations alternatives de la mécanique quantique peuvent fournir des voies alternatives pour rechercher les limites et les extensions possibles de la théorie quantique. [Ainsi] les travaux de John Bell sur la non-localité sont un exemple clair de l'utilité incontestable de [BQM] pour la compréhension des phénomènes quantiques.<sup>72</sup>

En effet, BQM « apporte un point de vue alternatif extrêmement utile. Par exemple, sans elle, il n'y aurait pas eu le théorème de Bell et il y aurait de nombreux aspects de la mécanique quantique que nous ne connaîtrions pas »<sup>73</sup>. En effet, c'est l'intérêt de Bell pour BQM qui a stimulé les recherches de ce dernier pour aboutir aux inégalités de Bell :

Bell a d'abord démontré que le théorème de von Neumann ne s'appliquait pas. Qu'il pouvait y avoir des variables cachées, ce qui l'a conforté dans son intérêt à l'égard de la théorie de Bohm. Mais ensuite, il a étudié cette théorie et constaté [que] dans le cas d'un système de deux particules [...] il y avait alors non-localité. C'est-à-dire qu'il a constaté que la deuxième particule n'obéissait plus à sa propre variable cachée, mais obéissait à ce qui était arrivé « très loin là-bas » à la première particule. C'est dans le cadre de la théorie de Bohm qu'il a trouvé cela. Et cela l'a incité à se demander si c'était une « vacherie » de la théorie de Bohm ou si c'était général. Il a étudié la question et il a découvert que c'était général<sup>74</sup>.

En conclusion, je pense que BQM propose au chercheur un outil heuristique qui peut être plus performant que SQM, tout particulièrement pour des systèmes simples (à une ou deux particules). Quoi qu'il en soit, disposer de BQM en plus de SQM est une chance pour la recherche en mécanique quantique.

-

68. VILA-VALLS 2012.

69. VILA-VALLS 2012.

70. ORIOLS et MOMPART 2012, p. 7, ma traduction.

71. PAN 2010, p. 873.

72. ORIOLS et MOMPART 2012, p. 7, ma traduction.

73. LALOË 2014, p. 249.

74. LALOË 2014, Intervention de Bernard d'Espagnat p. 249.





# **Conclusion**



## De la sous-détermination des théories par la phénoménologie

La théorie quantique enseignée traditionnellement, que nous avons nommée SQM dans ce mémoire, n'est qu'une des versions possibles de la description phénoménologique du monde microscopique. Ce n'est pas la seule compatible avec les données expérimentales connues. Pourtant, c'est souvent ce qui est très souvent suggéré par les manuels qui laissent entendre que SQM est *la* seule théorie quantique possible, soit en ne parlant pas des autres théories, soit même en niant toute alternative possible<sup>75</sup>.

Si SQM assume en particulier un « indéterminisme intrinsèque », le philosophe des sciences Jean Bricmont nous dit qu'« il s'agit bien là d'une assertion radicale qui doit être argumentée. Et la simple constatation du fait que la physique aujourd'hui se limite à prédire les fréquences de certains phénomènes ne peut sûrement pas suffire à établir une assertion aussi radicale »<sup>76</sup>. Or la théorie de l'onde pilote (à laquelle nous avons fait référence sous l'acronyme BQM) est justement une théorie causale, qui refuse l'indétermination de toutes les grandeurs physiques. Ainsi, le fait même que BQM existe prouve que SQM n'est *pas* la seule théorie quantique possible.

Et puisque BQM fait exactement les mêmes prédictions que SQM, SQM et BQM ne peuvent donc pas être départagées sur des bases expérimentales. L'existence de plusieurs théories quantiques incohérentes entre elles (du point de vue de leurs principes, des concepts qui les fondent et de leurs interprétations philosophiques diamétralement opposées) et pourtant tout-à-fait équivalentes en ce qui concerne leurs prédictions scientifiques est un exemple frappant de sous-détermination des théories<sup>77</sup> et de contingentisme<sup>78</sup>. Aussi, le rejet ou l'acceptation de l'une ou l'autre de ces théories ne peut se faire qu'après une étude approfondie de leurs spécificités propres et en comparant avantages et défauts de l'une et de l'autre, comme nous avons essayé de le faire dans ce travail. Rappelons donc brièvement les principaux points de ce dernier.

## Conclusion sur la description comparative de SQM et BQM

SQM et BQM s'appuient sur la – même – fonction d'onde  $\Psi$  qui constitue une sorte de « catalogue » de mesures possibles, avec la probabilité de chacune de ces mesures possibles. Si SQM postule la complétude de la description physique par la fonction d'onde, BQM propose une représentation physique enrichie par

---

75. Ainsi dans le manuel du français Aslangul lit-on : « la physique du monde microscopique ne peut être décrite que dans un cadre statistique, ou probabiliste » (ASLANGUL 2016, p. 340). D'autres réfutent toute possibilité d'existence aux variables cachées, à la position, à la vitesse et aux trajectoires. Ainsi trouve-t-on dans le manuel du lauréat du prix Nobel Feynman : « nous ne devrions pas parler de choses que nous ne pouvons pas mesurer. [...] Une chose n'a aucune place dans la théorie, sauf si elle peut être définie par une mesure. Et, comme on ne peut pas définir par la mesure une valeur précise de l'impulsion d'une particule localisée, l'impulsion n'a par conséquent aucune place dans la théorie » (FEYNMAN et al. 2018, p. 28). Un tel raisonnement disqualifierait aussi la fonction d'onde dont SQM se sert pourtant. . .

76. BRICMONT 2007, p. 11.

77. « Nature provides (often tight) constraints, but there still remains latitude in theory choice – in the present case, an interpretation or a world view » (CUSHING 1996, p. 13).

78. Pour les différentes acceptations du terme en philosophie des sciences, voir (SOLER 2006, pp. 564-566).

l'existence des trajectoires (dites « bohmiennes ») des particules. BQM est une théorie dite « à variables cachées » puisqu'elle postule, contrairement à SQM, que les positions des particules sont déterminées (même si elles sont inconnues).

Selon BQM, la connaissance de la position initiale d'une particule donne accès à la possibilité de la détermination de toutes les positions ultérieures (c'est-à-dire de la trajectoire). En effet, la particule est en quelque sorte « guidée » par l'onde qui lui est associée car il est possible de déterminer la vitesse (ou l'accélération) de la particule grâce à la fonction d'onde  $\Psi$ . BQM utilise ainsi l'onde et la particule, deux concepts qui coexistent sans s'exclure, aux statuts cependant différents (et différents aussi de ceux qu'ils peuvent avoir en physique classique).

A l'inverse, si SQM s'appuie parfois sur la complémentarité pour interpréter les phénomènes observés en utilisant les images classiques d'onde et de particule, ces dernières s'excluent l'une l'autre. Autrement dit, le système n'est ni une onde (d'ailleurs  $\Psi$  n'est pas relative à une onde au sens classique du terme), ni une particule. En effet, SQM rejette les concepts corpusculaires classiques (position, trajectoire, ...) en supposant l'indétermination de ces précédentes variables. En se limitant aux prédictions des résultats de mesure, SQM se revendique comme une épistémologie sans ontologie. Mais cela est une position de principe qu'il est bien difficile à tenir, car en pratique on discerne dans les manuels une tendance à « ontologiser » souvent les objets mathématiques utilisés.

Du fait de l'indétermination des grandeurs physiques, la probabilité de mesure pour SQM est due à un hasard fondamental, intrinsèque. La probabilité associée à chaque variable aléatoire est fournie par  $\Psi$ , qui permet ainsi un traitement statistique. Inversement, en BQM les probabilités de mesure traduisent une incertitude due à un manque d'information. Cette information manquante se trouve dans les variables « cachées » et le traitement statistique est permis par  $\Psi$  qui estime la probabilité de présence de la particule. Bien qu'elles n'aient pas le même sens dans les cas SQM et BQM, les probabilités de mesure sont numériquement identiques puisque elles sont déterminées à partir de la même fonction d'onde  $\Psi$ . Ainsi, le traitement statistique d'un mesurage répété donne donc la même mesure moyenne et le même écart type pour ces deux théories.

Selon SQM, lors du mesurage, du fait de l'interaction entre le système mesuré et l'appareil de mesure, le système intriqué a pour fonction d'onde une combinaison linéaire de paquets d'onde correspondant à un ensemble de mesures possibles (cf. [superposition](#)). L'effondrement du paquet d'ondes pour le système étudié mène à l'unicité de l'indication de l'appareil de mesure. Ainsi  $\Psi$ , catalogue de potentialités, « s'actualise » du fait de l'effondrement du paquet d'onde en un état unique parmi ces possibilités. Cet effondrement du paquet d'onde constitue pour l'évolution du système une rupture aléatoire, non causale et brutale qui implique l'intervention d'un observateur. Selon BQM au contraire,  $\Psi$  est une somme de paquets d'ondes, tous vides sauf un. L'évolution du système et de l'appareil de mesure est dû au guidage par la fonction d'onde qui s'effectue sans rupture, de façon déterministe et sans intervention de l'observateur.

Si la mesure en physique classique revient au « prélèvement » d'une propriété intrinsèque à un objet réel, il n'en va plus de même en mécanique quantique. En SQM, toutes les mesures sont contextuelles (elles dépendent essentiellement de la façon dont est conduite l'expérience, du contexte), conformément au fait que toutes les grandeurs sont indéterminées. La mesure en BQM est bien souvent contextuelle aussi, mais certaines grandeurs, nommées « êtrables », sont caractéristiques de la particule, comme sa position. Quoi qu'il en soit, il existe des traits qui différencient fondamentalement physiques classique et quantique (SQM et BQM), même si la mécanique classique apparaît comme un cas asymptotique de SQM ou BQM.

## Conclusion sur les défauts et qualités comparés de SQM et BQM

La gestion de la mesure par l'effondrement du paquet d'ondes en SQM présente de nombreux points problématiques (résumés sous le vocable de « problème de la mesure »). D'une part, le concept de mesure, qui implique une rupture dans l'évolution de la fonction d'onde, est non défini en SQM. D'autre part il s'adosse à la physique classique et ainsi nécessite une division – problématique – du monde entre microscopique obéissant à la physique quantique et macroscopique obéissant à la physique classique. Enfin, la mesure en SQM sous-tend l'existence d'un sujet conscient qui réalise l'expérience. Si la décohérence fait disparaître en SQM l'articulation problématique entre microscopique et macroscopique, elle n'explique pas pour autant l'effondrement du paquet d'onde dont la nécessité subsiste. Bien loin des problèmes soulevés en SQM, la mesure en BQM est un processus comme un autre qui n'implique aucune règle spécifique. BQM n'est pas une solution au problème de la mesure, mais présente en fait une absence de problème, ce qui lui confère sur ce sujet une grande supériorité sur SQM.

Si BQM est préférable à SQM en ce qui concerne le « problème de la mesure », il est souvent invoqué contre cette théorie le « rasoir d'Ockham ». En ajoutant les positions à la fonction d'onde, BQM présenterait une surcharge formelle comparativement à SQM alors même qu'elle ne propose pas plus de prédictions expérimentales. Or de son côté SQM, en nécessitant des axiomes spécifiquement dédiés au problème de la mesure, a plus d'axiomes que BQM. En prenant en compte aussi bien les axiomes que les objets impliqués dans les deux théories, nous avons montré un parallélisme formel entre SQM et BQM. Aussi, il n'est pas convaincant d'évoquer le « rasoir d'Ockham » pour préférer SQM (ni BQM d'ailleurs).

Cependant une comparaison des simplicités de SQM et BQM du point de vue opérationnel permet de préférer SQM. En effet, pour SQM, il suffit de déterminer  $\Psi$ , tandis que BQM peut prolonger – et ce peut être ardu – les calculs nécessaires du fait de la détermination des trajectoires. Il faut reconnaître toutefois que BQM propose deux voies opérationnelles : la détermination des trajectoires à partir de la fonction d'onde ou l'inverse.

Nous avons conclu sur une comparaison de l'intelligibilité dans le cas de SQM et BQM qui s'appuie sur une typologie des représentations mentales (procédures, concepts, images) qui peuvent être activées lorsque l'on « fait de la physique ». La détermination de la fonction d'onde  $\Psi$  procure une représentation mentale de type procédural particulièrement robuste (et cela vaut aussi bien pour SQM que pour BQM). Les autres représentations mentales auxquelles fait appel BQM sont proches de celles de la mécanique classique. En se fondant sur le concept de dualité, BQM s'appuie sur deux images qui coexistent en permanence (l'onde et la particule). A l'inverse, en SQM les représentations conceptuelles et imagées ne sont pas uniques, elles changent brusquement lors de la mesure. Le langage révèle d'ailleurs que les images mentales mobilisées par SQM sont problématiques, car fragmentaires. Aussi, les physiciens qui utilisent SQM se « raccrochent » souvent à une représentation mentale purement procédurale du fait de la faiblesse des représentations imagées. Afin de dépasser les conceptions antérieures (propres à la mécanique classique) qui font obstacle à l'apprentissage de la mécanique quantique, nous avons proposé trois stratégies didactiques (deux qui utilisent SQM, et une qui pourrait s'appuyer sur BQM). Si chacune de ces trois voies a des avantages, il nous semble que BQM présente un intérêt pédagogique supérieur à SQM parce qu'elle fournit des images mentales non fragmentaires. Pour la même raison, BQM pourrait présenter un intérêt heuristique certain pour le chercheur. Il semblerait préférable pour le physicien expérimenté de cultiver les deux théories. Ne tout simplement pas s'intéresser à BQM, c'est se passer d'une théorie stimulante.

## Limites de ce travail

Ce mémoire a été réalisé en une année. Cela n'a pas été suffisant pour pousser plus loin l'étude comparative entre SQM et BQM. Il faut souligner ici les limites de ce travail qui ne s'est intéressé qu'à des systèmes quantiques non relativistes<sup>79</sup>, et n'a pas en particulier abordé la théorie quantique des champs<sup>80</sup>. Même dans ce cadre limité, des points mériteraient une investigation plus poussée en particulier au sujet du raccordement à la mécanique classique<sup>81</sup>, pour l'effet tunnel<sup>82</sup>, dans le cadre de la prise en compte du spin<sup>83</sup>, ou pour plusieurs particules<sup>84</sup>.

-

---

79. Des références bibliographiques existent sur le sujet (TUMULKA 2018).

80. Cf. encore (TUMULKA 2018).

81. Une discussion apparaît chez Oriols et Mompert (ORIOLS et MOMPART 2012, pp. 19-28) et chez Gondran père et fils (M. GONDRAN et A. GONDRAN 2014, chap. 7).

82. Cf. (LEAVENS 1996).

83. Cf. (ORIOLS et MOMPART 2012, p. 35), (M. GONDRAN et A. GONDRAN 2014, chap. 5).

84. Cf. (ORIOLS et MOMPART 2012, pp. 31-44), (M. GONDRAN et A. GONDRAN 2014, chap. 8).

# **Annexes**





# Annexe A

## Repères biographiques pour quelques physiciens cités

### Aspect



Alain Aspect est un physicien français né le 15 juin 1947 à Agen.

Autour de 1980, il a lors de sa thèse effectué un test expérimental portant sur le paradoxe EPR montrant une violation des inégalités de Bell, montrant la non [localité](#) de la mécanique quantique.

### Bell



John Stewart Bell (28 juin 1928, Belfast - 1er octobre 1990, Genève) est un physicien nord-irlandais.

Défenseur de la théorie bohémienne, il est un de ceux qui ont le plus contribué à diffuser la théorie de l'onde pilote. Il est l'auteur du théorème sur les inégalités de Bell qui permet le test expérimental du paradoxe EPR sur la [localité](#).

### Bohm



David Bohm (20 décembre 1917 Pennsylvanie - 27 octobre 1992 Londres) est un physicien d'origine américaine.

Il a redécouvert (et étendu) en 1952 la théorie de l'onde pilote de Louis [de Broglie](#). En 1951, David Bohm propose une variante de l'expérience de pensée EPR proposée initialement par [Einstein](#). C'est une version EPRB qui sera testée par Alain [Aspect](#). Bohm a laissé son nom associé à celui d'Yakir Aharonov en 1959 à l'effet Aharonov-Bohm. Cet effet est le nom donné au fait que le mouvement d'une particule chargée puisse être affecté par un champ magnétique alors même que sa trajectoire classique se trouve hors de ce champ.

Bohm soutient sa thèse de doctorat à Berkeley (Californie) en 1943 auprès d'Oppenheimer. En 1947 il devient assistant à Princeton (où il rencontre Einstein). Le FBI le considère comme communiste et danger

pour la sécurité nationale. Refusant de témoigner dans le cadre des procès du sénateur Mc Carty, il perd son poste d'enseignant à Princeton en 1951. [Einstein](#) l'aide à trouver un nouveau poste à Sao Paulo (Brésil) en 1951 puis à Haifa (Israël) en 1955. En 1957 Bohm s'installe en Angleterre, d'abord à Bristol puis il enseigne au Birbeck Collège de Londres de 1961 à sa retraite en 1987. Pour plus d'informations sur David Bohm, on se reportera à la thèse de Besson ([BESSON 2018](#), pp. 42-46).

## Bohr



Niels Henrik David Bohr (7 octobre 1885 à Copenhague, Danemark - 18 novembre 1962 à Copenhague) est un physicien danois. Il reçoit le prix Nobel de physique en 1922.

Il est l'auteur d'un modèle de l'atome en 1913 dans le cadre de l'« ancienne théorie des quanta ». Longtemps directeur d'un laboratoire de physique à Copenhague (ville qui donne son nom à l'interprétation de Copenhague), Bohr est en quelque sorte la figure tutélaire de l'école de Copenhague, même si sa vision diffère parfois (en particulier sur la mesure qui pour Bohr ne fait pas appel à l'[effondrement du paquet d'ondes](#)) du reste des physiciens dits « bohriens ». Il développe le concept interprétatif de [complémentarité](#).

## Born



Max Born (11 décembre 1882 à Breslau, Empire allemand - 5 janvier 1970 à Göttingen, Allemagne de l'Ouest) est un physicien allemand qui reçoit le prix Nobel de physique de 1954.

Longtemps directeur d'un laboratoire de physique à Göttingen, il fuit l'Allemagne nazie en s'établissant d'abord à Cambridge en 1933, puis à Édimbourg en 1936 avant de revenir à Göttingen en 1953.

Il donne son nom à la [règle de Born](#).

## Brillouin



Léon Brillouin, né le 7 août 1889 à Sèvres et mort le 4 octobre 1969 à New York, est un physicien franco-américain. Il est issu d'une famille de scientifiques (c'est le fils du physicien Marcel Brillouin, le petit-fils du physicien Éleuthère Mascart et l'arrière-petit-fils du mathématicien Charles Briot).

De 1928 à 1932, il est titulaire de la chaire de théories physiques à l'Institut Henri Poincaré de Paris (Louis [de Broglie](#) lui succède), puis est élu au Collège de France, succédant à son père Marcel Brillouin. En 1940, il émigre aux États-Unis où l termine sa carrière.

Il a donné son nom à différents phénomènes et concepts ondulatoires (diffusion Brillouin et zones de Brillouin en particulier). Il participe à la diffusion de la mécanique quantique en France avant la seconde guerre mondiale et à la fondation de la physique des solides, application de la mécanique quantique.

## de Broglie



Louis de Broglie (prononcer « de Breuil »), prince puis duc à la mort de son frère aîné Maurice physicien lui aussi, né le 15 août 1892 à Dieppe et mort le 19 mars 1987 à Louveciennes, a obtenu le prix Nobel de physique en 1929. Académicien et enseignant (en particulier à l'Institut Henri Poincaré de Paris), il est l'auteur de nombreux ouvrages de vulgarisation.

En 1924, il soutient sa thèse de doctorat dans laquelle il postule l'existence des ondes de matière : à toute particule, il associe une onde dont il fournit la formule qui permet de déterminer la longueur d'onde.

En 1927, il propose la théorie de l'onde pilote au cinquième Conseil Solvay. S'il renonce à une vision causale de la mécanique quantique de 1928 à 1951, il consacra le reste de sa vie à chercher à nouveau à mettre au point une telle théorie (nommée théorie de la double solution).

Voir aussi l'annexe [E](#) relative à la biographie de Louis de Broglie.

## Cohen-Tannoudji



Claude Cohen-Tannoudji est un physicien français né le 1er avril 1933 à Constantine (en Algérie), prix Nobel de physique en 1997 pour ses recherches sur le refroidissement et le confinement d'atomes par laser.

Il est un des auteurs d'un manuel de mécanique quantique qui fait référence en France.

## Dirac



Paul Adrien Maurice Dirac, né le 8 août 1902 à Bristol (Angleterre) et décédé le 20 octobre 1984 à Tallahassee (Floride - États-Unis) est un physicien britannique colauréat avec Erwin [Schrödinger](#) du prix Nobel de physique de 1933.

Dirac occupe la chaire de professeur lucasien de mathématiques de l'université de Cambridge de 1932 à 1969. En 1970, il rejoint l'université de Floride.

Il laisse son nom à l'équation relativiste décrivant l'électron, et contenant en soi le spin, ainsi qu'à une distribution mathématique. En 1930, il utilise l'algèbre des opérateurs linéaires comme une généralisation des théories de [Heisenberg](#) et de [Schrödinger](#) et introduit ainsi la notation bra-ket. Son nom est aussi associé à celui de [Fermi](#) pour les fermions qui suivent la statistique de Fermi-Dirac.

## Einstein



Albert Einstein, né le 14 mars 1879 à Ulm, dans le Wurtemberg (Empire allemand), et mort le 18 avril 1955 à Princeton, dans le New Jersey (États-Unis) publie sa théorie de la relativité restreinte en 1905 et sa théorie de la gravitation, dite relativité générale, en 1915.

Il contribue largement au développement de la mécanique quantique et reçoit le prix Nobel de physique de 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique qui fait appel à la notion de quantum énergétique

associé à l'onde lumineuse (le photon). Il est un des auteurs du paradoxe EPR dont le but était de mettre en cause la complétude de SQM du fait de la non-[localité](#) de cette dernière.

## Ehrenfest



Paul Ehrenfest (né le 18 janvier 1880 à Vienne et mort le 25 septembre 1933 à Amsterdam) est un physicien autrichien.

Il succède à [Lorentz](#) à la chaire de physique théorique de l'université de Leyde. Il laisse son nom au théorème d'Ehrenfest en lien avec le principe de correspondance.

## Fermi



Enrico Fermi né le 29 septembre 1901 à Rome et mort le 28 novembre 1954 à Chicago est un physicien italien naturalisé américain lauréat du prix Nobel de physique en 1938.

En 1926, il devient professeur de physique théorique à l'université La Sapienza de Rome et dirige les recherches de l'Institut de physique. Fermi, dont la femme est juive, émigre aux États-Unis le 2 janvier 1939 et participe aux recherches en physique nucléaire en particulier à Los Alamos.

Il développe avec [Dirac](#) la théorie statistique de Fermi-Dirac pour les fermions.

## Heisenberg



Werner Heisenberg est né le 5 décembre 1901 à Wurtzbourg et mort le 1er février 1976 à Munich. C'est un physicien allemand qui a obtenu le prix Nobel de physique en 1932.

Après son doctorat soutenu en 1923, il devient l'assistant de Max [Born](#) à Göttingen et séjourne à Copenhague en 1926 et 1927 dans le laboratoire de Niels [Bohr](#). Heisenberg est professeur à l'université de Leipzig entre 1927 et 1941. Puis il travaille à l'institut Kaiser-Wilhelm de physique à Dahlem et enseigne à l'université Humboldt de Berlin. De 1942 à 1945, Heisenberg dirige le programme nucléaire allemand.

En 1925, avec Max [Born](#) et Pascual [Jordan](#), Heisenberg est l'auteur de la première version de la mécanique quantique (dite des matrices). Il laisse son nom aux [inégalités de Heisenberg](#).

## Jordan



Pascual Jordan, né le 18 octobre 1902 à Hanovre et mort le 31 juillet 1980 à Hambourg, est un physicien allemand.

Avec Max [Born](#), alors directeur du département de physique théorique de Göttingen et qui a dirigé son doctorat en 1924, et l'assistant de ce dernier Werner [Heisenberg](#), Jordan est l'auteur de la première théorie quantique (dite des matrices).

Son implication dans le parti national-socialiste explique probablement qu'il n'ait pas reçu le prix Nobel.

## Langevin



Paul Langevin, né à Paris le 23 janvier 1872 et mort dans la même ville le 19 décembre 1946, est un physicien et pédagogue français.

Langevin contribue en particulier à la théorie du magnétisme et à celle du mouvement brownien. Il participe à l'organisation des Conseil Solvay. Il laisse son nom à un cadre de réforme de l'enseignement en France (le plan Langevin-Wallon).

Il fait partie du jury de thèse de Louis [de Broglie](#).

## Lorentz



Hendrik Antoon Lorentz, né le 18 juillet 1853 à Arnhem (Pays-Bas) et mort le 4 février 1928 à Haarlem (Pays-Bas) est un physicien néerlandais qui a reçu le prix Nobel de physique en 1902.

Ses travaux portent en particulier sur l'électromagnétisme. Il laisse son nom à la force de Lorentz subie par une particule chargée dans un champ électromagnétique et aux transformations de Lorentz utilisées en relativité restreinte.

Lorentz participe à l'organisation des Conseils Solvay.

## von Neumann



John von Neumann, né Janos Lajos Neumann le 28 décembre 1903 à Budapest (Hongrie) et mort le 8 février 1957 à Washington (USA) est un mathématicien et physicien hongrois naturalisé américain en 1937.

Il est professeur de mathématiques à Princeton de 1933 à sa mort et travaille aussi au laboratoire de Los Alamos pour la mise au point de la bombe atomique.

John von Neumann est l'auteur en 1932 d'un traité sur les fondements axiomatiques de la mécanique quantique (NEUMANN 1932) qui fait le lien entre mécanique ondulatoire (de [Schrödinger](#)) et « mécanique des matrices » mise au point à Göttingen. Dans cet ouvrage, von Neumann développe une théorie de la mesure en mécanique quantique (cf. 3.2.1). John von Neumann présente aussi une démonstration qui est censée disqualifier les théories à variables cachées, mais une erreur dans sa démonstration est mise en évidence pour la première fois par la mathématicienne et philosophe Grete Hermann en 1935 (SOLER 2009). Cependant, la réfutation du théorème de von Neumann par Grete Hermann est passée largement inaperçue dans le milieu des physiciens pendant de longues années.

## Pauli



Wolfgang Pauli, né la 25 avril 1900 à Vienne et mort le 15 décembre 1958 à Zurich, est un physicien autrichien titulaire du prix Nobel de physique en 1945.

Pendant les années 1922 et 1923, il travaille aux côtés de Niels [Bohr](#) à Copenhague. Entre 1923 et 1928, il enseigne à Hambourg avant de partir à l'ETH de Zurich, où il obtient un poste de professeur de physique théorique. À partir de 1935, il occupe des postes de professeur invité aux États-Unis.

En 1924, Pauli découvre le spin du noyau. Il a laissé son nom au principe d'exclusion pour les fermions et a postulé en 1930 l'existence du neutrino.

## Planck



Max Planck, né le 23 avril 1858 à Kiel (duché de Schleswig) et mort le 4 octobre 1947 à Göttingen (Allemagne), est un physicien allemand lauréat du prix Nobel de physique en 1918.

Il succède à Kirchhoff à l'université Humboldt de Berlin, poste qu'il garde environ quarante ans.

Planck détermine la loi de répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir en introduisant la constante  $h$  qui portera son nom.

Avec Walther Nernst, Planck organise en 1911 le premier congrès Solvay.

## Rosenfeld



Léon Rosenfeld (14 août 1904 et mort le 23 mars 1974) est un physicien théoricien belge.

Après son doctorat obtenu à l'université de Liège (1926), il fait de fréquents séjours à Copenhague, devient le disciple et l'ami de Niels [Bohr](#).

## Schrödinger



Erwin Schrödinger, né le 12 août 1887 à Vienne et mort le 4 janvier 1961 dans la même ville, est un physicien autrichien colauréat avec [Dirac](#) du prix Nobel de physique de 1933.

Il a laissé son nom à l'équation d'évolution de la fonction d'onde associée à l'état d'une particule non relativiste ([équation de Schrödinger](#)) en 1926 et a soumis le paradoxe du [chat de Schrödinger](#) en 1935.

En 1927, il prend la succession de Max [Planck](#) à la Friedrich-Wilhelms-Universität à Berlin. En 1933, Schrödinger décide de quitter l'Allemagne à cause de l'arrivée au pouvoir du nazisme et entre à l'université d'Oxford. Il rejoint l'université de Graz en 1936 mais quitte l'Autriche après l'annexion de ce pays par l'Allemagne. En 1940, il s'installe à Dublin (Irlande).

# Annexe B

## Glossaire

### chat de Schrödinger

Le chat de Schrödinger est une expérience de pensée imaginée en 1935 par le physicien Erwin [Schrödinger](#) afin de mettre en évidence de façon très imagée la notion de [superposition](#) quantique. Le mécanisme imaginé par [Schrödinger](#) ([SCHRÖDINGER 1951](#), p. 106) lie l'état (mort ou vivant) d'un chat à un dispositif microscopique (radioactif) : la fonction d'onde associée au chat est une combinaison linéaire de deux paquets d'onde correspondant à un ensemble de mesures possibles (l'état mort et l'état vivant). Si l'on accorde un statut ontologique à la fonction d'onde, cela revient à dire que le chat est dans la superposition de deux états quantiques (l'état mort et l'état vivant).

### complémentarité

« La complémentarité est le thème central de la conférence de Bohr à Côme en septembre 1927 au Congrès international de Physique commémorant le centenaire de la mort de Volta. Thème repris et débattu, un mois plus tard, à Bruxelles lors du 5e Conseil de Physique Solvay. Dès les premières occurrences, la notion semble bien maîtrisée. Elle se définit par trois idées essentielles :

- l'existence de plusieurs descriptions nécessaires d'un même phénomène ;
- l'idée qu'il existe des couples de descriptions mutuellement exclusives, qui ne peuvent être appliquées simultanément ;
- l'idée que ni l'une ni l'autre n'est suffisante pour donner une description exhaustive du phénomène en question ; et que, par conséquent, une description exhaustive au sens classique est impossible. » ([BENSAUDE VINCENT 1985](#), p. 235)

### contextualité

La contextualité est le fait que les valeurs mesurées des grandeurs physiques dépendent nécessairement du contexte expérimental, et non des entités physiques seules. Ainsi le résultat d'une mesure (portant sur un opérateur A qui commute avec les opérateurs B et C, B et C ne commutant pas entre eux) dépend du contexte : le résultat de la mesure de A avec B peut être en désaccord avec celui de la mesure de A avec C.

## décohérence

Le phénomène de suppression des interférences est le fondement de ce qu'on appelle la décohérence. La décohérence résulte de l'interaction du système avec son environnement (en particulier avec un appareil de mesure, macroscopique). Une telle interaction de type mesure ne perturbe pas les états propres de l'observable mesurée. Le système subit une **intrication** avec l'environnement, mais les états entre lesquels l'interférence est supprimée sont ceux qui seraient eux-mêmes le moins intriqués avec l'environnement dans le cadre de cette interaction.

## effondrement du paquet d'ondes

SQM postule que la mesure d'une grandeur physique  $\mathcal{A}$  ne peut donner comme résultat qu'une des valeurs propres de l'observable  $\hat{A}$  correspondante.

« von Neumann a soutenu que, dans le contexte d'une mesure, il arrive un moment où  $[\Psi]$  se réduit à un seul de ses termes. Lequel ? Il est impossible de le prévoir. On peut toutefois établir des probabilités. [...] Le passage aléatoire de la superposition à un seul de ses termes s'appelle l'effondrement du vecteur d'état. »<sup>1</sup> Il se passe donc lors de la mesure la transformation

$$\Psi = \sum_{k=1}^N c_k \alpha_k \beta(y - y_k) \quad \rightarrow \quad \Psi = \alpha_j \beta(y - y_j)$$

(où  $j \in [1; N]$ ), avec une probabilité  $|c_j|^2$  donnée par la **règle de Born**. Aussi, l'appareil de mesure est-il dans l'état  $\beta(y - y_j)$  : il pointe sur l'indication  $Y \approx y_j$  à  $\Delta y$  près. L'interprétation est la suivante : la mesure a donné  $a_j$ , une valeur propre de  $\hat{A}$ .

## équation de guidage

Dans le cadre de la théorie BQM, on peut déduire la vitesse  $\vec{v}$  d'une particule quantique non relativiste de masse  $m$  de l'argument de la fonction d'onde  $\Psi = R \exp(i\frac{S}{\hbar})$ , où  $R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+$  et  $S \in \mathbb{R}$  (une action en  $J \cdot s$ ) par l'équation de guidage :

$$\vec{p} = m\vec{v} = \overrightarrow{\text{grad}}(S)$$

## équation de la dynamique bohmiennne

L'équation de la dynamique bohmiennne donne en BQM l'accélération  $\vec{a}$  d'une particule de masse  $m$  non relativiste :

$$m\vec{a} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) - \overrightarrow{\text{grad}}(Q)$$

Elle ressemble au principe fondamental de la dynamique en mécanique classique (aux potentiels  $V$  dont dérivent les forces classiques, il faut ajouter le **potentiel quantique**  $Q$ ).

1. MARCHILDON 2019.



## équation de Schrödinger

L'équation de Schrödinger, conçue par le physicien autrichien Erwin [Schrödinger](#) en 1925 ([SCHRÖDINGER 1926b](#)), décrit l'évolution dans le temps de la fonction d'onde  $\Psi$  associée à une particule massive (de masse  $m$ ) non relativiste dans un potentiel  $V$  :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + V \Psi$$

L'équation de Schrödinger est un des axiomes de SQM aussi bien que de BQM pour une particule massive non relativiste.

## équilibre quantique

En BQM, pour une fonction d'onde  $\Psi = R \exp(i\frac{S}{\hbar})$ , où  $R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+$  et  $S \in \mathbb{R}$  (une action en  $J \cdot s$ ), la distribution statistique des positions des particules est donnée à chaque instant par la densité de probabilité

$$\frac{d\mathcal{P}}{d\tau} = \rho = |\Psi|^2 = R^2$$

NB : il est possible de montrer que, suivant les axiomes de la théorie BQM, s'il existe un instant initial  $t_0$  tel que l'équilibre quantique est vérifié, alors l'équilibre quantique est vérifié à toute date  $t$  ultérieure :

$$\exists t_0 \text{ tel que } \rho(t_0) = |\Psi(t_0)|^2 \Rightarrow \rho(t) = |\Psi(t)|^2 \forall t$$

## expérience de Young

L'expérience des fentes (ou des trous) de Young est une expérience initialement d'optique qui met en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Le dispositif est composé d'un écran creusé de deux fentes parallèles (ou de deux trous) suivi d'un autre écran, parallèle au premier sur lequel on visualise l'intensité lumineuse résultant des interférences lumineuses.

Ce dispositif peut être, sous des formes parfois adaptées, utilisé pour visualiser les interférences d'ondes de matière de de Broglie.

Il est possible de réaliser l'expérience de Young avec un unique objet microscopique (par exemple un électron ou un photon). Cet objet microscopique est détecté sur le dernier écran en un point, avec une probabilité d'autant plus grande que  $|\Psi|^2$  y est d'autant plus grande.

## espace de configurations

Dans le cas d'une particule unique, l'espace de configuration est l'espace réel à trois dimensions. Cependant, dès que le système considéré fait intervenir plus qu'une particule (posons  $n$ , le nombre de particules impliquées), un champ  $f$  dans l'espace de configurations dépend des coordonnées  $(x_k, y_k, z_k)$  dans l'espace réel de chaque particule  $k \in \{1; \dots; n\}$  :

$$f(x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n)$$

Par exemple, s'il y a  $10^{23}$  particules, l'espace des configurations est un espace de dimension ( $3 \times 10^{23}$  !) absolument énorme.

## inégalités de Heisenberg

Les écarts quadratiques moyens  $\Delta \mathcal{A} = \sqrt{\langle (\mathcal{A} - \langle \mathcal{A} \rangle)^2 \rangle} = \sqrt{\langle \mathcal{A}^2 \rangle - \langle \mathcal{A} \rangle^2}$  de deux variables dites complémentaires sont liées par une inégalité proposée par [Heisenberg](#) en 1927 (Werner HEISENBERG 1927). Par exemple pour la position et la quantité de mouvement :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Ces inégalités apparaissent comme un principe d'indétermination pour SQM et un principe d'incertitude BQM.

## intrication

L'intrication quantique est un phénomène dans lequel plusieurs systèmes présentent des états quantiques dépendant les uns des autres quelle que soit la distance qui les sépare : il existe des corrélations entre les propriétés physiques observées de ces systèmes distincts.

Voir aussi [localité](#).

## localité

Selon le principe de localité, des objets distants ne peuvent avoir une influence directe l'un sur l'autre : un objet ne peut être influencé que par son environnement immédiat. BQM est non-locale puisque la fonction d'onde (et son état loin de la particule *vi* le potentiel quantique) influe sur le mouvement de la particule là où celle-ci se trouve.

Voir aussi [intrication](#).

## observable

Selon le postulat (SQM) de description des grandeurs physiques, toute grandeur physique mesurable  $\mathcal{A}$  (comme la position, la quantité de mouvement, l'énergie ou le spin) est décrite par un opérateur linéaire  $\hat{A}$  agissant dans l'espace vectoriel  $\mathcal{E}$  (espace de Hilbert) des états. Cet opérateur  $\hat{A}$  est appelé une observable.

## potentiel quantique

Dans le cadre de la théorie BQM, pour une fonction d'onde  $\Psi = R \exp(i\frac{S}{\hbar})$ , où  $R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+$  et  $S \in \mathbb{R}$  (une action en J·s), on peut définir le potentiel quantique par :

$$Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R}$$

## règle de Born

La règle de Born, du nom du physicien Max [Born](#), est une interprétation probabiliste des coefficients linéaires du principe de [superposition](#). Pour un système dont la fonction d'onde est une combinaison linéaire d'états  $\Psi = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n$ , la probabilité pour que le système soit observé dans l'état  $\alpha_n$  est :

$$\mathcal{P}_n = |c_n|^2$$

Dans BQM, la probabilité de trouver la particule suit la règle de Born sans que cette dernière soit à postuler puisqu'elle est déduite de la distribution initiale des positions.

## sensibilité aux conditions initiales

Dans un système chaotique, une modification infime des conditions initiales peut entraîner des résultats imprévisibles sur le long terme. Ce résultat est souvent vulgarisé sous le nom d'« effet papillon » ([LORENZ 1972](#)). En BQM, les interférences à l'état initial peuvent provoquer sur les trajectoires bohmiennes une sensibilité aux conditions initiales.

## superposition

Une fonction d'onde  $\Psi$  peut se présenter comme une combinaison linéaire, décomposable sur une base de vecteurs propres  $\{\alpha_n\}$  associés aux valeurs propres  $\{a_n\}$  de  $\hat{A}$  :

$$\Psi = \sum_{n=1}^N c_n \alpha_n$$

Ainsi,  $\Psi$  est une superposition de plusieurs fonctions d'onde  $\alpha_n$ . La possibilité de superposer les paquets d'ondes est la conséquence des lois de l'algèbre linéaire et du fait que l'[équation de Schrödinger](#) est linéaire. Voir aussi [chat de Schrödinger](#).



# Annexe C

## Présentation axiomatique de SQM et BQM dans le cas d'une unique particule non relativiste

### C.1 Axiomes de SQM

On peut fonder la théorie quantique standard sur six axiomes <sup>1</sup>.

— Postulat de description de l'état d'une particule quantique :

à tout instant  $t$ , l'état d'une particule quantique est complètement défini par sa fonction d'onde

$$\Psi(\vec{r}, t) = \langle \vec{r} | \Psi(t) \rangle$$

$|\Psi(t)\rangle$  appartenant à l'espace vectoriel  $\mathcal{E}$  (espace de Hilbert) des états.

— Postulat de description des grandeurs physiques :

toute grandeur physique mesurable  $\mathcal{A}$  (comme la position, la quantité de mouvement, l'énergie ou le spin) est décrite par un opérateur linéaire  $\hat{A}$  agissant dans  $\mathcal{E}$ ; cet opérateur  $\hat{A}$  est appelé une observable.

— Postulat de mesure des grandeurs physiques :

la mesure d'une grandeur physique  $\mathcal{A}$  ne peut donner comme résultat qu'une des valeurs propres de l'observable  $\hat{A}$  correspondante.

— Postulat de Born :

lorsqu'on mesure la grandeur physique  $\mathcal{A}$  sur un système quantique, la probabilité  $P(a_n)$  d'obtenir la valeur propre  $a_n$  <sup>2</sup> s'obtient en sommant les projections sur une base orthonormée de ces vecteurs propres  $|u_n^i\rangle$  :

$$\mathcal{P}(a_n) = \sum_i |\langle u_n^i | \Psi \rangle|^2$$

— Postulat de réduction du paquet d'ondes :

si la mesure de la grandeur physique  $\mathcal{A}$  sur le système dans l'état  $|\Psi\rangle$  donne le résultat  $a_{n_0}$ , l'état

---

1. On suit ici la présentation du manuel de [Cohen-Tannoudji](#) (COHEN-TANNOUDJI, LALOË et DIU 2018, pp. 214-218).

2. Il s'agit du postulat de Born pour un spectre discret. Lorsqu'on mesure la grandeur physique  $\mathcal{A}$  sur un système quantique, la probabilité  $d\mathcal{P}(\alpha)$  d'obtenir un résultat compris entre  $\alpha$  et  $\alpha + d\alpha$  est égale au produit de  $d\alpha$  par le carré du module de la projection de la fonction d'onde sur le vecteur propre de  $\hat{A}$  associé à la valeur propre  $\alpha$  :

$$d\mathcal{P}(\alpha) = |\langle v_\alpha | \Psi \rangle|^2 d\alpha$$

où  $|v_\alpha\rangle$  est le vecteur propre normé de  $\hat{A}$  associé à la valeur propre  $\alpha$ .

du système immédiatement après la mesure est la projection normée de  $|\Psi\rangle$  sur le sous-espace propre associé à  $a_{n_0}$  :

$$|\Psi\rangle = \sum_n \sum_i c_n^i |u_n^i\rangle \longrightarrow |\Psi\rangle = \frac{\sum_i c_{n_0}^i |u_{n_0}^i\rangle}{\sqrt{\sum_i |c_{n_0}^i|^2}}$$

— Postulat d'évolution temporelle :

l'évolution dans le temps de la fonction d'onde  $\Psi(x, t)$  est régie, pour une particule quantique unique et sans spin, par l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle \Rightarrow i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t)$$

où  $V$  est le potentiel (une énergie) dont dérivent les forces auxquelles est soumise la particule.

## C.2 Axiomes de BQM

Pour plus d'efficacité nous écrivons par la suite la fonction d'onde sous la forme

$$\Psi = R \exp\left(i \frac{S}{\hbar}\right) \quad \text{où } R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+ \text{ et } S \in \mathbb{R}$$

( $S$  est une action en  $J \cdot s$ ).

La théorie de l'onde pilote peut être fondée, elle, sur trois axiomes<sup>3</sup> que nous allons lister.

— Postulat d'évolution temporelle de la fonction d'onde :

l'évolution dans le temps de la fonction d'onde  $\Psi$  est régie, pour une particule quantique unique et sans spin, par l'équation de Schrödinger :

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

$V$  est là aussi le potentiel classique dont dérivent les forces classiques auxquelles est soumise la particule.

On remarque que la fonction d'onde évolue de la même façon en mécanique quantiques standard et bohmiennes. Cependant, il n'y a pas, en théorie de l'onde pilote, de rupture d'évolution de  $\Psi$  comme celle invoquée lors de son effondrement dans le cas standard.

— Postulat d'équilibre quantique :

la distribution statistique des positions des particules est donnée à chaque instant<sup>4</sup> par

$$\frac{d\mathcal{P}}{d\tau} = \rho = |\Psi|^2 = R^2$$

3. PASSON 2006.

4. NB : il est possible de montrer que, suivant les axiomes de la théorie dBB, s'il existe un instant initial  $t_0$  tel que l'équilibre quantique est vérifié, alors l'équilibre quantique est vérifié à toute date  $t$  ultérieure :

$$\exists t_0 \text{ tel que } \rho(t_0) = |\Psi(t_0)|^2 \Rightarrow \rho(t) = |\Psi(t)|^2 \forall t$$

- Postulat d'équation de guidage :  
la vitesse  $\vec{v}$  de la particule de masse  $m$  suit l'équation pilote (ou équation de guidage) :

$$m \vec{v} = \overrightarrow{\text{grad}}(S)$$

Ainsi, la particule suit une trajectoire continue sur laquelle elle possède une position bien définie et elle est guidée par la fonction d'onde (via l'argument  $\frac{S}{\hbar}$  de cette dernière).

### C.3 Autres présentations de BQM

On va donner dans ce qui suit d'autres lois de BQM en les déduisant des axiomes précédents, mais certaines de ces lois pourraient tout aussi bien être prises comme postulats dans une autre présentation possible de BQM.

Si la densité de courant de probabilité quantique est définie, aussi bien en mécanique quantique standard qu'en mécanique bohmienne :

$$\vec{J} = \frac{i\hbar}{2m} (\Psi \vec{\nabla} \Psi^* - \Psi^* \vec{\nabla} \Psi)$$

On peut développer l'expression de  $\vec{J}$  de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \frac{i\hbar}{2m} \left( R \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \vec{\nabla} \left( R \exp\left(-\frac{iS}{\hbar}\right) \right) - R \exp\left(-\frac{iS}{\hbar}\right) \vec{\nabla} \left( R \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \right) \right) \\ \vec{J} &= \frac{i\hbar R}{2m} \left( \left( \vec{\nabla}(R) - i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \right) - \left( \vec{\nabla}(R) + i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \right) \right) = \frac{R^2}{m} \vec{\nabla}(S) = \rho \vec{v} \end{aligned}$$

Comme l'équation de Schrödinger peut se ré-écrire avec  $R$  et  $S$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + V \Psi \Rightarrow i\hbar \frac{\partial (R \exp(i\frac{S}{\hbar}))}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \left( R \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \right) + V \left( R \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \right)$$

Le calcul du laplacien de  $\underline{\Psi}$  donne

$$\Delta(\underline{\Psi}) = \Delta \left( R \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \right) = \vec{\nabla}^2 \left( R \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \right) = \vec{\nabla} \left( \vec{\nabla}(R) \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) + i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \right)$$

$$\Delta(\underline{\Psi}) = \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \left[ \vec{\nabla}^2(R) + \frac{2i}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \cdot \vec{\nabla}(R) + i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}^2(S) - \frac{R}{\hbar^2} \left( \vec{\nabla}(S) \right)^2 \right]$$

soit, après simplification par  $\exp(i\frac{S}{\hbar})$ , l'équation de Schrödinger donne :

$$i\hbar \frac{\partial R}{\partial t} - R \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[ \Delta(R) + \frac{2i}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \cdot \vec{\nabla}(R) + i\frac{R}{\hbar} \Delta(S) - \frac{R}{\hbar^2} \left( \vec{\nabla}(S) \right)^2 \right] + V R$$

## équation de continuité

$$\hbar \frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[ \frac{2}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \cdot \vec{\nabla}(R) + \frac{R}{\hbar} \Delta(S) \right] \Rightarrow \frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla}(S)}{m} \cdot \vec{\nabla}(R) - R \frac{\vec{\nabla}(\vec{\nabla}(S))}{m}$$

En multipliant par  $2R$ , on arrive à

$$2R \frac{\partial R}{\partial t} + 2R \frac{\vec{\nabla}(S)}{m} \cdot \vec{\nabla}(R) + R^2 \frac{\vec{\nabla}(\vec{\nabla}(S))}{m} = 0$$

On reconnaît l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{avec} \quad \rho = R^2 \text{ et } \vec{J} = \rho \vec{v} = R^2 \frac{\vec{\nabla}(S)}{m}$$

C'est ce qui assure le fait que, s'il existe un instant initial  $t_0$  tel que l'équilibre quantique est vérifié, alors l'équilibre quantique est vérifié à toute date  $t$  ultérieure.

## équation de dynamique bohmiennne

Notons que la partie réelle de l'équation de Schrödinger avec  $R$  et  $S$  donne

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R} + \frac{1}{2m} (\vec{\nabla}(S))^2 + V$$

l'équation d'évolution de  $S$  :

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = E_c + Q + V$$

en posant l'énergie cinétique

$$E_c = \frac{1}{2} m \vec{v}^2 = \frac{1}{2m} (\vec{\nabla}(S))^2$$

et le potentiel quantique

$$Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R}$$

Comme l'accélération de la particule est la dérivée particulière (lagrangienne) de la vitesse,

$$\vec{a} = \frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\vec{\nabla}(S)}{m} + \overrightarrow{\text{grad}} \left( \frac{v^2}{2} \right) + \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{v}) \wedge \vec{v} = \frac{1}{m} \overrightarrow{\text{grad}} \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right) + \frac{\overrightarrow{\text{grad}}(E_c)}{m}$$

car  $\vec{v}$  dérivant d'un potentiel, son rotationnel est nul. En utilisant l'équation d'évolution de  $S$ , on trouve ainsi l'équation de la dynamique bohmiennne :

$$m \vec{a} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) - \overrightarrow{\text{grad}}(Q)$$

qui ressemble au principe fondamental de la dynamique en mécanique classique (aux potentiels  $V$  dont dérivent les forces classiques, il faut ajouter le potentiel quantique  $Q$ ). Appelons-la donc « équation fondamentale de la dynamique bohmiennne ».



## Vision lagrangienne

Dans une vision lagrangienne il s'agit de partir des trajectoires avec les vitesses  $\vec{v}$  (qui coïncident en eulérien et en lagrangien si la particule est en  $\vec{q}(t) = \vec{r}$ ), sans calculer d'abord la fonction d'onde puis déduire de ces trajectoires la fonction d'onde. Expliquons comment.

La dérivée lagrangienne de  $\rho$  est  $\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}\rho$  or l'équation de conservation de  $\rho$  donne

$$0 = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho\vec{v}) = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}\rho + \rho\vec{\nabla} \cdot \vec{v} \Rightarrow \frac{D\rho}{Dt} = -\rho \operatorname{div}\vec{v}$$

Puisque  $\rho = R^2$ , on a à intégrer le long des trajectoires

$$\frac{dR^2}{R^2} = 2 \frac{dR}{R} = -\operatorname{div}\vec{v} dt \Rightarrow \ln\left(\frac{R(\vec{r}(t_1), t_1)}{R(\vec{r}(t_0), t_0)}\right) = -\int_{t=t_0}^{t=t_1} \frac{1}{2} (\operatorname{div}\vec{v})_{\vec{r}(t)} dt$$

ce qui donne

$$R(\vec{r}(t_1), t_1) = \exp\left(-\int_{t=t_0}^{t=t_1} \frac{1}{2} (\operatorname{div}(\vec{v}))_{\vec{r}(t)} dt\right) R(\vec{r}(t_0), t_0)$$

La dérivée lagrangienne de  $S$  est  $\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}S$  or l'équation d'évolution de  $S$  donne :

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = E_c + Q + V \Rightarrow \frac{DS}{Dt} = -\frac{1}{2}\vec{v} \cdot \vec{\nabla}S + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R} - V + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}S = +\frac{1}{2}\vec{v} \cdot \vec{\nabla}S + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R} - V = L = E_c - Q - V$$

(qui est l'équation de Hamilton-Jacobi quantique). On a donc à intégrer le lagrangien le long des trajectoires  $dS = L dt$  :

$$S(\vec{r}(t_1), t_1) = S(\vec{r}(t_0), t_0) + \int_{t=t_0}^{t=t_1} L(t) dt$$

Comme  $\Psi = R \exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right)$ , et  $\exp\left(\frac{iS}{\hbar}(\vec{r}(t_1), t_1)\right) = \exp\left(\frac{iS}{\hbar}(\vec{r}(t_0), t_0)\right) \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{t=t_0}^{t=t_1} L(t) dt\right)$

$$\Psi(\vec{r}(t_1), t_1) = \exp\left(-\int_{t=t_0}^{t=t_1} \frac{1}{2} (\operatorname{div}(\vec{v}))_{\vec{r}(t)} dt\right) \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{t=t_0}^{t=t_1} L(t) dt\right) \Psi(\vec{r}(t_0), t_0) = K_{t_0 \rightarrow t_1} \Psi(\vec{r}(t_0), t_0)$$

où le propagateur est

$$K_{t_0 \rightarrow t_1} = \exp\left(-\int_{t=t_0}^{t=t_1} \frac{1}{2} (\operatorname{div}(\vec{v}))_{\vec{r}(t)} dt\right) \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{t=t_0}^{t=t_1} L(t) dt\right) \quad \text{avec } L = E_c - Q - V$$

## C.4 Mesures moyennes

En SQM, puisqu'on se rapporte à l'observable liée à l'opérateur linéaire hermitien  $\hat{A}$  agissant dans  $\mathcal{E}$ , on définit la moyenne de  $\mathcal{A}$  par

$$\langle \mathcal{A} \rangle = \langle \hat{A} \rangle = \int \Psi^* \hat{A} \Psi d\tau$$

$$\langle \hat{A} \rangle = \int \sum_{j,k} c_j^* \alpha_j(x)^* a_k c_k \alpha_k(x) d\tau = \sum_k \int c_k^* \alpha_k(x)^* a_k c_k \alpha_k(x) dx = \sum_k |c_k|^2 a_k$$

car  $\alpha_k$  est une base orthonormée  $\Rightarrow \int \alpha_k(x)^* \alpha_k(x) d\tau = 1$  et  $j \neq k \Rightarrow \int \alpha_j(x)^* \alpha_k(x) d\tau = 0$ .

Pour BQM on peut définir la moyenne de  $\mathcal{A}$  par

$$\langle \mathcal{A} \rangle = \langle A_B \rangle = \int \rho(\vec{r}, t) A_B(\vec{r}, t) d\tau$$

ce qui est cohérent avec la définition d'une moyenne statistique sur un très grand nombre de mesures. En

$$\text{effet, } \langle A_B \rangle = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^M A_B(\vec{r}_k(t))}{M} \text{ et } \rho(\vec{r}, t) = |\Psi(\vec{r}; t)|^2 = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^M \delta(\vec{r} - \vec{r}_k(t))}{M}.$$

Les deux façons (SQM et BQM) de définir la moyenne de  $\mathcal{A}$  doivent être cohérentes. Cela impose une relation entre les opérateurs bohmiens local et hermitien standard :

$$\langle \mathcal{A} \rangle = \langle A_B \rangle = \langle \hat{A} \rangle \Leftrightarrow A_B(\vec{r}, t) = \text{Re} \left( \frac{\Psi^*(\vec{r}, t) \hat{A} \Psi(\vec{r}, t)}{\Psi^*(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t)} \right)$$

En reprenant les notations vues dans le cadre de la théorie de la mesure, on peut remarquer que, comme les paquets d'ondes de l'appareil ne se chevauchent pas :

$$\int \beta^* \left( y - \frac{\gamma a_j t_f}{\hbar^2} \right) \beta \left( y - \frac{\gamma a_k t_f}{\hbar^2} \right) dy = 0 \quad \text{si } j \neq k$$

et

$$\beta \text{ normée} \Rightarrow \int \beta^* \left( y - \frac{\gamma a_k t_f}{\hbar^2} \right) \beta \left( y - \frac{\gamma a_k t_f}{\hbar^2} \right) dy = 1$$

donc la somme se réduit à

$$\langle \hat{A} \rangle (t) = \sum_k \int c_k^* \alpha_k(x)^* a_k c_k \alpha_k(x) dx = \sum_k |c_k|^2 a_k$$

car  $\alpha_k$  normée  $\Rightarrow \int \alpha_k(x)^* \alpha_k(x) dx = 1$ .

Ainsi l'intervention de l'appareil de mesure (avec sa fonction d'onde  $\phi_m$ ) ne change pas la moyenne trouvée dans le cas standard :

$$\langle \hat{A} \rangle = \iint \sum_{j,k} c_j^* \alpha_j(x)^* \beta^* \left( y - \frac{\gamma a_j t_f}{\hbar^2} \right) a_k c_k \alpha_k(x) \beta \left( y - \frac{\gamma a_k t_f}{\hbar^2} \right) dx dy = \sum_k |c_k|^2 a_k$$

Dans la mesure où  $\langle A_B \rangle = \langle \mathcal{A} \rangle = \langle \hat{A} \rangle = \sum_k |c_k|^2 a_k$ , on peut affirmer que la [règle de Born](#) (qui est le postulat probabiliste de SQM) est vérifiée aussi en BQM.

Donnons maintenant, dans quelques cas de grandeurs  $\mathcal{A}$ , l'opérateur hermitien  $\hat{A}$  utilisé en SQM et l'opérateur bohmiens local  $A_B$ , lui utilisé en BQM.

Dans le cas de la position, à une dimension suivant la direction repérée par  $x$ ,  $\hat{x} = x$  et  $x_B = x$ . En effet :

$$\langle \hat{x} \rangle = \int \Psi^*(x, t) x \Psi(x, t) dx = \int \rho(x, t) x dx = \langle x_B \rangle$$

Les choses deviennent différentes dans le cas de la quantité de mouvement. Là aussi, on s'intéressera à sa projection  $p_x$  sur l'axe repéré par  $x$ , pour simplifier. Comme  $\hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ ,

$$\langle \hat{p}_x \rangle = \int \Psi^*(x, t) \left( -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right) \Psi(x, t) dx = \int R \exp \left( -i \frac{S}{\hbar} \right) \left( -i\hbar \frac{\partial (R \exp(i \frac{S}{\hbar}))}{\partial x} \right) dx$$

Le calcul de la dérivée du produit donne

$$\langle \hat{p}_x \rangle = -i\hbar \int R \exp\left(-i\frac{S}{\hbar}\right) \left(\frac{\partial R}{\partial x} + \frac{iR}{\hbar} \frac{\partial S}{\partial x}\right) \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right) dx$$

La première intégrale est nulle :

$$\int_{-\infty}^{\infty} R \frac{\partial R}{\partial x} dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial R^2}{\partial x} dx = \frac{1}{2} [R^2]_{-\infty}^{\infty} = 0$$

(car  $R$  est nulle à l'infini). Donc la moyenne est bien réelle et vaut :

$$\int \Psi^*(x,t) \hat{p}_x \Psi(x,t) dx = \int R^2 \frac{\partial S}{\partial x} dx = \langle p_{xB} \rangle$$

Aussi  $p_{xB} = \frac{\partial S}{\partial x} = m v_{xB}$ , ce qui semble une définition « naturelle » de la quantité de mouvement pour une particule non relativiste.

Les différences sont marquées aussi dans le cas de l'énergie. Commençons par l'énergie cinétique. Comme l'opérateur hermitien associé à l'énergie cinétique est  $\hat{E}_c = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta$ , la moyenne de l'observable est :

$$\langle \hat{E}_c \rangle = \iiint \Psi^* \hat{E}_c \Psi d\tau = - \iiint \Psi^* \frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi d\tau = -\frac{\hbar^2}{2m} \iiint R \exp\left(-i\frac{S}{\hbar}\right) \Delta \left[ R \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right) \right] d\tau$$

Le calcul du laplacien de  $\underline{\Psi}$  donne

$$\begin{aligned} \Delta(\underline{\Psi}) &= \Delta\left(R \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right)\right) = \vec{\nabla}^2\left(R \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right)\right) = \vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}(R) \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right) + i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right)\right) \\ \Delta(\underline{\Psi}) &= \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right) \left[\vec{\nabla}^2(R) + \frac{2i}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \cdot \vec{\nabla}(R) + i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}^2(S) - \frac{R}{\hbar^2} (\vec{\nabla}(S))^2\right] \end{aligned}$$

donc

$$\langle \hat{E}_c \rangle = -\frac{\hbar^2}{2m} \iiint R \left[\vec{\nabla}^2(R) + \frac{2i}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \cdot \vec{\nabla}(R) + i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}^2(S) - \frac{R}{\hbar^2} (\vec{\nabla}(S))^2\right] d\tau = I_1 + I_2 + I_3$$

avec les trois termes :

$$I_1 = -\frac{\hbar^2}{2m} \iiint R \vec{\nabla}^2(R) d\tau = \iiint R^2 \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\vec{\nabla}^2(R)}{R}\right) d\tau = \langle Q \rangle$$

$$I_2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \iiint R \left[\frac{2i}{\hbar} \vec{\nabla}(S) \cdot \vec{\nabla}(R) + i\frac{R}{\hbar} \vec{\nabla}^2(S)\right] d\tau = -\frac{i\hbar}{2m} \iiint \vec{\nabla}\left(R^2 \vec{\nabla}(S)\right) d\tau$$

qui devient d'après Ostrogradsky :

$$I_2 = -\frac{i\hbar}{2} \iint \left(R^2 \frac{\vec{\nabla}(S)}{m}\right) \cdot \vec{d\sigma} = 0$$

car sur les bords  $\vec{J} = R^2 \frac{\vec{\nabla}(S)}{m} = \vec{0}$ . Et enfin

$$I_3 = -\frac{\hbar^2}{2m} \iiint R \left( -\frac{R}{\hbar^2} (\vec{\nabla}(S))^2 \right) d\tau = \frac{1}{2m} \iiint R^2 (\vec{\nabla}(S))^2 d\tau = \langle \frac{1}{2} m \vec{v}_B^2 \rangle$$

(ce dernier terme est la moyenne de l'énergie cinétique bohmiennne).

$$\langle \hat{E}_c \rangle = \frac{1}{2m} \iiint R^2 \left( -\hbar^2 \frac{\vec{\nabla}^2(R)}{R} + (\vec{\nabla}(S))^2 \right) d\tau = \langle E_{c_B} \rangle = \langle Q \rangle + \langle \frac{1}{2} m \vec{v}_B^2 \rangle$$

Ainsi l'opérateur bohmienn relatif à l'énergie cinétique est  $E_{c_B} = \frac{(\vec{\nabla}(S))^2}{2m} - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\vec{\nabla}^2(R)}{R} = \frac{1}{2} m \vec{v}_B^2 + Q$ , qui n'est pas l'énergie cinétique de la particule bohmiennne !

Pour l'hamiltonien  $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V$ , on aura donc

$$H_B = \frac{(\vec{\nabla}(S))^2}{2m} - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\vec{\nabla}^2(R)}{R} + V = \frac{1}{2} m \vec{v}_B^2 + Q + V$$

Ne nous étonnons pas de voir apparaître le potentiel quantique dans l'hamiltonien qui représente l'énergie totale de la particule du point de vue bohmiennne.

Les opérateurs associés au moment cinétique ne présentent pas de surprise particulière :

$$\langle \vec{L}_B \rangle = \int R^2(x, y, z, t) \vec{r} \wedge \vec{\nabla} S d^3\tau = \text{Re} \left( \iiint \Psi^*(x, y, z) (\vec{r} \wedge -i\hbar \vec{\nabla}) \Psi(x, y, z) d^3\tau \right) = \langle \hat{\vec{L}} \rangle$$

Le tableau C.1 récapitule les opérateurs en SQM et BQM.

opérateur	SQM	BQM
position	$\hat{x} = x$	$x_B = x$
quantité de mouvement	$\hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \neq m \frac{dx}{dt}$	$p_{x_B} = \frac{\partial S}{\partial x} = m v_{x_B}$
hamiltonien	$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}_x^2 + V = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V$	$H_B = \frac{1}{2} m \vec{v}_B^2 + Q + V = \frac{(\vec{\nabla}(S))^2}{2m} - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\vec{\nabla}^2(R)}{R} + V$

TABLE C.1 – Tableau récapitulatif de quelques opérateurs SQM et BQM.

# Annexe D

## Illustration des inégalités de Heisenberg pour SQM et BQM dans le cas du puits de potentiel infini à une dimension

### D.1 Généralités sur les inégalités de Heisenberg

Pour raisonner, nous nous intéresserons à une unique particule quantique (pour fixer les idées un électron), non relativiste, de masse  $m$ , astreinte à se déplacer suivant l'axe  $Ox$ , soumise à un potentiel  $V$ . Dans ce cadre, l'inégalité de Heisenberg à laquelle on va pour la suite s'intéresser s'écrit :

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \text{ où } \hbar = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s est la constante de Planck réduite}$$

qui fait apparaître l'écart quadratique moyen sur les mesures

$$\Delta \mathcal{A} = \sqrt{\langle (\mathcal{A} - \langle \mathcal{A} \rangle)^2 \rangle} = \sqrt{\langle \mathcal{A}^2 \rangle - \langle \mathcal{A} \rangle^2}$$

Or la moyenne des mesures ne s'écrit pas de la même façon pour SQM qui fait référence à une [observable](#)  $\hat{A}$  :

$$\langle \mathcal{A} \rangle = \langle \hat{A} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^* \hat{A} \Psi dx$$

et pour BQM qui utilise un « opérateur bohmien local »  $A_B$  :

$$\langle \mathcal{A} \rangle = \langle A_B \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x)|^2 A_B(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} R(x)^2 A_B(x) dx$$

dans le cas où la fonction d'onde s'écrit avec son module et son argument

$$\Psi = R \exp\left(i \frac{S}{\hbar}\right) \text{ où } R = |\Psi| \in \mathbb{R}^+ \text{ et } S \in \mathbb{R}$$

Il nous faut vérifier si les moyennes mises en jeu pour les inégalités de Heisenberg ne sont bien identiques pour SQM et BQM. C'est le cas pour les moyennes spatiales :

$$\hat{x} = x_B = x \Rightarrow \langle \hat{x} \rangle = \langle x_B \rangle \quad \text{et} \quad \hat{x}^2 = x_B^2 = x^2 \Rightarrow \langle \hat{x}^2 \rangle = \langle x_B^2 \rangle$$

Aussi les écarts quadratiques moyens sur la position sont-ils identiques pour SQM et BQM (on notera  $\Delta\hat{x} = \Delta x_B$ ).

Concernant la quantité de mouvement, ce n'est plus le cas car les opérateurs à considérer :

– pour SQM sont :  $\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$  et  $\hat{p}^2 = \hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}$

– tandis que pour BQM ce sont :  $p_B = \frac{\partial S}{\partial x}$  et  $p_B^2 = \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2$ . On peut se convaincre par un calcul simple (cf. C.4) que

$$\langle \hat{p} \rangle = \langle p_B \rangle \quad \text{mais} \quad \langle \hat{p}^2 \rangle = \langle p_B^2 \rangle + 2m \langle Q \rangle \neq \langle p_B^2 \rangle$$

où  $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R}$  est le **potentiel quantique**. Aussi les écarts quadratiques moyens sur la quantité de mouvement sont-ils différents pour SQM et BQM ( $\Delta\hat{p} \neq \Delta p_B$ ).

Il faut donc retenir que les **inégalités de Heisenberg** ne sont donc vérifiées que pour les écarts quadratiques moyens calculés **avec les opérateurs SQM**, mais pas avec les opérateurs BQM :

$$\Delta x_B \Delta p_B \neq \Delta\hat{x} \Delta\hat{p} \geq \frac{\hbar}{2}$$

Pour surmonter cette asymétrie entre BQM et SQM, nous proposons de passer par une expression énergétique.

– En SQM, l'opérateur l'hamiltonien est  $\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + V$

– et en BQM, c'est  $H_B = \frac{p_B^2}{2m} + V + Q$ , qui fait intervenir le **potentiel quantique**.

Puisque que  $\langle \hat{p}^2 \rangle = \langle p_B^2 \rangle + 2m \langle Q \rangle$ , nous pouvons noter que

$$\left\langle \frac{\hat{p}^2}{2m} \right\rangle = \langle \hat{H} - V \rangle = \langle H_B - V \rangle$$

Nous allons voir dans l'exemple qui suit comment utiliser ce dernier point.

## D.2 Exemple du puits de potentiel infini à une dimension

### Position du problème

$V = 0$  pour  $x \in [0; \ell]$ , infini ailleurs.

### Fonction d'onde

La solution de l'équation de Schrödinger est de la forme

$$\Psi(x,t) = C \sin\left(\frac{n\pi x}{\ell}\right) \exp\left(-i\frac{Et}{\hbar}\right)$$

pour  $x \in [0; \ell]$ , nulle ailleurs ( $n \in \mathbb{N}^*$ ). Soit

$$\Psi(x,t) = \frac{C}{2i} \exp\left(\frac{-iEt}{\hbar}\right) \exp\left(\frac{+in\pi x}{\ell}\right) - \frac{C}{2i} \exp\left(\frac{-iEt}{\hbar}\right) \exp\left(\frac{-in\pi x}{\ell}\right)$$

ou encore

$$\begin{cases} R = C \left| \sin\left(\frac{n\pi x}{\ell}\right) \right| \\ S = Et \end{cases}$$

## Normalisation

En SQM

$$\int \Psi^*(x,t) \Psi(x,t) dx = 1$$

et en BQM

$$\int \rho(x,t) dx = 1$$

donnent le même calcul

$$1 = \int C^2 \sin^2\left(\frac{n\pi x}{\ell}\right) dx = C^2 \int_{x=0}^{x=\ell} \frac{1 - \cos\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right)}{2} dx = \frac{C^2 \ell}{2}$$

et donc le même résultat :

$$C = \sqrt{\frac{2}{\ell}}$$

## Position de la particule

En SQM

$$\langle \hat{x} \rangle = \int \Psi^*(x,t) x \Psi(x,t) dx = \int C^2 \sin^2\left(\frac{n\pi x}{\ell}\right) x dx$$

En BQM

$$\langle x_B \rangle = \int \rho(x,t) x_B dx = \int C^2 \sin^2\left(\frac{n\pi x}{\ell}\right) x dx$$

Les deux calculs mènent à

$$\langle \hat{x} \rangle = \langle x_B \rangle = \frac{1}{\ell} \int_{x=0}^{x=\ell} \frac{1 - \cos\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right)}{2} x dx = \frac{\ell}{2}$$

(la particule est, en moyenne, au milieu du puits).

## Quantité de mouvement de la particule

Pour SQM, l'opérateur hermitien :

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

a deux vecteurs propres pour  $n$  fixé ( $|u_{\pm}\rangle = \exp\left(\frac{\pm in\pi x}{\ell}\right) \exp\left(-i\frac{Et}{\hbar}\right)$ ) :

$$\hat{p}|u_{\pm}\rangle = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \left( \exp\left(\frac{\pm in\pi x}{\ell}\right) \exp\left(-i\frac{Et}{\hbar}\right) \right) = \pm \frac{\hbar n\pi}{\ell} |u_{\pm}\rangle$$

La probabilité de ces deux états propres est :

$$P_{\pm} = \langle \Psi | u_{\pm} \rangle \langle u_{\pm} | \Psi \rangle = \left( \int \Psi^*(x,t) \exp\left(\frac{\pm in\pi x}{\ell}\right) dx \right) \left( \int \exp\left(\frac{\mp in\pi x}{\ell}\right) \Psi(x,t) dx \right)$$

Le calcul donne :  $P_{\pm} = \frac{1}{2}$  aussi la mesure quantique donnera de façon équiprobable les valeurs propres  $\pm \frac{\hbar n \pi}{\ell}$ .

$$\langle \hat{p} \rangle = \int \Psi^*(x,t) \left( -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right) \Psi(x,t) dx = \frac{-i\hbar n \pi}{\ell} \int \Psi^*(x,t) \Psi(x,t) dx = \frac{-i\hbar n \pi}{\ell}$$

dont la partie réelle est nulle ( $\langle \hat{p} \rangle = 0$ ), ce qui est normal :

$$\langle \hat{p} \rangle = P_+ \frac{\hbar n \pi}{\ell} + P_- \frac{-\hbar n \pi}{\ell} = 0$$

En BQM

$$p_B = \frac{\partial S}{\partial x} = m v_{xB} = 0$$

car  $S$  ne dépend pas de  $x$ . Aussi la particule est-elle fixe et bien sûr on trouve sans effort

$$\langle \hat{p} \rangle = \langle p_B \rangle = 0$$

On remarque que  $p_B$  ne coïncide pas avec une valeur propre de  $\hat{p}$ .

## Energie

En SQM, l'opérateur hamiltonien est  $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta$  dans le puits. Appliqué à la fonction d'onde, il donne

$$\hat{H}\Psi = +\frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2m\ell^2} \Psi$$

La moyenne de l'observable  $\hat{H}$  est donc

$$\langle \hat{H} \rangle = \int \Psi^* \hat{H} \Psi dx = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2m\ell^2} \int \Psi^* \Psi dx = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m\ell^2}$$

D'autre part en BQM, l'hamiltonien bohmien est

$$H_B = \frac{(\vec{\nabla}(S))^2}{2m} - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\vec{\nabla}^2(R)}{R} = \frac{1}{2} m \vec{v}_B^2 + Q$$

dans le cas du puits quantique infini, puisque  $V = 0$  et  $\vec{v}_B = \vec{0}$ ,

$$H_B = Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\vec{\nabla}^2 |\sin(\frac{n\pi x}{\ell})|}{|\sin(\frac{n\pi x}{\ell})|} = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^2 = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m\ell^2}$$

Le tableau [D.1](#) récapitule les résultats trouvés en SQM et BQM dans le cas du puits infini :

Dans le cas SQM, on trouve :  $\Delta \hat{x} = \ell \sqrt{\frac{\pi^2 n^2 - 6}{12 \pi^2 n^2}}$ ,  $\Delta \hat{p} = \frac{\hbar n \pi}{\ell}$  et donc

$$\Delta \hat{x} \Delta \hat{p} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{\pi^2 n^2}{3} - 2} \geq \frac{\hbar}{2}$$



SQM	BQM	statistique
La position $x$ n'est pas déterminée	La position $x$ est déterminée	$\langle \hat{x} \rangle = \langle x_B \rangle = \frac{\ell}{2}$ et $\langle \hat{x}^2 \rangle = \langle x_B^2 \rangle = \ell^2 \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{2\pi^2 n^2} \right)$
La quantité de mouvement $p_x$ n'est pas déterminée	La quantité de mouvement $p_x$ est déterminée : $p_x = 0$ (la particule est fixe)	$\langle \hat{p}_x \rangle = \langle p_B \rangle = 0$
$\langle \hat{p}_x^2 \rangle = \left( \frac{\hbar n \pi}{\ell} \right)^2$	$(p_B)^2 = 0$ et $Q = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2m\ell^2}$	$\langle \hat{p}_x^2 \rangle \neq \langle p_B^2 \rangle$
$\hat{H} = \frac{\hat{p}_x^2}{2m} + V$	$H_B = \frac{p_B^2}{2m} + V + Q$	$\langle \hat{H} - V \rangle = \langle H_B - V \rangle = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2m\ell^2}$

TABLE D.1 – Tableau récapitulatif des moyennes effectuée en SQM et BQM dans le cas du puits de potentiel infini à une dimension.

l'inégalité de Heisenberg est vérifiée quel que soit  $n$ .

Dans le cas BQM, on trouve :  $\Delta x_B = \ell \sqrt{\frac{\pi^2 n^2 - 6}{12\pi^2 n^2}}$ ,  $\Delta p_B = 0$  car la vitesse est parfaitement connue et donc

$$\Delta x_B \Delta p_B = 0$$

l'inégalité de Heisenberg ne peut pas s'écrire avec les écarts quadratiques moyens de BQM.

Cependant, aussi bien en SQM qu'en BQM, on peut écrire

$$\Delta x \sqrt{2m \langle H \rangle} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{\pi^2 n^2}{3} - 2} \geq \frac{\hbar}{2}$$

Cette dernière expression peut être, plus simplement que l'inégalité de Heisenberg, interprétée : le confinement ( $\Delta x \searrow$ ) fait croître l'énergie ( $\langle H \rangle \nearrow$ ).



# Annexe E

## Approche biographique de Louis de Broglie Les revirements de Louis de Broglie vis-à-vis du déterminisme en mécanique quantique

### Introduction

Louis de Broglie est un des « pères de la mécanique quantique ». Pour les travaux qu'il présente lors de sa thèse en 1924 (L. d. BROGLIE 1924), il est récompensé par le Prix Nobel de physique en 1929. Louis de Broglie propose lors du cinquième Conseil Solvay en 1927 une théorie causale de la mécanique quantique (dite théorie de l'onde pilote), rejetée par la communauté scientifique. Cette dernière lui préfère un formalisme fondé sur l'indétermination des grandeurs physiques. Louis de Broglie abandonne dans un premier temps sa vision initiale et défend l'interprétation indéterministe pendant un quart de siècle. Cependant après 1952, le reste de sa carrière (encore un autre quart de siècle) s'oriente à nouveau vers la recherche d'une théorie causale de la mécanique quantique.

Ainsi, il est possible de distinguer nettement trois phases consécutives de la vie de ce physicien (avant 1927, de 1928 à 1951 et après 1952) lors desquelles les positionnements de de Broglie vis-à-vis de l'indéterminisme en mécanique quantique sont très marqués (*contra*, *pro* et à nouveau *contra*). Les périodes de changement de phase (1927-1928 et 1951-1952) étant très courtes, on peut les qualifier de revirements. Ces deux moments de revirements brusques impliquent à chaque fois pour de Broglie des modifications profondes non seulement des idées scientifiques qu'il défend, mais aussi de la nature de son travail ainsi que de la façon dont la communauté scientifique le perçoit.

Ce qui suit se propose d'étudier la biographie de Louis de Broglie à l'aune des positionnements consécutifs de ce physicien vis-à-vis du déterminisme en mécanique quantique. Il s'agira en particulier d'esquisser un portrait de Louis de Broglie en tentant d'éclairer les causes et les conséquences de ses deux grands revirements scientifiques.

## E.1 Avant 1928 : Louis de Broglie met au point une théorie causale

### Louis de Broglie devient physicien après une réorientation tardive

Né le 15 août 1892 à Dieppe, le prince Louis de Broglie est issu d'une famille illustre. Son frère Maurice, Duc de Broglie, de 17 ans son aîné, est physicien. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, Maurice a un laboratoire privé, spécialisé dans l'analyse spectrale des rayons X, installé dans un appartement de sa belle-mère.

Louis suit des études secondaires au lycée Janson de Sailly dans le XVI<sup>e</sup> arrondissement de Paris. « Brillant sujet en français, en histoire, en philosophie et en physique, [...] moyen en mathématiques et en chimie »<sup>1</sup>, Louis obtient le baccalauréat à 17 ans. A peine âgé de dix-huit ans il passe en Sorbonne sa licence d'histoire. Mais le « démon de la philosophie » le guette. 1911 est « décisive pour l'orientation de sa vie ». À Bruxelles, cette année-là, se tient le premier Conseil international de physique Solvay consacré à la théorie des quanta. Maurice joue le rôle de secrétaire de cette réunion et en publie le compte rendu avec Paul Langevin<sup>2</sup>. Ce fait n'est « pas sans influence » sur le « coup d'état intérieur » de Louis qui passe « sans transition des lettres aux sciences ». Après cette réorientation, Louis obtient sa licence de sciences en deux ans. Il débute son service militaire le 1<sup>er</sup> octobre 1913<sup>3</sup> comme « sapeur radioélectricien, affecté au poste de la tour Eiffel dans les services de la radiotélégraphie sans fil militaire du colonel Ferrié ». Il y reste toute la guerre et n'est démobilisé que neuf mois après l'armistice<sup>4</sup>. Il intègre le laboratoire de son frère. S'il s'y associe au « travail expérimental de deux jeunes physiciens, Dauvillier et Trillat », il se livre principalement à des recherches en physique théorique dans lesquelles il progresse « très rapidement, en brûlant les étapes ».

### Par ses premiers travaux présentés dans sa thèse, de Broglie participe à la mise en place de la théorie quantique

Pendant sa thèse, Louis développe une théorie quantique qui considère qu'à toute particule de matière on peut associer une onde. Il s'appuie sur les travaux d'Einstein (la relativité restreinte et le caractère corpusculaire de la lumière). Une des grandes réussites de son approche est de retrouver la quantification qui apparaît de façon *ad hoc* dans le modèle de l'atome de Bohr. Mais les travaux de thèse de Louis de Broglie sont révolutionnaires en ceci qu'ils prévoient un comportement ondulatoire de la matière, à l'instar de ce qui est observé dans le cas de la lumière.

Jean Perrin qui préside le jury de la thèse de doctorat de Louis déclare un jour à son frère Maurice : « tout ce que je puis dire [...] c'est que votre frère est bien intelligent »<sup>5</sup>. Les membres du jury de thèse sont tellement circonspects que l'un des leurs, Paul Langevin, confie le manuscrit de Louis à Einstein, pour avis. Ce dernier répond que Louis de Broglie « a soulevé un coin du grand Voile »<sup>6</sup>, ouvrant la voie à la soutenance<sup>7</sup> et attire l'attention de toute la communauté scientifique sur les travaux de thèse de Louis de Broglie. Ce dernier reconnaît :

Einstein [...] était à l'apogée de sa gloire. [...] Sans son intervention, la tentative hardie esquissée dans ma thèse aurait pu rester longtemps inaperçue. [...] Cela allait amener M. Erwin Schrödinger, alors Professeur à l'Université de Zürich, à publier au printemps de 1926, cette magnifique série de mémoires

1. Toutes les citations de ce paragraphe sont de Maurice de Broglie (M. d. BROGLIE 1945).
2. Maurice de Broglie est l'auteur d'un ouvrage sur les premiers Conseils Solvay (M. d. BROGLIE 1951).
3. carton F17/27953 des archives nationales.
4. Le 25 août 1919 (carton F17/27953 des archives nationales).
5. M. d. BROGLIE 1945.
6. L. d. BROGLIE 1955, p. 17.
7. Voir aussi Pais à ce sujet (PAIS 1998).

[où] il développait d'une façon complète tout le formalisme analytique de la Mécanique ondulatoire. [...] Et, couronnant ce foudroyant départ de la nouvelle Mécanique, la découverte aux États-Unis au début de 1927 par Davisson et Germer du phénomène de la diffraction des électrons par les cristaux, bientôt confirmée par d'innombrables autres expériences du même genre, prouvait l'existence de l'onde associée à l'électron et apportait une vérification détaillée des conceptions et des formules dont j'avais été le protagoniste <sup>8</sup>.

Ainsi, en 1927, la dualité onde-corpuscule d'abord esquissée par [Einstein](#) dans le cas de la lumière puis généralisée par [de Broglie](#) semble bien établie. C'est un des fondements de la nouvelle mécanique ondulatoire <sup>9</sup>.

### **En 1927, de Broglie travaille à une théorie causale de la mécanique quantique, la théorie de la double solution**

Mais la dualité onde-corpuscule que [de Broglie](#) a proposée est problématique, comme il l'explique :

Je restais [...] préoccupé par le fait que le dualisme des ondes et des corpuscules, dont l'existence et la généralité devenaient chaque jour plus indiscutables, restait entouré d'un véritable mystère. Toutes les difficultés que l'on avait rencontrées antérieurement à propos des quanta de lumière pour parvenir à interpréter la coexistence dans la réalité expérimentale des localisations corpusculaires (dont l'effet photoélectrique était l'exemple type dans le cas de la lumière) et des phénomènes d'interférences et de diffraction se retrouvaient transposées dans la théorie des électrons et des autres particules matérielles et paraissaient tout aussi insurmontables <sup>10</sup>.

Aussi, en 1927 des problèmes d'interprétation se posent. Les chercheurs du groupe de [Bohr](#) (à Copenhague) et de celui de [Born](#) (à Göttingen) ont une vision indéterministe à laquelle n'adhère pas [de Broglie](#) :

Peu à peu on était [...] entraîné vers la conclusion paradoxale que la statistique devait nécessairement s'introduire dans l'étude du mouvement d'un seul corpuscule. Cette conception, qui gagnait progressivement du terrain parmi les théoriciens de la Physique, ne me semblait pas satisfaisante : elle me paraissait devoir aboutir à des conclusions difficilement acceptables <sup>11</sup>.

Louis [de Broglie](#) réfute donc cette interprétation purement probabiliste qui est conforme ni à ses intuitions, ni – selon lui – « à la mission explicative de la physique théorique » <sup>12</sup>. Cela le conduit à chercher à mettre au point une théorie causale à la place :

j'eus alors une idée assez subtile à laquelle je donnai le nom de « théorie de la double solution ». [...] Il m'est possible d'en donner l'énoncé général suivant : « Supposons qu'il soit possible de coupler les solutions de l'équation des ondes de façon qu'à toute solution régulière corresponde une solution à singularité mobile qui possède les mêmes lignes de courant : alors la singularité mobile suivra nécessairement l'une des lignes de courant » <sup>13</sup>.

---

8. L. d. BROGLIE 1955, p. 18.

9. Il existe dès 1926 deux versions de la mécanique quantique : l'une, la « mécanique ondulatoire », utilisant une fonction d'onde  $\Psi$  vérifiant une équation aux dérivées partielles, l'autre, la « mécanique des matrices », utilisant l'algèbre linéaire. Les deux formalismes sont équivalents.

10. L. d. BROGLIE 1955, p. 19.

11. L. d. BROGLIE 1955, pp. 25-26.

12. L. d. BROGLIE 1954, p. 112.

13. L. d. BROGLIE 1955, pp. 25-26.

L'idée de [de Broglie](#) en 1927 est de trouver deux solutions à l'équation de Schrödinger<sup>14</sup> « l'une comportant une singularité représenterait réellement le corpuscule [...] tandis que l'autre en donnerait l'aspect statistique »<sup>15</sup>. La double solution, c'est donc l'onde *et* la particule<sup>16</sup>.

[de Broglie](#) expose ses travaux dans un article de juin 1927 (L. d. BROGLIE 1927). Il reconnaît que « l'établissement sur des bases véritablement rigoureuses et satisfaisantes de la théorie de la double solution se heurtait à toutes sortes de difficultés, les unes mathématiques, les autres physiques »<sup>17</sup>. Aussi, l'article termine par une version « assurément beaucoup moins complète »<sup>18</sup> que celle de la double solution. Selon cette dernière théorie « l'onde "pilote" en quelque sorte le corpuscule, d'où le nom de "théorie de l'onde-pilote" »<sup>19</sup> qu'il lui donne :

le corpuscule suivait à tout instant le mouvement de l'élément du fluide fictif avec lequel il coïncidait et le principe des interférences en résultait immédiatement. Ainsi, je plaçais en quelque sorte d'autorité le corpuscule au sein de l'onde et je supposais qu'il était entraîné [...] Dans mon hypothèse, l'onde « pilotait » en quelque sorte le corpuscule, d'où le nom de « théorie de l'onde-pilote » que je donnais à cette conception<sup>20</sup>.

### **Au 5e Conseil Solvay d'octobre 1927, de Broglie présente la théorie de l'onde pilote qui est une version simplifiée de la théorie de la double solution**

Les travaux de [de Broglie](#) ne sont pas aboutis en octobre 1927 lorsqu'il doit présenter un rapport (I. SOLVAY 1928, exposé et discussion pp. 105-141) devant le cinquième Conseil Solvay qui se tient à Bruxelles. Aussi, il présente la « théorie de l'onde-pilote » plutôt que celle de la « double solution » :

cette théorie était assurément beaucoup moins complète que celle que j'avais espéré pouvoir édifier avec l'hypothèse de la double solution, puisqu'elle ne parvenait plus à incorporer le corpuscule dans l'onde et constatait le dualisme onde-corpuscule sans tenter d'en approfondir la nature ; mais elle avait alors à mes yeux l'avantage de conserver la notion traditionnelle de corpuscule ponctuel bien localisé dans l'espace et de maintenir le déterminisme rigoureux de ses mouvements. Telle fut la solution dont je donnai une esquisse dans mon rapport au Congrès Solvay<sup>21</sup>.

L'onde pilote est bien une théorie causale de la mécanique quantique, une théorie à « variables cachées », remède au caractère incomplet de la mécanique quantique. Mais [de Broglie](#) lui-même n'est pas convaincu par la théorie restreinte qu'il présente puisqu'il note lors de son exposé que « ce n'est là, sans doute, qu'un point de vue provisoire »<sup>22</sup>. Ce n'est, selon les dires de son inventeur, qu'un « point de vue plus mitigé », qu'une « forme atténuée »<sup>23</sup> de celle de la double solution.

14. L'équation de Schrödinger détermine l'évolution de la fonction d'onde associée à une particule non relativiste. C'est le fondement de la mécanique ondulatoire.

15. L. d. BROGLIE 1953b, p. 467.

16. quand la complémentarité de Bohr invoque l'onde *ou* la particule, les deux concepts s'excluent l'un-l'autre.

17. L. d. BROGLIE 1955, p. 27.

18. L. d. BROGLIE 1947, pp. 185-186.

19. L. d. BROGLIE 1947, pp. 185-186.

20. L. d. BROGLIE 1947, pp. 185-186.

21. L. d. BROGLIE 1947, pp. 185-186.

22. I. SOLVAY 1928, p. 122, dans l'intervention de Louis [de Broglie](#).

23. L. d. BROGLIE 1953b, p. 467.

## E.2 1927-1928 : premier revirement. Louis de Broglie abandonne la théorie causale

### La proposition de la théorie de l'onde pilote est mal reçue au 5e Conseil Solvay

Au 5e Conseil Solvay de Bruxelles, Louis de Broglie « ne reçut que très peu de commentaires de la part des autres physiciens pourtant réticents vis-à-vis de l'interprétation entièrement probabiliste qui était présentée par les physiciens de Copenhague-Göttingen »<sup>24</sup>. Léon Brillouin est un des rares à soutenir Louis de Broglie et sa théorie de l'onde pilote<sup>25</sup>. De son côté, Einstein, même s'il « pense que M. de Broglie a raison de chercher dans cette direction »<sup>26</sup> apporte tout compte fait un appui limité à la théorie de l'onde pilote, comme le note de Broglie :

[Einstein] m'encourageait dans la voie où je m'étais engagé, mais sans cependant approuver nettement ma tentative<sup>27</sup>.

Quant à Schrödinger, « ne croyant pas à l'existence des corpuscules »<sup>28</sup>, il ne fait aucun commentaire sur la proposition théorique de Louis de Broglie. Louis de Broglie a donc pu mesurer à quel point il était isolé dans ses tentatives lors du Conseil Solvay de 1927.

Il résumera – en 1956 – la façon dont est reçu son exposé de 1927 au Congrès Solvay :

Au Conseil Solvay, tandis que quelques « anciens » (Lorentz, Einstein, Langevin, Schrödinger) maintenaient la nécessité de rechercher une interprétation causale de la Mécanique ondulatoire sans cependant se prononcer sur ma tentative, MM. Bohr et Born ainsi que leurs jeunes disciples (MM. Heisenberg, Dirac, etc.) se prononçaient catégoriquement en faveur de la nouvelle interprétation purement probabiliste qu'ils venaient de développer et ne discutaient même pas mon point de vue. C'est M. Pauli qui fit la seule objection précise à ma théorie<sup>29</sup>.

C'est certainement l'intervention de Pauli accusant l'onde pilote d'être incohérente avec les observations<sup>30</sup> qui empêche véritablement l'adoption de la théorie proposée par de Broglie<sup>31</sup>.

de Broglie se dit après le cinquième Conseil Solvay « découragé »<sup>32</sup> :

Je revins à Paris très troublé par ces discussions et, en méditant sur ce sujet, j'arrivai à la conviction que, pour la raison que j'ai exposée plus haut et quelques autres encore<sup>33</sup>, la théorie de l'onde pilote était intenable. N'osant pas en revenir à la double solution à cause de ses difficultés mathématiques, je me décourageai et me ralliai à l'interprétation purement probabiliste de Bohr et Heisenberg<sup>34</sup>.

En fait, l'étude consciencieuse des documents montre que n'est pas tout à fait vrai.

24. VILA-VALLS 2012, pp. 187-188.

25. VILA-VALLS 2012, p. 178.

26. I. SOLVAY 1928, pp. 255-256, intervention d'Albert Einstein dans la discussion générale.

27. L. d. BROGLIE 1952, p. 301.

28. L. d. BROGLIE 1952, p. 301.

29. L. d. BROGLIE 1956b, p. 169.

30. « Il me semble que la conception de M. de Broglie, en ce qui concerne les résultats statistiques de l'expérience de choc, est bien d'accord, avec la théorie de Born dans le cas de chocs élastiques, mais qu'il n'en est plus ainsi lorsque l'on considère aussi des chocs non élastiques » (I. SOLVAY 1928, p. 280, intervention de Pauli dans la discussion générale).

31. VILA-VALLS 2012, p. 187.

32. L. d. BROGLIE 1953b, p. 469.

33. En 1927, l'expérience de Young semblait à Louis de Broglie incompatible avec la théorie de la double solution et avec celle de l'onde pilote (L. d. BROGLIE 1954, note 7 p. 112).

34. L. d. BROGLIE 1952, p. 301.

## De Broglie continue pendant l'hiver 1927-28 à soutenir une position déterministe dans un « cours libre » avant d'abandonner sa théorie causale de la mécanique quantique en 1928

En effet, [de Broglie](#) continue de présenter l'onde pilote lors de son cours libre de l'hiver 1927-1928, dont la préface fait met clairement en lumière les idées déterministes de [de Broglie](#) :

il ne m'a pas paru possible d'abandonner le principe fondamental suivant lequel les phénomènes naturels sont reliés les uns aux autres par des relations de causalité. En second lieu, il m'a semblé qu'on ne peut pas parler de corpuscules de matière et de rayonnement sans leur attribuer au moins en principe une position parfaitement définie dans l'espace, toutes réserves pouvant d'ailleurs être faites au sujet de l'exactitude avec laquelle il est effectivement possible de déterminer cette position.

Cette volonté d'exposer ses vues opposées à la doctrine « orthodoxe » dans un cours est confirmée par son biographe, Lochak :

Il donna un cours libre en Sorbonne, dans lequel il exposa les idées de sa thèse et les prolongements qu'il avait élaborés sous la forme de la théorie de la double solution et de l'onde pilote, bien qu'il fut en train de les abandonner. Un cours libre, comme son nom l'indique, laisse moralement toute latitude à celui qui le donne, mais la situation devint différente lorsqu'en fin d'année il reçut la nomination en titre [...] C'est alors qu'il modifia son cours <sup>35</sup>.

Ainsi, c'est lors du « cours fait en 1928-1929 exposant les théories orthodoxes » qu'il commence à se « résigner à enseigner la Mécanique Ondulatoire à fonction normée sans particule localisée » <sup>36</sup>, pas avant. Il y a donc un revirement opéré d'un cours – « libre » et hétérodoxe – à un cours orthodoxe lorsqu'il devient enseignant à l'Institut Henri Poincaré (IHP). Nous y reviendrons.

## Il existe de nombreuses raisons scientifiques qui expliquent la conversion de de Broglie à la vision indéterministe

Il faut reconnaître qu'avec ses théories causales, [de Broglie](#) est confronté à de nombreux problèmes qu'il n'est pas en mesure de surmonter en 1927-28. Parmi eux figurent notamment l'objection adressée par [Pauli](#) lors du Conseil Solvay, et la difficulté mathématique inhérente à la théorie de la double solution, déjà évoqués. On peut y ajouter que [de Broglie](#) rechigne à la nécessité de recourir à un espace « de configuration » peu réel selon lui :

quelle idée intelligible peut-on se faire des coordonnées d'un corpuscule qui n'est pas localisé dans l'espace physique ? D'autre part, il apparaît comme peu admissible que le mouvement d'un système de corpuscules ne puisse être décrit que dans le cadre, visiblement abstrait et fictif, de l'espace de configuration et ne puisse pas être représenté dans l'espace physique réel à trois dimensions <sup>37</sup>.

D'autre part, la linéarité de l'équation de [Schrödinger](#) déterminant l'évolution temporelle a pour conséquence la [superposition](#) d'états qui semble à [de Broglie](#) incompatible avec l'onde pilote :

cette extension aux états de mouvement d'un corpuscule de l'idée de « superposition » telle que l'emploie l'Optique quand elle étudie des ondes lumineuses non monochromatiques, était en contradiction flagrante avec le système d'images spatio-temporelles sur lequel étaient fondées toutes les tentatives d'explication des phénomènes dans l'ancienne Physique <sup>38</sup>.

Un autre problème qui se pose à [de Broglie](#) est de concilier ses vues déterministe avec les derniers travaux de [Heisenberg](#) qui

35. LOCHAK 1992, p. 147.

36. carton 42-J-53 des archives de l'Académie des sciences.

37. L. d. BROGLIE 1959, p. 968.

38. L. d. BROGLIE 1947, pp. 186-188.



énonçait [...] ses fameuses relations d'incertitude<sup>39</sup> et développait toutes les idées nouvelles auxquelles elles se rattachent, mais j'hésitais encore à adopter un point de vue qui s'opposait aussi complètement à toutes mes habitudes de pensée antérieures<sup>40</sup>.

Au vu de tous ces problèmes scientifiques, l'abandon de la vision déterministe semblerait presque incontournable. Et force est de constater qu'on ne trouve pas trace dans les écrits de [de Broglie](#) d'une explication autre que scientifique à sa conversion à la version « orthodoxe ». Ainsi, lorsqu'il raconte en 1947 son premier revirement à la suite du cinquième Conseil Solvay d'octobre 1927 :

Sans me laisser entièrement convaincre par les arguments de MM. [Bohr](#) et [Heisenberg](#), je commençais à en apprécier toute l'importance et la profondeur. Rentré à Paris, je me mis à réfléchir longuement sur les incertitudes d'Heisenberg. Je faisais à ce moment un cours libre à la Sorbonne sur la Mécanique ondulatoire : j'y enseignais encore la théorie de l'onde-pilote, mais déjà je n'y croyais plus guère !

Au début de 1928, ma conviction était faite : il était nécessaire malgré l'énorme effort de redressement intellectuel qu'elles comportaient, d'adopter les conceptions de [Bohr](#) et d'[Heisenberg](#). Invité à faire des conférences à l'Université de Hambourg au printemps de 1928, j'y donnais pour la première fois en public mon adhésion formelle aux idées nouvelles. Au cours de l'automne suivant, je fus chargé d'un enseignement officiel à la Faculté des Sciences de Paris : je fis dans le semestre d'hiver de l'année scolaire 1928-1929 un cours où je développai le point de vue de [Bohr](#) et d'[Heisenberg](#) et où je montrai pourquoi la théorie de l'onde-pilote était insuffisante<sup>41</sup>.

[de Broglie](#) indique donc qu'il s'est converti à la vision dominante pour des raisons uniquement scientifiques.

### **Les débuts professionnels – problématiques – de Louis de Broglie en tant qu'enseignant sont peut-être aussi un élément explicatif de sa conversion à la vision dominante ainsi que sa volonté de rompre son isolement et de s'insérer dans la communauté internationale des chercheurs en physique théorique**

Vila-Valls dans sa thèse propose pourtant une analyse un peu différente :

d'un point de vue plus personnel, [de Broglie](#) se trouvait extrêmement isolé et ne pouvait sans doute pas prendre le risque d'avancer dans une solitude complète vers des chemins qui risquaient de s'avérer sans issues, quand par ailleurs, la mécanique quantique pouvait d'ores et déjà être utilisée de manière fructueuse dans de nombreux champs d'applications. Il n'est donc pas surprenant que [de Broglie](#) abandonne ses tentatives premières<sup>42</sup>.

Il considère que [de Broglie](#) en persévérant avec sa recherche d'une théorie déterministe risque de se retrouver esseulé.

Esseulé, il l'est de fait car Dominique Pestre montre qu'en France

la place des physiciens concernés par la théorie est [...] bien étroite au début du [20e] siècle : institutionnellement, ils ne sont pas reconnus, culturellement, mentalement, ils sont contestés des deux côtés par les mathématiciens et les expérimentateurs, en un mot, ils sont des marginaux<sup>43</sup>. [Les physiciens français pensent souvent] que la théorie n'est que la « sténographie de l'expérience », que le théorique n'a pas d'autonomie [...] que] la théorie se ramène à l'établissement des régularités observées, elle n'a pas d'autonomie<sup>44</sup>.

39. « quand on veut mesurer simultanément des grandeurs canoniquement conjuguées ([position et vitesse par exemple mais] plus généralement : des grandeurs dont les opérateurs ne sont pas permutables) on ne peut pas descendre au-dessous d'une limite d'indétermination caractéristique » (I. SOLVAY 1928, pp. 168-170, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg).

40. L. d. BROGLIE 1947, p. 188.

41. L. d. BROGLIE 1947, p. 189.

42. VILA VALLS 2013, p. 41.

43. PESTRE 1984, p. 117.

44. PESTRE 1984, pp. 54 et 58.

Dans ces conditions, il ne faut pas s'étonner que [de Broglie](#) soit un peu seul comme physicien théoricien en France, continue Pestre :

les physiciens se consacrant à la seule physique théorique [...] sont peu nombreux dans la décennie 1918-1928 – Léon [Brillouin](#) et Louis [de Broglie](#) sont les deux seuls<sup>45</sup>. [...] Ce] faible nombre de *physiciens* théoriciens français jusqu'aux années 25-30 [est lié à] la quasi-inexistence de chaires de physique théorique avant les années 20. Or cette situation paraît quelque peu originale dans l'Europe de cette époque : de nombreuses chaires de physique théorique, *occupées par des physiciens*, existent en Hollande, en Allemagne<sup>46</sup>.

Le 5e Conseil Solvay marque justement la fin de l'éviction des physiciens allemands<sup>47</sup>. La situation très différente de la physique théorique en Allemagne (Göttingen), au Danemark (Copenhague), explique en partie l'échec à Bruxelles en octobre 1927 de [de Broglie](#), seul confronté à un groupe constitué, celui de Copenhague-Göttingen<sup>48</sup>.

Emblématique de l'isolement [de Broglie](#) est le fait qu'il a pris connaissance « à la veille de l'ouverture du Conseil Solvay »<sup>49</sup> de l'article – publié plusieurs mois avant – sur les inégalités de Heisenberg. Cette anecdote confirme bien que [de Broglie](#) est un chercheur sans lien avec les grands laboratoires de Copenhague et Göttingen<sup>50</sup>. Ce dernier point est confirmé par Besson<sup>51</sup> selon lequel [de Broglie](#) « travaille seul », et ses « collaborations sont rares [...] sans] former de véritables coopérations », ce qui explique ses « faibles contacts avec la communauté internationale ».

Aussi, le 5e Conseil Solvay a certainement joué un rôle déclencheur dans la prise de conscience par [de Broglie](#) du fait qu'il était isolé et que la physique théorique se ferait sans lui, ailleurs, avec d'autres. Il s'agit pour lui d'une « véritable traversée du désert »<sup>52</sup>. Et cela peut expliquer, en partie, son premier revirement : le prix à payer pour rompre son isolement et s'insérer dans la communauté internationale des chercheurs en physique théorique est de souscrire à la vision indéterministe de l'école de Copenhague-Göttingen.

Une autre raison de son revirement peut être donnée par l'étude de sa situation professionnelle autour de 1927-28, déjà évoquée précédemment.

En 1927, toute une génération de jeunes chercheurs émerge, qui se voit octroyer des postes prestigieux : [Schrödinger](#) succède à Max [Planck](#) à la Friedrich-Wilhelms-Universität à Berlin, [Heisenberg](#) est nommé professeur à l'université de Leipzig (et directeur de l'institut de physique théorique), [Pauli](#) l'est à Zurich, [Dirac](#) au St. John's College de Cambridge puis il devient membre de la Royal Society avant d'occuper la chaire de Cambridge créée par Newton<sup>53</sup>, tandis que Louis [de Broglie](#) ne se voit confier que la responsabilité d'un cours libre à la Sorbonne.

En 1928, ce dernier demande son inscription sur la liste d'aptitude à l'enseignement supérieur en s'appuyant sur une lettre de recommandation d'Emile Borel<sup>54</sup>. Le discours d'inauguration de l'institut Henri

---

45. PESTRE 1984, p. 119.

46. PESTRE 1984, p. 109.

47. Après le « manifeste des 93 » daté du 4 octobre 1914 publié sous le titre « Aufruf an die Kulturwelt, An die Kulturwelt ! Ein Aufruf », signé par 93 intellectuels allemands dont Max [Planck](#) et Walther Nernst qui niait les exactions de l'armée allemande à la suite de l'invasion de la Belgique neutre.

48. Jordan a parlé d'un « esprit de Copenhague-Göttingen » en 1927, et Heisenberg a mentionné un « esprit de Copenhague pour la théorie quantique » trois ans plus tard.

49. L. d. BROGLIE 1947, p. 188.

50. VILA-VALLS 2012, pp. 63-64.

51. BESSON 2018, pp. 14 et 25.

52. BESSON 2018, p. 40.

53. SEGRÈ 2011, p. 156.

54. Carton F17/27953 des archives nationales.

Poincaré (IHP) le 17 novembre 1928 par Maurain, doyen de la faculté des sciences, cite Léon Brillouin et Louis de Broglie comme enseignants possibles<sup>55</sup>, mais la chaire de « théories physiques » est accordée à Brillouin.

Aussi, selon Baccigaluppi et Valentini, « il est difficile d'éviter la conclusion que [...] de Broglie [...] a indûment souffert du fait que [...] la théorie qu'il a proposée a été considérée à tort comme intenable ou incompatible avec l'expérience »<sup>56</sup>. Vila-Valls ne pense pas autrement quand il déclare qu'« en continuant ses tentatives, Louis de Broglie prenait le risque de se marginaliser complètement dans la communauté des théoriciens quantistes à une période où il ne faisait que débiter sa carrière scientifique »<sup>57</sup>. Il semble donc légitime de se demander si les raisons du premier revirement de de Broglie sont uniquement scientifiques.

### E.3 1928-1951 : Louis de Broglie défend la théorie indéterministe

#### L'acceptation de la théorie indéterministe par de Broglie va de pair avec sa reconnaissance par la communauté scientifique

Effectivement, dès sa conversion à la vision indéterministe opérée, la position de de Broglie dans la communauté scientifique change du tout au tout : comme le note Besson dans sa thèse, la « période bohémienne de de Broglie correspond avec son ascension institutionnelle »<sup>58</sup>. En 1929, Louis de Broglie obtient le Prix Nobel (c'est Einstein qui propose son nom en 1928 au comité Nobel<sup>59</sup>). « L'université fait face à une situation qui devient embarrassante. [Ce] Prix Nobel [...] n'est toujours pas professeur ! »<sup>60</sup>. Il est nommé enseignant – sans chaire – à l'IHP le premier février 1931<sup>61</sup> et un rapport le concernant note que « la faculté sera heureuse de le présenter pour un poste de professeur titulaire dès que les circonstances le permettront »<sup>62</sup>. Léon Brillouin, en prenant la succession de son père Marcel au Collège de France, libère en 1932 la chaire de l'IHP pour de Broglie<sup>63</sup>. Ce dernier y enseigne de janvier 1933<sup>64</sup> jusqu'à sa retraite à 70 ans, tout en assurant quelques cours à l'ENS de la rue d'Ulm<sup>65</sup> ainsi qu'à l'école supérieure d'électricité<sup>66</sup>.

La concomitance de la conversion de Louis de Broglie à la version orthodoxe de la mécanique quantique et de sa reconnaissance par la communauté scientifique n'est peut être qu'une coïncidence. Quoi qu'il en soit, à partir du début des années 1930, de Broglie reçoit de nombreuses distinctions honorifiques (membre de l'Institut, chevalier de la légion d'honneur, officier de l'ordre Léopold de Belgique. . .)<sup>67</sup>. Il devient « en 1933 le plus jeune membre de l'Académie des Sciences, dont il allait devenir en 1942 secrétaire perpétuel

55. Carton AJ/16/5775 des archives nationales.

56. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, pp. 86-87.

57. VILA-VALLS 2012, pp. 187-188.

58. BESSON 2018, p. 41.

59. PAIS 1982, p. 515.

60. MOSSERI 1999, pp. 123-124.

61. Dossier « pension civile de Louis de Broglie » - carton F17/27953 des archives nationales.

62. Notice individuelle périodique de Louis de Broglie pour 1930-1931 carton F17/27953 des archives nationales.

63. Le conseil de la faculté des sciences du 14/04/32 demande le maintien et la vacance de la chaire de théories physiques du fait de la nomination de Léon Brillouin au Collège de France et le 13/06/32 de Broglie obtient 26 voix sur 26 lors du vote pour la chaire de théories physiques (carton F17/27953 des archives nationales).

64. « professeur de théories physiques à la faculté des sciences de l'université de Paris (dernier titulaire M. Brillouin) jusqu'à sa retraite ». Dossier « pension civile de Louis de Broglie » - carton F17/27953 des archives nationales.

65. Il y est chargé d'un cours complémentaire en 1935-1936, 1937-38, 1939-40, 1940-41, 1943-44, 1952-53, 1954-55, 1956-57 (carton F17/27953 des archives nationales).

66. L. d. BROGLIE 1953b, p. 472.

67. Notice individuelle périodique (1935-1936) - carton F17/27953 des archives nationales.

[...], élu à l'Académie française le 12 octobre 1944 [...] au fauteuil d'Émile Picard. »<sup>68</sup>, Il remplace ce même Picard au Bureau des Longitudes comme membre titulaire en mars 1943 avant de devenir vice-président en 1946 puis président le 31 janvier 1947 du Bureau des Longitudes<sup>69</sup>. Sa carrière universitaire se déroule sans quasiment d'accroc<sup>70</sup> ponctuée par les nombreux avancements prévus dans la fonction publique<sup>71</sup>.

Lochak résume la position acquise par son maître dans le concert universitaire par le fait que « de Broglie avait fait taire ses interrogations et, s'il était écouté, c'est qu'il exaltait l'indéterminisme qui était à la mode »<sup>72</sup>.

### **Pendant les années qui suivent son premier revirement, de Broglie abandonne quasiment le champ de la recherche**

Les premières années de cette période pendant laquelle de Broglie est converti à l'interprétation de Copenhague se caractérisent

par une diminution drastique de sa production : alors qu'il publiait entre 1920 et 1927 pas moins de 27 articles parus dans les Notes aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences, soit une moyenne de plus de trois articles par an (sans compter les articles, moins nombreux, parus dans le Journal de Physique), il ne publie aucune note dans les quatre années qui suivent. Certes, l'abandon de sa théorie n'est pas la seule explication à cette absence de production. [...] Il commence à partir de cette période une vaste activité de diffusion et d'enseignement des nouvelles théories scientifiques, ou à propos de leurs conséquences philosophiques, que ce soit sous forme d'articles de vulgarisation, de brochures (il prend une part très active dans le lancement d'une nouvelle série de publications fondée en 1927, les Actualités scientifiques et industrielles) ou encore de manuels (il publie pratiquement chaque année le contenu du cours qu'il dispense à la Sorbonne)<sup>73</sup>.

La raison de la publication de ses cours chaque année est la suivante :

Professeur en Sorbonne, Louis de Broglie se comportait en fait comme un Professeur au Collège de France. Chaque année, il choisissait un nouveau thème pour son enseignement. [...] Chaque année le cours de Louis de Broglie donnait naissance à un livre<sup>74</sup>.

Son activité d'enseignement se caractérise aussi par l'encadrement de jeunes chercheurs. Louis de Broglie participe à partir de 1931 à des jurys de thèse, de plus en plus nombreux aux cours des années qui suivent<sup>75</sup>. De plus, de Broglie crée en 1931 « le plus grand séminaire de physique de Paris [...] la pépinière des théoriciens français qui venaient s'y instruire et se tenir au courant des recherches qui se poursuivaient dans le monde ; tous les travaux théoriques qui se faisaient à Paris y étaient exposés »<sup>76</sup>.

68. Cf. <https://www.academie-francaise.fr/les-immortels/louis-de-broglie>.

69. carton F17/27953 des archives nationales.

70. Lors de l'épuration, il est suspendu de ses fonctions le 21/09/44 pour avoir été nommé au Conseil national du Gouvernement de Vichy. Il est réintégré dans ses fonctions le 26/10/44 car sa nomination avait été faite sans l'avoir consulté ni sans avoir été signifiée à l'intéressé et dans la mesure où de Broglie a toujours refusé de se rendre à Vichy (carton F17/27953 des archives nationales).

71. Il est promu le 1/01/1935 à la 2<sup>ème</sup> classe, le 1/01/1940 à la 1<sup>ère</sup> classe, le 1/01/1950 à la classe exceptionnelle (carton F17/27953 des archives nationales).

72. LOCHAK 1992, p. 167.

73. VILA-VALLS 2012, pp. 80-81.

74. DAUDEL 1998, p. 53.

75. Liste des thèses où j'ai été jury (n°1 en 1931 - n°241 en 1971) - carton 42-J-1 des archives de l'Académie des sciences.

76. LOCHAK 1992, p. 160.

Ainsi, le [de Broglie](#) chercheur, s'est mué en [de Broglie](#) enseignant en même temps qu'il se convertissait à la vision indéterministe. On peut invoquer deux raisons à son absence de travail de recherche autour de 1930. La première, c'est qu'« on n'abandonne pas du jour au lendemain une ligne de recherche pour une autre et surtout un mode de pensée pour un autre »<sup>77</sup> La seconde, c'est que « son nouveau métier d'enseignant lui laissait moins le loisir de continuer sur cette voie [de la théorie causale], en raison du fait qu'il ne pouvait pas se permettre de présenter à ses étudiants des ébauches de théories »<sup>78</sup>.

### Entre 1928 et 1951, de Broglie fait œuvre de pédagogie et défend la vision indéterministe

[de Broglie](#) est donc devenu pédagogue. Il a goût à cela. Il enseigne la mécanique quantique car il plaide pour une « vue générale sur la physique atomique » dès le début de l'enseignement supérieur<sup>79</sup>. Il s'implique lui-même dans cette œuvre pédagogique parce qu'il a peur que l'enseignement ne donne aux « jeunes esprits en formation une vue trop archaïque et trop statique de la science »<sup>80</sup>. Ses craintes sont fondées d'après Pestre qui trace un portrait de l'enseignement de la physique en France assez calamiteux :

On ne peut que s'inquiéter pour les étudiants et les futurs chercheurs : jamais ils n'apprendront dans leur cours, leurs manuels, que la physique est en pleine mutation, qu'épistémologiquement elle se transforme. Ce retard, cette absence du théorique ne pourra qu'être une constante de la physique française des années 20 et même 30.<sup>81</sup>

Au delà des futurs physiciens, pour [de Broglie](#) les connaissances nouvelles sur le monde microscopique doivent diffuser plus loin, dans toute la population. Il s'y attelle en mêlant « avec bonheur vulgarisation et histoire des sciences (retrouvant par là sa formation historique initiale), dans une série d'ouvrages fort pédagogiques »<sup>82</sup>. « Les qualités dont Louis [de Broglie](#) a fait preuve dans son enseignement apparaissent d'ailleurs avec évidence dans les nombreux ouvrages et articles de revue qu'il a écrit pour n large public cultivé »<sup>83</sup>. Ainsi, [de Broglie](#) enseigne et vulgarise la mécanique quantique.

Dans ce cadre, si [de Broglie](#) évoque parfois la théorie de l'onde pilote, c'est pour la rejeter :

Cette conception visualise d'une façon intéressante le mouvement des corpuscules en Mécanique ondulatoire sans qu'on ait trop à s'écarter des idées classiques. Malheureusement [...] on rencontre des objections très graves et il n'est pas possible de considérer la théorie de l'onde-pilote comme satisfaisante [...]. Au lieu de parler du mouvement et de la trajectoire des corpuscules, on parle du mouvement et de la trajectoire des « éléments de probabilité », et l'on évite ainsi les difficultés<sup>84</sup>.

Il présente donc la théorie orthodoxe, mais comme un

point de vue, le plus en faveur actuellement : celui qui a été développé par MM. [Heisenberg](#) et [Bohr](#). Ce point de vue est un peu déconcertant au premier abord, mais il paraît cependant contenir une grande part de vérité. [...] Selon ce point de vue] il n'y a plus alors de lois rigoureuses, mais seulement des lois de probabilité. Avec cette façon d'interpréter la Mécanique ondulatoire, on rencontre bien des circonstances étranges. D'abord, les corpuscules existent et on admet toujours que cela a un sens de parler de leur nombre ; néanmoins, on ne peut plus, avec les idées de Bohr, s'en faire l'image claire et classique qui consiste à les regarder comme de très petits objets ayant une position dans l'espace, une vitesse et une

77. LOCHAK 1992, p. 154.

78. VILA-VALLS 2012, pp. 187-188.

79. L. d. BROGLIE 1949, p. 38.

80. L. d. BROGLIE 1949, p. 29.

81. PESTRE 1984, p. 54.

82. MOSSERI 1999, p. 204.

83. GEORGE 1953, p. 442.

84. L. d. BROGLIE 1937, p. 205.

trajectoire. En second lieu, l'autre terme du dualisme, l'onde, n'est plus qu'une représentation purement symbolique et analytique de certaines probabilités et ne constitue plus du tout un phénomène physique au sens ancien du mot. [...] En résumé, l'interprétation physique de la nouvelle Mécanique reste un sujet extrêmement difficile<sup>85</sup>.

de Broglie présente donc l'interprétation de Copenhague, sans nier sa « difficulté », son « étrangeté », son manque d'« images claires ».

### **Pendant cette période, la conversion de de Broglie à la vision indéterministe n'a peut-être pas été totale**

On peut donc raisonnablement se demander si la conversion de de Broglie à la version « orthodoxe » est pleine et sincère. Les écrits plus tardifs de de Broglie laissent entendre que sa première conversion n'était pas totale :

Depuis cette époque [1928], j'ai constamment adhéré à l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire, l'enseignant dans mes cours et m'efforçant, dans des exposés de vulgarisation, d'en faire connaître la nature et l'originalité, sans d'ailleurs jamais me rallier aux conséquences philosophiques assez imprudentes qu'on a parfois voulu en tirer<sup>86</sup>.

de Broglie dit en substance que son adhésion à la vision indéterministe était en quelque sorte scientifique mais pas philosophique. Est-ce une ré-écriture de l'histoire ?

D'autres que lui abondent dans ce sens. Ainsi, selon l'opinion d'un de ses élèves, « même pendant sa période d'orthodoxie, de Broglie est toujours resté passablement hétérodoxe »<sup>87</sup>. Bensaude-Vincent<sup>88</sup> qui cite les écarts de de Broglie par rapport à une interprétation fidèle de la complémentarité, ainsi que ses doutes au sujet de l'abandon définitif du déterminisme, ne pense pas autrement :

Officiellement, Louis de Broglie se présente comme un défenseur de l'interprétation de Copenhague. Mais il est aisé de voir que sa fidélité est superficielle, car sa lecture des thèses de Bohr et Heisenberg est assez originale.

de Broglie aurait-il été insincère pendant sa période d'allégeance à la théorie « orthodoxe » ? On peut se le demander, quand on lit ses écrits :

Peut-être cette « confession » aura-t-elle aussi l'avantage d'empêcher certains chercheurs, comme il s'en rencontre encore assez souvent aujourd'hui, de s'efforcer à revenir en arrière, à remettre en question les conceptions nouvelles de la Physique des incertitudes. Tous ceux, en effet, qui tentent un effort de ce genre, sont amenés à reprendre sous une forme ou sous un autre, les tentatives que divers chercheurs, dont moi-même, avaient faites, il y a une vingtaine d'années, pour tenter de sauver les images précises et les croyances déterministes de la Physique classique. Telle est, par exemple, la tentative connue sous le nom d'interprétation hydrodynamique de Madelung que j'avais précisée en l'appelant la théorie de l'onde-pilote et que j'ai dû abandonner ensuite. On verra ainsi que ce n'est pas de gaieté de cœur, mais plutôt contraint et forcé, que j'ai abandonné les positions traditionnelles de la Physique classique : peut-être cette constatation montrera-t-elle aux incrédules combien ces positions traditionnelles étaient devenues impossibles à défendre. Le souvenir des efforts infructueux qui s'oublent vite précisément parce qu'ils sont infructueux, est loin d'être inutile car il épargne à beaucoup de recommencer un travail voué à l'échec et de s'engager dans des voies en impasse où d'autres auparavant se sont momentanément égarés<sup>89</sup>.

85. L. d. BROGLIE 1937, pp. 205-209.

86. L. d. BROGLIE 1953b, p. 469.

87. ANDRADE E SILVA 1998, p. 6.

88. BENSAUDE-VINCENT 1985.

89. L. d. BROGLIE 1947, pp. 165-166.

Une telle « confession » fait véritablement penser aux autocritiques que les accusés des procès staliniens<sup>90</sup> devaient faire. S'il est tout à fait déplacé de comparer [de Broglie](#) à un opposant à Staline, le père de la dualité onde-corpuscule apparaît un peu comme un marrane<sup>91</sup>, converti contre son gré et de façon non sincère. Louis [de Broglie](#) accepte l'indéterminisme presque à son corps défendant comme en témoigne la phrase suivante : « le déterminisme lui-même, si cher aux physiciens des temps révolus, est obligé de fléchir »<sup>92</sup>, où apparaissent le regret – celui d'avoir abandonné sa vision déterministe – et la contrainte – qui l'y a poussé.

### Les travaux de recherche de de Broglie autour de 1950 esquissent les prémices de son « émancipation » vis-à-vis de la théorie indéterministe

À partir du milieu des années 1930<sup>93</sup>, Louis [de Broglie](#) se lance dans une activité de recherche sur le spin (ou moment cinétique intrinsèque). Il développe petit à petit une théorie (dite de la « fusion ») qui considère une particule (le photon en particulier) comme regroupement de plusieurs particules de spin 1/2.

Lochak considère que ces travaux à partir de 1947 montrent une sorte d'« émancipation idéologique »<sup>94</sup> vis-à-vis de l'école de Copenhague. Il appuie son propos sur, d'une part, la théorie de la lumière que développe [de Broglie](#)

davantage marquée par sa manière naturelle de travailler que par les idées de Bohr auxquelles il proclamait son adhésion. Sa conception de la lumière repose sur un modèle dans l'espace habituel. Son seul emprunt à la théorie orthodoxe était le langage devenu courant en mécanique quantique<sup>95</sup>.

D'autre part, Lochak cite aussi l'étude du spin de l'électron :

Des raisonnements de [Bohr](#) et de [Pauli](#) concluaient à l'impossibilité d'une mesure [... dans certains cas] : c'est l'un de ces interdits dont la mécanique quantique est coutumière et contre lesquels [Einstein](#) s'élevait. Or voici que [de Broglie](#), jusque-là enfant sage (ou assagi) de la théorie, s'éleva contre cette affirmation des idées orthodoxes. [...] Il montra que la mesure du spin n'est difficile que pour des raisons techniques et qu'elle n'est pas impossible par principe. [...] Ce problème marquait une étape importante dans l'évolution de l'état d'esprit de [de Broglie](#) car c'est la première fois, depuis 1927, qu'il s'élevait – et avec succès – contre [...] [Bohr](#) et [Pauli](#)<sup>96</sup>.

Bien plus tard, [de Broglie](#) lui même reconnaîtra que la fin des années 1940 marquent un tournant pour lui :

À partir de 1948, j'ai commencé progressivement à revenir à mes idées primitives<sup>97</sup>.

---

90. Entre 1927 et 1929 Joseph Staline achève de devenir le maître absolu de l'URSS. Il meurt en 1953. Ironiquement, son règne sur l'Union Soviétique correspond sensiblement à la période indéterministe de [de Broglie](#).

91. Les marranes sont les Juifs d'Espagne convertis au catholicisme au XV<sup>e</sup> siècle qui continuaient à pratiquer leur religion en secret.

92. L. d. BROGLIE 1937, p. VIII.

93. L. d. BROGLIE 1953b.

94. LOCHAK 1992, p. 185.

95. LOCHAK 1992, pp. 176-177.

96. LOCHAK 1992, p. 185.

97. L. d. BROGLIE 1974, p. 94.

## E.4 1951-1952 : Second revirement. Louis de Broglie pense à nouveau qu'une théorie causale est possible

À partir du début des années 1950, de Broglie a acquis une position institutionnelle telle qu'il peut se permettre d'interroger à nouveau les fondements de la mécanique quantique

Il est probable qu'au début des années 1950, de Broglie se sente légitime pour s'interroger à nouveau sur les fondements de la mécanique quantique. En effet, à la veille de son second revirement, de Broglie

jouit d'un grand prestige et demeure un personnage incontournable dans le monde académique français. il est secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et l'IHP, où il effectue ses recherches, demeure un lieu d'excellence de la physique théorique française malgré la concurrence de nouvelles institutions scientifiques. de Broglie et ses proches possèdent également le quasi-monopole de l'enseignement de la physique théorique à la Sorbonne, place forte de l'enseignement des sciences en France<sup>98</sup>.

Comme il le reconnaît lui-même, vers 1951, Louis de Broglie est « alors au sommet de [sa] carrière »<sup>99</sup>, ce qui peut expliquer qu'il ait eut la possibilité institutionnelle d'opérer un revirement vers ses premières conceptions déterministes.

On peut faire une première analyse à ce second revirement fondée sur l'hypothèse, déjà évoquée précédemment, que de Broglie n'est pas sincère lors de sa période 1928-1951, qu'il n'est en quelque sorte qu'un « opportuniste »<sup>100</sup>. Selon cette hypothèse, le second revirement n'est que la « sortie du bois » de ce grand « fauve »<sup>101</sup> qui a l'impression qu'il a « les coudées franches » pour assumer au grand jour ses positions déterministes.

Cette analyse n'est bien évidemment pas celle qui est écrite dans les biographies officielles. Selon ces dernières, c'est presque par hasard, vers 1950, que de Broglie recommence à s'interroger sur les fondements de la mécanique quantique. Ainsi, Lochak nous dit que le cours de deux ans entre 1950 et 1952, « véritable traité de mécanique quantique orthodoxe, marque un tournant »<sup>102</sup> dans la pensée de de Broglie. L'intéressé ajoute que ce cours « prouve une certaine tendance à revenir à [ses] idées primitives »<sup>103</sup>. À l'appui de cette thèse, un de ses étudiants témoigne que de Broglie recommence à s'interroger dès cette époque sur la vision indéterministe :

Les cours avancés qu'il professait chaque jeudi à l'Institut Henri Poincaré furent consacrés, en 1950-51 et en 1951-52, à un exposé exhaustif des fondements de cette interprétation [orthodoxe], qu'il essayait de justifier dans les limites du possible. Mais on ne sait pas vraiment s'il essayait ainsi de convaincre ses auditeurs ou, plutôt, de se convaincre lui-même<sup>104</sup>.

Que de Broglie soit sincère ou non, il est prêt pour assumer à nouveau une vision déterministe quand un événement inattendu déclenche son second revirement.

98. BESSON 2018, p. 48.

99. L. d. BROGLIE 1972, p. 60.

100. L'expression est d'un de ses étudiants de l'IHP, Schatzman (BESSON 2018, p. 78).

101. L'expression est de Lochak.

102. LOCHAK 1992, p. 187.

103. Dans ce cours qui a été publié avec les notes – ultérieures – de de Broglie, « le premier niveau est celui du texte lui-même, dans lequel de Broglie s'attache à légitimer la théorie orthodoxe, même s'il en fait apparaître certaines difficultés, le second niveau est celui des notes dans lesquelles il critique la théorie et certains de ses commentaires précédents » (LOCHAK 1992, p. 188).

104. ANDRADE E SILVA 1998, pp. 6-7.



## La proposition en 1951-1952 par David Bohm d'une théorie de l'onde pilote déclenche le second revirement de Louis de Broglie

En 1952 David Bohm, un physicien américain, écrit un article<sup>105</sup> qui propose une *interprétation alternative* de la mécanique quantique<sup>106</sup>. Il s'agit en fait de la théorie de l'onde pilote. La théorie de Bohm présente quelques différences avec celle de de Broglie mais les deux versions sont cohérentes<sup>107</sup>.

Que ce soit par l'entremise d'Einstein ou de Pauli, il semble sûr que Bohm et de Broglie ont eu des relations scientifiques au premier semestre 1951<sup>108</sup>. Et dans son article, Bohm note qu'« on » lui a parlé de Louis de Broglie :

Une fois cet article terminé, on a porté à l'attention de l'auteur des propositions similaires pour une interprétation alternative de la théorie quantique faite par de Broglie en 1926, qu'il a abandonnées plus tard en partie suite à certaines critiques de Pauli et en partie en raison d'objections supplémentaires soulevées par de Broglie lui-même.

Même si de Broglie vit en 1952 la « résurrection de [ses] anciennes idées »<sup>109</sup>, sa réception des travaux de Bohm est « pour le moins négative »<sup>110</sup> :

La situation en était là, à peu près stabilisée depuis un quart de siècle, quand a paru, il y a quelques mois, l'article de M. Bohm dont j'ai parlé au début. Cet article ne contient rien d'essentiellement nouveau puisqu'il ne fait que reprendre la théorie de l'onde pilote que j'avais exposée au Conseil Solvay, théorie qui, ne faisant intervenir que l'onde de probabilité  $\Psi$  et non l'onde à singularité  $u$ , introduite par l'hypothèse de la double solution, me paraît toujours se heurter à d'insurmontables difficultés. Néanmoins, en dehors du mérite d'avoir ramené l'attention sur ces questions, M. Bohm a eu aussi celui de faire un certain nombre de remarques intéressantes et, en particulier, de faire une analyse des processus de mesure envisagés du point de vue de l'onde-pilote qui paraît permettre d'écarter les objections opposées à mes idées par M. Pauli en 1927<sup>111</sup>.

Les apports de David Bohm sont nombreux et remarquables si on compare les articles de Bohm en 1952 à la première version donnée par Louis de Broglie en 1927. Parmi eux, on peut citer les différents exemples d'application, la formalisation du processus de mesure, la facilitation du passage au cas classique et enfin la levée de l'objection faite par Pauli à de Broglie au congrès Solvay en 1927. Dans son article, Bohm note que

105. David BOHM 1952.

106. « David Bohm qui enseignait la mécanique quantique à l'université de Princeton en 1947 et 1948 [...] passa la théorie au crible, avec ses élèves, et publia en 1951 un traité [94] dans lequel il l'exposait en termes mathématiques simples, sans axiomatique réfrigérante, allant du concret à l'abstrait et conservant autant que possible le langage imagé et suggestif de la mécanique classique. [...] Le livre était orthodoxe, mais Bohm suivit la même évolution que de Broglie après son propre cours de la même année il trouva, finalement, que la théorie ne le satisfaisait pas et, dès l'année suivante, il en proposa une nouvelle interprétation » (LOCHAK 1992, pp. 193-194).

107. Pour les différences entre les deux versions, celles de de Broglie en 1927 et celle de Bohm en 1951, voir la thèse de Besson (BESSON 2018, pp. 49-51).

108. D'après Lochak, Bohm, informé par Einstein que sa théorie ressemblait à celle de de Broglie, envoya un « preprint » à ce dernier dès 1951, bien avant sa parution (LOCHAK 1992, pp. 193-194). Il existe effectivement dans les archives de l'Académie des sciences (carton 42-J-7 des archives de l'Académie des sciences) un manuscrit non daté intitulé « Une interprétation causale et continue de la théorie quantique » envoyé à Louis de Broglie par David Bohm concernant la théorie quantique de l'onde pilote. D'après un article récent (DREZET et STOCK 2021) ce texte serait une version primitive des deux articles de Bohm soumis à Physical Review le 5 juillet 1951 et publiés le 15 janvier 1952. La thèse de Besson fait aussi référence à cette « version intermédiaire » envoyée par Bohm à de Broglie « suivant les recommandations de Pauli » (BESSON 2018, p. 59).

109. L. d. BROGLIE 1953b, pp. 469-470.

110. BESSON 2018, p. 60.

111. L. d. BROGLIE 1952, p. 305.

toutes les objections de [de Broglie](#) et [Pauli](#) aurait pu être levées si seulement [de Broglie](#) avait amené ses idées à leur conclusion logique.

Il est donc clair qu'il ne s'agit pas d'une simple résurrection de l'ancienne théorie présentée en 1927. [de Broglie](#) reconnaît un peu plus tard <sup>112</sup> que l'analyse des processus de mesure par [Bohm](#) permet non seulement de lever l'objection à l'onde pilote exprimée en 1927 par [Pauli](#), mais aussi de « retrouver les inégalités de Heisenberg en les conciliant avec le point de vue causal » et enfin de « discerner le postulat arbitraire qui est à la base [...] du raisonnement de M. [von Neumann](#) sur la prétendue impossibilité d'interpréter les lois de probabilité de la Mécanique ondulatoire à l'aide de variables cachées » <sup>113</sup>. « En effet, la théorie de l'onde pilote fournit une interprétation causale des lois de probabilité de la mécanique ondulatoire par des variables cachées qui, malgré les difficultés qu'elle soulève, a le mérite d'exister alors que le raisonnement de M. [von Neumann](#) a la prétention de lui interdire d'exister » <sup>114</sup>.

En un mot, grâce à [Bohm](#), [de Broglie](#) reprend confiance en la possibilité de trouver une théorie quantique causale <sup>115</sup>. C'est l'analyse que fait [Lochak](#) selon lequel « malgré les réticences de [de Broglie](#), le mémoire de [Bohm](#) eut sur lui un effet déclencheur, qui le sortit l'expectative dans laquelle il se trouvait encore et le poussa vers l'action » <sup>116</sup>.

Une autre interprétation des faits est possible là encore. En se faisant l'écho d'un « changement de position en partie guidée par des considérations stratégiques » <sup>117</sup> la thèse de [Besson](#) présente un [de Broglie](#) « opportuniste » qui pourrait résumer sa position par la formule : « si la théorie de [Bohm](#) est correcte, je l'avais dit avant lui, si la théorie de [Bohm](#) est fausse, je l'avais également dit » <sup>118</sup>. On verra que le reste de la carrière de [de Broglie](#) semble démentir cette vision.

### **Les relations de [de Broglie](#) avec [Vigier](#) et [Einstein](#) accompagnent et alimentent ses réflexions lors de son second revirement qui est rendu public en 1952**

Cependant, les travaux de [Bohm](#) ne sont pas les seuls à déclencher le second revirement de [de Broglie](#). Une autre idée va conforter [de Broglie](#) dans sa réactivation de la double solution, qui lui est transmise après un parcours entre chercheurs pour le moins tortueux <sup>119</sup>. ?? attire l'attention de [de Broglie](#) sur une analogie possible entre le guidage des singularités par l'onde et une « idée d'[Einstein](#), publiée la même année, sur les

112. L. d. BROGLIE 1956b, pp. 90-91.

113. En 1932, [von Neumann](#) croit avoir disqualifié les théories à variables cachées. La première remise en question du théorème a été apparemment faite par la mathématicienne et philosophe [Grete Hermann](#) en 1935 ([SOLER 2009](#)). Cependant, la réfutation du théorème de [von Neumann](#) par [Grete Hermann](#) est passée largement inaperçue dans le milieu des physiciens. [Louis de Broglie](#), quant à lui, ne fera mention de la démonstration de [von Neumann](#) dans ses textes qu'à partir des années 1940, en la tenant pour valide et en l'utilisant comme argument imparable contre tout éventuel retour au déterminisme, jusqu'en 1952.

114. [LOCHAK 1992](#), p. 188.

115. Les relations avec [Bohm](#) se sont poursuivies longtemps, comme l'attestent l'adresse de [David Bohm](#) à Londres (où ce dernier s'installe après 1961) notée sur le dos d'une enveloppe dans les archives de [Louis de Broglie](#) à l'Académie des sciences (carton 42-J-7 des archives de l'Académie des sciences) ainsi que plusieurs écrits scientifiques de [Bohm](#) (articles et chapitre de livre, tirés à part), à certains endroits annotés au crayon de papier par [Louis de Broglie](#).

116. [LOCHAK 1992](#), pp. 193-194 et p. 205.

117. [BESSON 2018](#), p. 78.

118. [BESSON 2018](#), p. 78.

119. Selon [Besson](#) ([BESSON 2018](#), p. 61), [de Broglie](#) a mentionné un de ses élèves – ?? – dans une lettre envoyée à [Bohm](#). Ce dernier a demandé qu'on lui communique les travaux de ?? en relativité car il porte un intérêt à ce domaine en raison des échanges qu'il a avec [Einstein](#). C'est l'intérêt porté à ses travaux par [Bohm](#) qui a motivé ?? à s'intéresser à la théorie de l'onde pilote. Et pour finir, ?? attire alors l'attention de [de Broglie](#) sur l'analogie le guidage des singularités par l'onde et la relativité générale.

singularités dans le champ de gravitation »<sup>120</sup>, comme de Broglie le note peu de temps après :

J'ai ensuite eu connaissance des travaux poursuivis à Paris à l'Institut Henri Poincaré par M. J.-P. ?? qui le conduisaient à reprendre la conception de la double solution en le rattachant à la fois aux idées de M. Bohm et, dans le cadre de la relativité généralisée, sur la possibilité de représenter les particules matérielles par des régions singulières dans la métrique de l'espace temps<sup>121</sup>.

Ces travaux de Vigier<sup>122</sup> se terminent par une note de de Broglie qui écrit :

En y réfléchissant, il me paraît certain que, si l'on parvenait à justifier la théorie de l'onde-pilote, ce ne pourrait être que sous sa forme primitive de la double solution de la manière indiquée par M. ??<sup>123</sup>.

Ainsi, c'est aussi parce qu'il semble possible de « raccorder la théorie de la double solution avec les idées de M. Einstein qui a toujours cherché à représenter les corpuscules par des régions singulières du champ »<sup>124</sup> que de Broglie opère un nouveau virage scientifique en 1951-52. « La possibilité d'unifier quanta et gravitation ouvre la voie pour un nouveau programme de recherche doté d'un fort pouvoir heuristique »<sup>125</sup> pour de Broglie qui a toujours pensé qu'il faudrait que toute théorie causale quantique soit cohérente avec la relativité.

Le second revirement de de Broglie est rendu public<sup>126</sup> le 31 octobre 1952 lors d'une conférence, où il présente « le nouvel examen [qu'il a] fait depuis quelques mois de [ses] idées de 1927 »<sup>127</sup>. Son texte (L. d. BROGLIE 1952) critique l'interprétation orthodoxe :

le retour à des conceptions claires, cartésiennes, respectant la validité du cadre de l'espace et du temps, satisferait certainement beaucoup d'esprits et permettrait non seulement de lever les objections troublantes d'Einstein et de Schrödinger, mais aussi d'éviter certaines conséquences étranges de l'interprétation actuelle. En effet, cette interprétation [...] aboutit logiquement à une sorte de « subjectivisme » apparenté à l'idéalisme au sens des philosophes et elle tend à nier l'existence d'une réalité physique indépendante de l'observateur. Or le physicien reste instinctivement [...] un « réaliste » et il a pour cela quelques bonnes raisons : les interprétations subjectivistes lui causeront toujours une impression de malaise et je crois que finalement il serait heureux de s'en affranchir<sup>128</sup>.

## E.5 Après 1952 : Louis de Broglie cherche une nouvelle théorie causale

**Après 1952, de Broglie est désormais convaincu qu'une théorie causale de la mécanique quantique est possible**

À partir de 1952, de Broglie défend désormais et sans plus jamais revenir dessus, sa vision réaliste, causale, déterministe :

---

120. LOCHAK 1992, p. 195.  
 121. L. d. BROGLIE 1953b, p. 470.  
 122. VIGIER et L. d. BROGLIE 1951.  
 123. VIGIER et L. d. BROGLIE 1951, Note de de Broglie à la suite de l'article.  
 124. L. d. BROGLIE 1956b, p. 92.  
 125. BESSON 2018, p. 76.  
 126. de Broglie avait préalablement publié deux notes aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences, parues en septembre 1951 (L. d. BROGLIE 1951) et en janvier 1952.  
 127. L. d. BROGLIE 1952, p. 299.  
 128. L. d. BROGLIE 1952, pp. 308-309.

Nier l'existence [de la trajectoire], c'est renoncer à la causalité, c'est se condamner à ne pas comprendre <sup>129</sup>.

Contrairement aux affirmations poussées à l'extrême de certaines philosophies idéalistes, j'ai la conviction profonde qu'il existe une réalité physique extérieure à nous qui est indépendante de notre pensée et de nos moyens imparfaits de la connaître. S'il n'en était pas ainsi, l'unité des connaissances humaines et l'accord de tous les hommes sur la constatation des faits seraient, me semble-t-il, incompréhensibles. Pour cette raison je crois que nos théories des phénomènes physiques doivent reposer sur des conceptions claires et sur des images précises de leur évolution dans l'espace et dans le temps (ou plus exactement dans cette combinaison de l'espace et du temps que constitue l'espace-temps einsteinien, l'exactitude des conceptions relativistes ne me paraissant pas devoir être mise en doute).

Sans aller jusqu'à affirmer d'une façon absolue que le déterminisme est universel, je pense que la recherche de la causalité qui lie les phénomènes physiques successifs a toujours été et reste encore le guide le plus sûr de la recherche scientifique <sup>130</sup>.

Son enseignement présente désormais les théories causales, en particulier « les cours du jeudi [...] dans lesquels de Broglie exposait ses recherches qui étaient désormais consacrées à la réinterprétation de la mécanique ondulatoire » <sup>131</sup>.

de Broglie en vient à regretter ses anciens écrits louant l'indéterminisme. Il va même jusqu'à essayer de les faire disparaître <sup>132</sup>.

### **Dans sa recherche d'une mécanique quantique causale, de Broglie rejette l'onde pilote et recherche à faire évoluer son ancienne théorie de la double solution**

En même temps qu'il abandonne la vision « orthodoxe », de Broglie relance sa recherche d'une théorie causale de la mécanique quantique. Il essaie pour cela de donner un nouveau départ à la théorie de la double solution plutôt qu'à celle de l'onde pilote. Selon Besson, « le fait que ?? prenne parti pour la forme de la double solution lui permet de faire valoir la plus-value originelle de son approche par rapport à celle de Bohm, une manière de démontrer que, parmi les théories à variables cachées possibles, la sienne est la plus consistante » <sup>133</sup>. de Broglie a peut-être une raison cachée de préférer la double solution à l'onde pilote, mais il faut bien reconnaître que c'est en accord avec son penchant de 1927. Il justifie d'ailleurs ses divergences de vues avec Bohm dans une lettre qu'il lui adresse le 29 mars 1953 :

Vous savez que nos points de vue ne sont pas tout à fait les mêmes car je ne crois pas à l'existence physique de l'onde  $\psi$  qui en fournit seulement une représentation des probabilités à caractère plutôt subjectif : d'ailleurs dès qu'on a affaire à plus d'un corpuscule, l'onde  $\psi$  doit se représenter dans l'espace de configuration à plus de 3 dimensions et son caractère non physique me paraît alors absolument évident. Il me semble qu'une description causale des corpuscules doit nécessairement se faire dans l'espace ordinaire (ou plutôt l'espace-temps relativiste) à l'aide de fonctions d'onde comportant une singularité <sup>134</sup>.

Louis de Broglie réactive donc son ancienne théorie de la double solution mais en la faisant évoluer. L'idée nouvelle est suggérée par l'analogie avec le mouvement d'une particule en relativité générale. Il

129. L. d. BROGLIE 1973b, pp. 65-66.

130. L. d. BROGLIE 1968a, p. 49.

131. LOCHAK 1992, p. 207.

132. « Ce qu'on trouvait dans ses livres [...] était tellement contraire à sa nature qu'un jour il en fut consterné et écrivit aux Editions Albin Michel une lettre dans laquelle il interdisait toute reproduction des trois ouvrages [...] : *Matière et Lumière*, *Continu et Discontinu en physique quantique*, *Physique et Microphysique* (LOCHAK 1992, p. 169).

133. BESSON 2018, p. 81.

134. L. d. BROGLIE 1953a.

s'agit toujours de déterminer deux fonctions, l'une régulière (associée à l'onde), l'autre singulière (associée à la particule), mais dans cette nouvelle mouture, la singularité est solution non pas de l'équation de Schrödinger mais d'une autre équation, non linéaire<sup>135</sup>. Cela surmonte un problème qui se posait dans la première version de la théorie de la double solution<sup>136</sup>.

Dans cette nouvelle période, la non linéarité est la clé du problème selon de Broglie :

Prenant *a priori* pour bases des équations linéaires et ne sortant pas du tout de l'analyse linéaire, la théorie actuelle [orthodoxe] fait disparaître les accidents locaux dus à la non-linéarité [...] elle efface ainsi les structures corpusculaires<sup>137</sup>.

Le programme de recherche par de Broglie d'une théorie causale prend une nouvelle forme un peu plus tard avec la « thermodynamique cachée des particules » selon laquelle « la particule, même si elle est en apparence isolée, se trouve constamment en contact avec un milieu caché, le milieu subquantique<sup>138</sup>, qui joue le rôle d'un thermostat caché »<sup>139</sup>.

Bien qu'il explore d'autres voies que celle de l'onde pilote, de Broglie, pendant les dix ans où il continue de travailler à l'IHP, apporte à ses étudiants soutiens de Bohm,

un appui scientifique, mais surtout institutionnel, de taille. En tant que figure tutélaire, de Broglie offre un espace pour que de jeunes physiciens puissent consacrer leur temps au développement d'un programme de recherche dont la légitimité est vivement contestée par le reste de la communauté des physiciens quantiques. C'est ainsi qu'il va encadrer un certain nombre de thèses de doctorat dont les sujets sont en rapport avec la théorie causale. [...] De plus, de Broglie ouvre à ces physiciens les portes du séminaire qu'il organise à l'IHP et leur offre la possibilité de publier facilement dans les compte-rendu de l'académie des sciences<sup>140</sup>.

L'aide apportée par de Broglie aux partisans de la vision déterministe n'est pas bien vue par la communauté scientifique.

### Après son retour à la vision déterministe, de Broglie est victime d'un certain ostracisme de la communauté scientifique

En effet, comme on va le voir, le programme de recherche d'une théorie causale est loin de faire l'unanimité. Dès 1952, Louis de Broglie l'avait prévu :

Sans doute, après m'avoir vu abandonner mes premières tentatives, et exposer dans tous mes écrits depuis vingt-cinq ans l'interprétation de Bohr et Heisenberg, certains m'accuseront peut-être d'inconstance en me voyant éprouver quelques nouveaux doutes à son sujet et me demander si ma première orientation après tout n'était pas la bonne. À cela, si je voulais badiner, je pourrais répondre avec Voltaire : « L'homme stupide est celui qui ne change pas. » Mais une réponse plus sérieuse est possible. L'histoire des sciences montre que les progrès de la Science ont été constamment entravés par l'influence tyrannique de certaines conceptions que l'on avait fini par considérer comme des dogmes. Pour cette raison,

135. L. d. BROGLIE 1954, p. 116.

136. Les deux ondes-solution doivent avoir la même phase. C'est un postulat si elles sont solutions de la même équation linéaire (dans la version de 1927). Mais « si l'équation des ondes est localement non linéaire, les solutions ne sont plus indépendantes et l'on peut comprendre l'origine de l'égalité des phases » (L. d. BROGLIE 1954, p.118 note 5).

137. L. d. BROGLIE 1954, p. 125.

138. On trouve aussi dans l'article de Bohm (David BOHM 1952, pp. 166 et 169 en particulier) l'idée que la théorie quantique serait à revoir (« inadéquate ») pour les dimensions inférieures à la taille du noyau, soit  $10^{-15}$  m.

139. L. d. BROGLIE 1973a, pp. 260-261.

140. BESSON 2018, p. 84.

il convient de soumettre périodiquement à un examen très approfondi les principes que l'on a fini par admettre sans plus les discuter <sup>141</sup>.

La justification par [de Broglie](#) de ses nouvelles thèses ne convainc pas toujours.

Pour preuve, il suffit d'ouvrir l'hommage à [de Broglie](#) édité pour son 60<sup>ième</sup> anniversaire, qui coïncide justement avec son second revirement. Comme le note Lochak, « [de Broglie](#) était attaqué dans son livre à la suite de ses notes récentes qui suivaient les articles de Bohm. Ce fut une levée de boucliers en faveur de l'interprétation orthodoxe » <sup>142</sup>. Ainsi, si Léon [Rosenfeld](#) trouve la démarche de [de Broglie](#) admirable, c'est dans le cadre de l'adhésion en 1928 du Prix Nobel « après mûre réflexion aux conceptions de l'école de Copenhague » <sup>143</sup>. Mais quand il s'agit de juger la réactivation en 1951-52 d'une théorie causale, [Rosenfeld](#) se fait ironique :

on comprend que le pionnier [[de Broglie](#)] s'avancant sur un territoire inconnu ne trouve pas d'emblée la bonne route ; on comprend moins qu'un touriste [[Bohm](#)] s'égaré encore après que ce territoire a été levé et cartographié au vingt-millième.

J'avoue ici ne pas comprendre pourquoi Louis [de Broglie](#), commentant la note de ??, semble encore maintenant marquer une préférence pour cette idée de la « double solution » <sup>144</sup>.

Quant à [Pauli](#) qui avait en 1927 porté le coup de grâce à l'onde pilote, il considère que la nouvelle forme de la théorie causale en 1951 n'est « qu'un programme mathématique » <sup>145</sup>, autrement dit : c'est peu convainquant <sup>146</sup>.

Selon Lochak, le revirement de [de Broglie](#) « fit scandale non parce qu'il était « révolutionnaire », mais parce qu'il violait un tabou » <sup>147</sup>. On reproche à [de Broglie](#), ajoute Lochak,

d'avoir été, avec Einstein, la mauvaise conscience de la mécanique quantique, d'en avoir troublé le concert, on le lui reproche plus qu'à Einstein, car contrairement à lui, il a d'abord cédé devant l'école de Copenhague, pour s'en détacher ensuite. Quand il rompit, [Einstein](#) et [Schrödinger](#) l'en félicitèrent ; les autres grands de la mécanique quantique en eurent du ressentiment <sup>148</sup>.

Effectivement, [de Broglie](#) n'obtient dans l'ouvrage jubilaire que le soutien des opposants de toujours à la vision indéterministe, [Schrödinger](#) et [Einstein](#). Ce dernier déclare « qu'il n'[a] rien à ajouter aux positions qu'il avait exprimées ces dernières années et qu'il considérerait ce que le "treffliche" [de Broglie](#) avait dit comme suffisant » <sup>149</sup>.

Il faut bien du courage à [de Broglie](#), note un de ses proches, pour oser « se confronter tout à coup à tous ceux auxquels il s'était rallié depuis 1927, ses éminents confrères MM. [Heisenberg](#), [Bohr](#), [Pauli](#) » <sup>150</sup>. Il parle d'un « un tollé, qui, étant donné le climat de bonne éducation du milieu, se manifestait par une attitude pragmatique et sceptique, laquelle est parfois plus humiliante qu'une très franche opposition » <sup>151</sup>.

141. L. d. BROGLIE 1952, p. 310.

142. LOCHAK 1992, p. 201.

143. GEORGE 1953, Contribution de Rosenfeld, « l'évidence de la complémentarité » p. 43.

144. GEORGE 1953, Contribution de Rosenfeld, « l'évidence de la complémentarité » pp. 55-57.

145. GEORGE 1953, Contribution de Pauli, « Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique et sur la théorie de l'onde pilote » p. 37.

146. On ne sera pas étonné de voir que [Pauli](#) et Léon [Rosenfeld](#) sont contre [de Broglie](#) comme contre Bohm deux « défenseurs actifs de l'orthodoxie [...] qui se distinguent par leur virulence » (BESSON 2018, p. 55).

147. LOCHAK 1992, p. 203.

148. LOCHAK 1992, p. 166.

149. La citation (MATHIEU D'ESCAUDOEUVRES 1998, p. 143) fait référence à une lettre d'[Einstein](#) du 6 avril 1954 (MATHIEU D'ESCAUDOEUVRES 1998, p. 146). « Treffliche » signifie « excellent ».

150. MATHIEU D'ESCAUDOEUVRES 1998, pp. 141-142.

151. MATHIEU D'ESCAUDOEUVRES 1998, pp. 141-142.

Ceci est corroboré par Lochak, qui dit que les jeunes chercheurs considèrent souvent de Broglie après 1952 avec mépris :

Loin de partager mon admiration pour de Broglie, les jeunes « thésards », mes aînés, parlaient de lui à mots couverts, voire avec des sobriquets infamants, comme s'il était devenu fou ou qu'on avait découvert chez lui quelque malversation. Ils me conseillaient, sur un ton protecteur et confidentiel, de suivre d'autres séminaires, non pas pour étendre mes connaissances, mais pour m'aérer et mettre le naïf jeune homme que j'étais à l'abri des mauvaises fréquentations <sup>152</sup>.

Pierre-Gilles de Gennes rapporte ainsi que les normaliens boudaient les cours de de Broglie à l'ENS <sup>153</sup>. Besson parle pour sa part du « parfum de marginalité entourant de Broglie et ses fidèles » <sup>154</sup>. Il ajoute : « la courtoisie n'est que de façade et les jeunes doctorants ne sont pas avares en quolibets envers de Broglie dans les couloirs de l'IHP » <sup>155</sup>.

### Les institutions ont vis-à-vis de de Broglie à la fin de sa carrière scientifique une position ambiguë

Cependant, la carrière universitaire de de Broglie se poursuit normalement, ce dernier bénéficiant toujours de promotions <sup>156</sup> et le pouvoir qu'il a acquis continue à lui conférer une position d'importance dans le monde de la recherche. Sa situation est ambiguë car si « de Broglie [est] isolé [...] avant sa retraite, tant qu'il détenait la clé des postes, des crédits et des honneurs, la communauté scientifique [a] enrobé son hostilité sous des dehors révérencieux <sup>157</sup>.

Le 14 août 1962 (la veille de ses 70 ans), il est mis à la retraite <sup>158</sup> mais son travail continue, toujours dans la même direction :

Dès qu'il fut libéré de ses fonctions, de Broglie se mit au travail avec ardeur, en profitant de son excellente forme : quand on doit mourir à quatre-vingt-quinze ans, à soixante-dix on est jeune. Après sa retraite, il publia sept livres, trente mémoires, cinq notices académiques et une quinzaine d'articles généraux. En quittant le séminaire de l'IHP, il proposa à quatre d'entre nous (Andrade e Silva, Fer, Thiounn et moi-même) d'en fonder un nouveau avec lui, à l'Académie, « le premier depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle » nous dit-il. Ce séminaire s'est réuni dans son bureau de secrétaire perpétuel tous les mois pendant treize ans (de l'automne 1962 à l'été 1975), le mercredi après-midi, après le bureau des longitudes dont il ne ratait jamais les réunions <sup>159</sup>.

En 1972 [...], le monde académique lui restait fidèle et le portait à des hauteurs un peu inutiles qui ne faisaient que l'éloigner du commun des mortels, tandis que les instances scientifiques véritablement agissantes lui refusaient la seule chose qu'il demandait, à savoir des élèves pour continuer ses travaux <sup>160</sup>.

La place qu'il occupait depuis 1952 dans la communauté est éclairée par le positionnement des institutions lors de son décès, comme le conte son biographe et ami Georges Lochak :

Ses obsèques eurent lieu à Saint-Pierre de Neuilly « sans armoiries et sans discours », selon ses vœux, en présence d'une centaine de personnes de sa famille et de ses plus proches confrères, élèves et amis.

152. LOCHAK 1992, p. 208.

153. GENNES 1998.

154. BESSON 2018, p. 82.

155. BESSON 2018, p. 82.

156. Il est rangé au 2<sup>ième</sup> chevron du groupe E le 1/11/1957, il est promu à la classe exceptionnelle d'âge le 1/10/1960 (carton F17/27953 des archives nationales).

157. LOCHAK 1992, p. 208.

158. carton F17/27953 des archives nationales.

159. LOCHAK 1992, p. 239.

160. LOCHAK 1992, p. 235.

La seule manifestation officielle fut une séance solennelle sous la coupole de l'Institut. Ni les pouvoirs publics, ni l'Université, ni le CNRS, ni la Société française de physique (qu'il présida), ni le CERN (à la formation duquel il avait appelé), ne firent quoi que ce soit. Il n'y eut rien à l'institut Henri-Poincaré, ni dans aucun laboratoire de physique, ni à la télévision, ni sur les grandes chaînes de radio. La presse en parla à peine : un article de-ci de-là, avec les erreurs d'usage. On fit encore moins qu'il ne le prévoyait dans une lettre qu'il m'adressa le 15 mai 1976 : « Quand je viendrai à mourir, disait-il, on me rendra hommage de diverses manières pendant quelques jours, puis on n'en parlera plus. C'est ce qui arrive toujours lors du décès de personnages connus ». En fait, dès le premier jour, on n'en parla plus <sup>161</sup>.

Ainsi, à sa mort, [de Broglie](#) n'a pas les hommages auxquels on pourrait s'attendre. C'est la preuve que le monde de la recherche ne le considère plus vraiment comme l'un des siens.

## Conclusion

Comment ne pas reconnaître que « Louis [de Broglie](#) est l'une des figures les plus singulières, originales et, en un sens, tragiques de l'histoire des sciences » <sup>162</sup> ? Personnage tragique, il l'est, car subissant un conflit intérieur (entre l'acceptation ou le rejet de l'indéterminisme), il est soumis à la fatalité (après avoir été porté aux nues, il est rejeté et meurt presque oublié).

Cependant, à l'instar de ses particules microscopiques, [de Broglie](#) n'est pas l'objet du sort, mais le sujet déterminé de sa trajectoire, fut-elle funeste. En cultivant « un non-conformisme conscient et lucide » <sup>163</sup>, [de Broglie](#) accepte son destin. Comment ne pas penser qu'il parle de lui quand il salue les « efforts individuels qui brisent les cadres fallacieux ou trop étroits des idées reçues » <sup>164</sup> ? Il revendique cette indépendance, cette liberté : « quand des chercheurs sérieux et qualifiés s'engagent dans des voies nouvelles, l'on doit toujours respecter leurs efforts et nul n'a le droit de les entraver » <sup>165</sup>.

Au lieu de rupture on peut discerner dans la vie de [de Broglie](#) une continuité. Besson voit dans les revirements de [de Broglie](#) « une constante épistémologique [...] il s'agit d'un réalisme qui impose de maintenir des représentations concrètes du monde » <sup>166</sup>. Selon Louis [de Broglie](#), la pensée scientifique évolue « en spirale qui la ramène périodiquement vers des idées pressenties » <sup>167</sup>. Si c'est une règle pour l'histoire des sciences, quoi de plus normal pour un physicien comme Louis [de Broglie](#), féru d'histoire, que d'être lui-même sujet à cette « loi » ? Loin de ce qui peut apparaître comme des virages à 180°, [de Broglie](#) poursuit tout droit le chemin que la pensée scientifique lui impose. Et ce chemin apparaît, plutôt qu'un zig-zag, comme une voie médiane. En effet, toute la carrière scientifique de [de Broglie](#) peut être résumée par la recherche des « grandes synthèses dont la découverte marque les étapes des plus importants progrès de la science » <sup>168</sup>, entre optique et mécanique (L. d. BROGLIE 1924), entre onde et particule (L. d. BROGLIE 1927), entre quantique et électromagnétisme (L. d. BROGLIE 1939), entre quantique et relativité (VIGIER et L. d. BROGLIE 1951) et entre mécanique et thermodynamique (L. d. BROGLIE 1968b).

---

161. LOCHAK 1992, p. 243.

162. La citation est de Jean Bricmont (BRICMONT 2020, pp. 209-210).

163. L. d. BROGLIE 1975, pp. 384-385.

164. L. d. BROGLIE 1975, pp. 384-385.

165. L. d. BROGLIE 1975, pp. 384-385.

166. BESSON 2018, p. 61.

167. L. d. BROGLIE 1956a, p. 173.

168. L. d. BROGLIE 1970, p. 373.



# Annexe F

## Bibliographie commentée du cinquième congrès Solvay de 1927

### Introduction

Instaurés en 1911 sous l'égide du mécène belge Enerst Solvay, les congrès Solvay de physique<sup>1</sup> regroupent tous les trois ans des physiciens de plusieurs pays pour traiter des thèmes scientifiques d'actualité. La photo du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay de 1927 est fameuse<sup>2</sup>, qui montre de nombreux et illustres scientifiques, quelques uns très jeunes – moins de trente ans ! Le cliché représente les 29 participants à ce congrès<sup>3</sup>. Parmi eux, 17 sont ou seront lauréat-e-s d'un prix Nobel de physique ou de chimie (la seule femme participant, Marie Curie, ayant obtenu les deux récompenses). Certains sont nommés aujourd'hui « les pères de la quantique ».

Le 5<sup>e</sup> Conseil Solvay est un colloque d'une semaine qui s'est tenu à Bruxelles en octobre 1927. Plus qu'un regroupement des plus éminents scientifiques de l'époque, il peut être considéré comme le moment où la théorie quantique est à la croisée des chemins, selon le titre d'un ouvrage (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009) qui lui est exclusivement consacré. Pour Heisenberg, qui participait au congrès, les discussions qui y ont eu lieu « ont contribué extraordinairement à la clarification des fondements physiques de la théorie quantique et ont en effet conduit à l'achèvement de celle-ci »<sup>4</sup>. Cela ne s'est pas fait sans heurts, à tel point que le 5<sup>e</sup> Conseil Solvay a pu être comparé à une « bataille décisive [qui] se livra en Belgique » (DIU 2009). Cet affrontement est souvent présenté comme opposant deux hommes : Niels Bohr et Albert Einstein.

En fait, derrière Bohr, c'est toute « l'école de Copenhague » qui regroupe les physiciens du laboratoire de Bohr à Copenhague, ceux de l'équipe de Born à Göttingen (sans oublier Dirac qui se trouve à Cambridge) qui va imposer une nouvelle façon de voir le monde : l'« interprétation de Copenhague »<sup>5</sup>. D'autre part, comme nous le verrons, Einstein n'est pas le seul en octobre 1927 à émettre des doutes sur le caractère

---

1. Il existe aussi des congrès de chimie.

2. Cf. figure F.1 (COUPRIE 1927). Il se vend même des tee-shirt avec une reproduction du cliché, cf. <https://www.redbubble.com/fr/shop/solvay+conference+t-shirts>.

3. Il existe aussi un court-métrage, beaucoup moins connu, réalisé par l'un des participants (LANGMUIR 1927), cf. figure F.2.

4. Werner HEISENBERG 1929, p. 495, ma traduction.

5. « Il est d'usage d'associer la mécanique quantique « orthodoxe » à l'« interprétation de Copenhague » qui est, selon l'usage, l'interprétation de la mécanique quantique commune à tous les membres de son groupe fondateur : Bohr, Born, Heisenberg, Pauli, Jordan, Dirac » (CHEVALLEY 1985, annexe 1, p. 288 et suivantes).

définitif de cette nouvelle mécanique des quanta, espérant une autre physique, déterministe.

Les livres d'histoire sur la physique moderne qui ont parfois connu un large lectorat (PAIS 1982; MEHRA et RECHENBERG 2000; SEGRÈ 2011; KUMAR 2020, en particulier) ont tous une partie dédiée à ce congrès de 1927, faisant souvent de cette date celle de la naissance officielle de la physique quantique. Pourtant le 5<sup>e</sup> Conseil Solvay n'est jamais cité par ceux qui y ont participé lorsqu'ils ont reçu le Prix Nobel<sup>6</sup>. Nous allons tenter dans ce qui suit de discerner la réalité et le mythe : que s'est-il véritablement joué à Bruxelles fin octobre 1927 ?

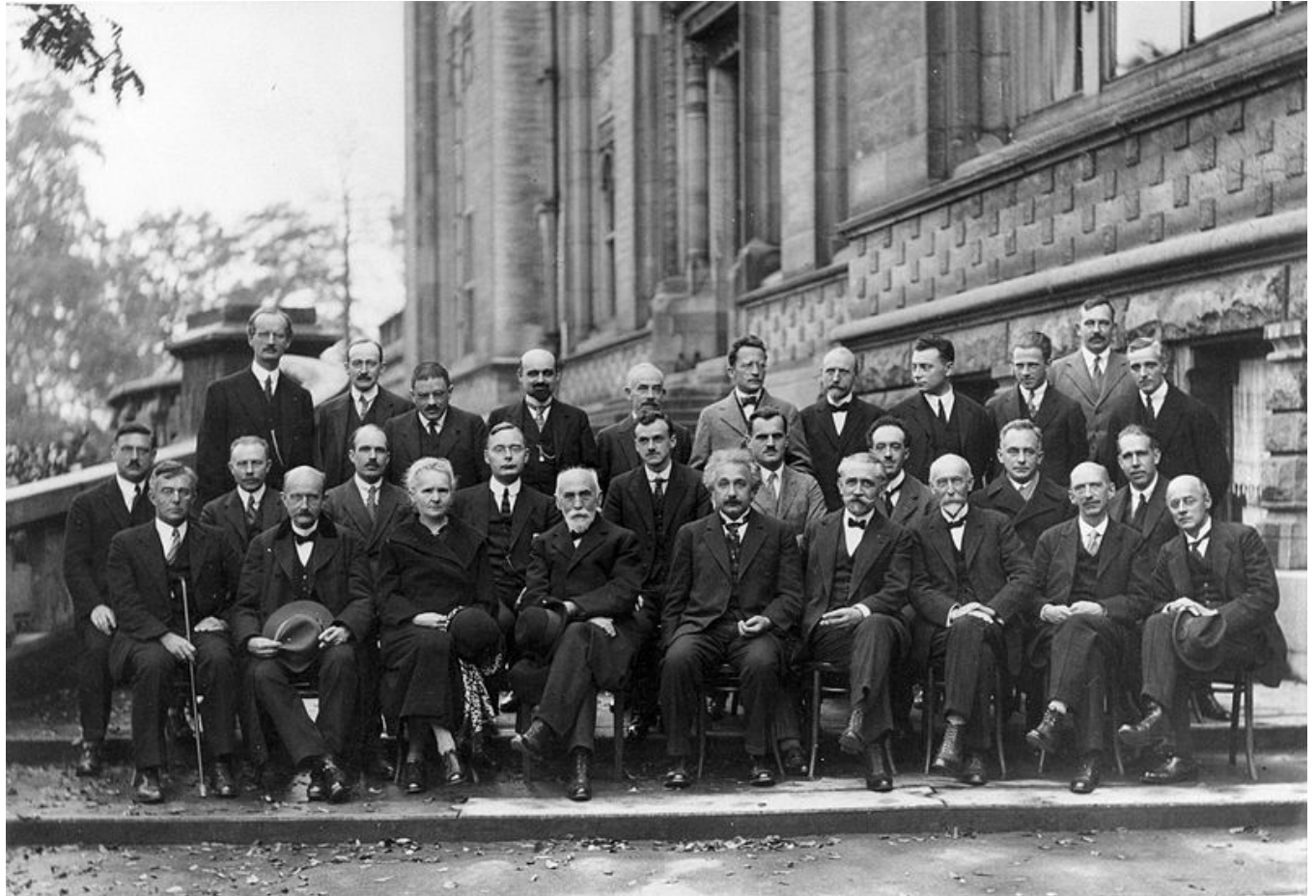


FIGURE F.1 – Photographie des participants au 5<sup>e</sup> Conseil Solvay de 1927 - Bruxelles (COUPRIE 1927).

De gauche à droite,

au premier plan : Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles Eugène Guye, Charles Wilson, Owen Richardson,

au deuxième plan : Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr,

à l'arrière plan : Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph H. Fowler, Léon Brillouin.

6. Ils sont pourtant nombreux (COMPTON 1927; L. d. BROGLIE 1929; Werner HEISENBERG 1932; LANGMUIR 1932; SCHRÖDINGER 1933; DIRAC 1933; PAULI 1945; Max BORN 1955). Seul Pauli dans sa bibliographie mentionne les actes du Congrès.

## F.1 Genèse et déroulement du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay

### F.1.1 Genèse du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay

#### A partir de 1911, sont organisées des conférences tous les trois ans, les Conseils Solvay

En 1910, l'électrochimiste prussien Walther Nernst veut organiser un « concile » international de physiciens. Du fait des fortes tensions entre l'Allemagne et la France à l'époque, il convient de le faire « en terrain neutre » et sous l'égide d'un organisateur qui ne soit ni français ni allemand. Il songe à l'industriel Ernest Solvay<sup>7</sup>, mécène principal de l'université libre de Bruxelles (ULB). Ernest Solvay accepte et propose à vingt-six scientifiques de participer à un congrès international<sup>8</sup>. Le premier Conseil Solvay qui a lieu à Bruxelles<sup>9</sup> fin octobre - début novembre 1911, réunit des scientifiques de nombreuses nationalités<sup>10</sup> sous la présidence du prix Nobel 1902 de physique Hendrik Lorentz (néerlandais<sup>11</sup>). Pour pérenniser l'organisation de tels congrès, Lorentz propose à Solvay la création d'un institut pour la recherche en physique<sup>12</sup>. Ce dernier y répond favorablement<sup>13</sup>. Après celui de 1911, sont organisés grâce à ce mécénat des congrès ou « Conseils Solvay » en 1913, 1921 et 1924<sup>14</sup>.

#### Les Allemands sont exclus des Conseils Solvay après la Première Guerre Mondiale

Le « manifeste des 93 »<sup>15</sup> – signé par 93 intellectuels allemands dont Max Planck et Walther Nernst – niait les exactions de l'armée allemande à la suite de l'invasion de la Belgique neutre. Au sortir de la Première Guerre Mondiale, le physicien français Marcel Brillouin s'appuie sur ce « manifeste de 93 » pour exclure des Conseils Solvay les scientifiques d'outre-Rhin<sup>16</sup>. Pour cette raison, il n'y a pas d'Allemands parmi les participants aux Conseils de 1921 et 1924. Mais en 1926, Hendrik Lorentz obtient l'accord du souverain belge approuvant l'intégration d'Albert Einstein<sup>17</sup> dans le Comité scientifique de l'Institut de Physique<sup>18</sup>. Armand Solvay, qui a succédé à son père après le décès d'Ernest Solvay, fait part de son souhait de voir réintégrer des scientifiques allemands dans les Conseils Solvay, et obtient lui-aussi l'approbation du roi des Belges<sup>19</sup>.

7. NERNST 1910.

8. E. SOLVAY 1911.

9. Le traité de 1831 qui reconnaissait l'indépendance belge établissait du même coup la neutralité du pays sous la garantie des puissances européennes.

10. E. SOLVAY 1910.

11. Les Pays-Bas étaient neutres pendant la Première Guerre Mondiale.

12. LORENTZ 1912.

13. E. SOLVAY 1912.

14. Les Conseils Solvay devaient se réunir tous les trois ans, mais la Première Guerre Mondiale a interrompu leur organisation.

15. Daté du 4 octobre 1914, il fut publié sous le titre « Aufruf an die Kulturwelt, An die Kulturwelt! Ein Aufruf ».

16. BRILLOUIN 1918.

17. Ce qui a été facilité par le fait qu'Einstein, né en Allemagne mais à l'époque de nationalité suisse, était pacifiste : « the period of 1914-18 marks the public emergence of Einstein the radical pacifist, the man of strong moral convictions who would never shy away from expressing his opinions publicly, whether they were popular or not. Early in the war, he and a few other scholars signed a 'manifesto to Europeans' criticizing scientists and artists for having 'relinquished any further desire for the continuance of international relations' and calling 'for all those who truly cherish the culture of Europe to join forces [...] We shall endeavor to organize a League of Europeans' (an effort that came to naught). This appears to be the first political document to which Einstein lent his name. He also joined the pacifist Bund Neues Vaterland, League of the New Fatherland » (PAIS 1982, p.242).

18. en remplacement de Heike Kamerlingh Onnes (LORENTZ 1926).

19. A. SOLVAY 1926.

## En octobre 1927, la théorie quantique est en train de se structurer

Il faut dire que les choses ont évolué très vite depuis le dernier Conseil Solvay de 1924 et que les chercheurs issus des anciens Empires centraux sont au cœur des changements en physique. En 1927, deux théories quantiques existent : d'une part la mécanique ondulatoire fondée sur les ondes de matières de Louis de Broglie<sup>20</sup> et développée en 1926 par Schrödinger<sup>21</sup>, et d'autre part, la « mécanique des matrices » (que ses auteurs préféraient appeler la – nouvelle – mécanique des quanta), développée par Max Born, Pascual Jordan et Werner Heisenberg<sup>22</sup>. Certes, ces deux systèmes sont en fait équivalents (comme l'a montré Schrödinger) mais ils sont fondés sur des formalismes mathématiques très différents et sur des concepts qui s'opposent : « d'une part les ondes, d'autre part les quanta ! La réalité des deux est aussi ferme qu'un roc »<sup>23</sup>.

Durant l'année 1927 avant le Congrès Solvay, deux autres concepts fondamentaux émergent qui font partie des fondements de ce qui prendra le nom d'« interprétation de Copenhague »<sup>24</sup> : les inégalités de Heisenberg<sup>25</sup> et la complémentarité de Bohr<sup>26</sup>.

Ces derniers développements éloignent un peu plus encore la physique de ses bases traditionnelles. Certains (Einstein, de Broglie, Schrödinger) sont tentés de restaurer une mécanique quantique plus « classique » (c'est-à-dire causale, déterministe, avec une ontologie et des images claires). D'autres doutent que ce soit possible, à l'instar de Heisenberg qui écrit à Einstein :

Si j'ai bien compris votre point de vue, vous sacrifieriez volontiers la simplicité [de la mécanique quantique] au principe de causalité (classique). Peut-être devrions-nous nous consoler : le cher Seigneur pourrait aller au-delà [de la mécanique quantique] et maintenir la causalité. Cependant, je ne trouve pas vraiment beau d'exiger plus qu'une description physique du lien entre les expériences<sup>27</sup>.

Avec Heisenberg, d'autres jeunes chercheurs (Pauli, Dirac, Jordan, ...) qui travaillent chez (ou sont en relation avec) Bohr à Copenhague et Born à Göttingen forment l'« école de Copenhague ».



FIGURE F.2 – Images issues du film tourné par Irving Langmuir (LANGMUIR 1927). On reconnaît de gauche à droite : E. Schrödinger, N. Bohr, W. Heisenberg, P. Ehrenfest, P. Dirac, Max Born et L. de Broglie.

20. L. d. BROGLIE 1924.

21. SCHRÖDINGER 1926b; SCHRÖDINGER 1926c; SCHRÖDINGER 1926d; SCHRÖDINGER 1926a.

22. Werner HEISENBERG 1925; M. BORN et JORDAN 1925; M. BORN, W. HEISENBERG et JORDAN 1926.

23. MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 235, citation d'une lettre d'Einstein à Ehrenfest du 28 août 1926, ma traduction.

24. qui est, selon l'usage, l'interprétation de la mécanique quantique commune à tous les membres de son groupe fondateur : Bohr (de Copenhague), Born, Heisenberg, Pauli, Jordan, Dirac (CHEVALLEY 1985, annexe 1, p. 288 et suivantes).

25. Werner HEISENBERG 1927.

26. « Elle se définit par trois idées essentielles :

- l'existence de plusieurs descriptions nécessaires d'un même phénomène ;
- l'idée qu'il existe des couples de descriptions mutuellement exclusives, qui ne peuvent être appliquées simultanément ;
- l'idée que ni l'une ni l'autre n'est suffisante pour donner une description exhaustive du phénomène en question ; et que, par conséquent, une description exhaustive au sens classique est impossible » (BENSAUDE VINCENT 1985, p. 235).

27. MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 240, citation d'une lettre d'Heisenberg à Einstein du 10 juin 1927.

## Une semaine de conférences scientifique est au programme du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay

Ainsi, en 1927, de nombreux scientifiques venant d'Europe centrale peuvent assister au 5<sup>e</sup> Conseil. Le congrès qui se tient à Bruxelles (cf. figure F.3) s'intitule « électrons et photons » : il ne s'agit rien de moins que de parler de la matière et du rayonnement électromagnétique.

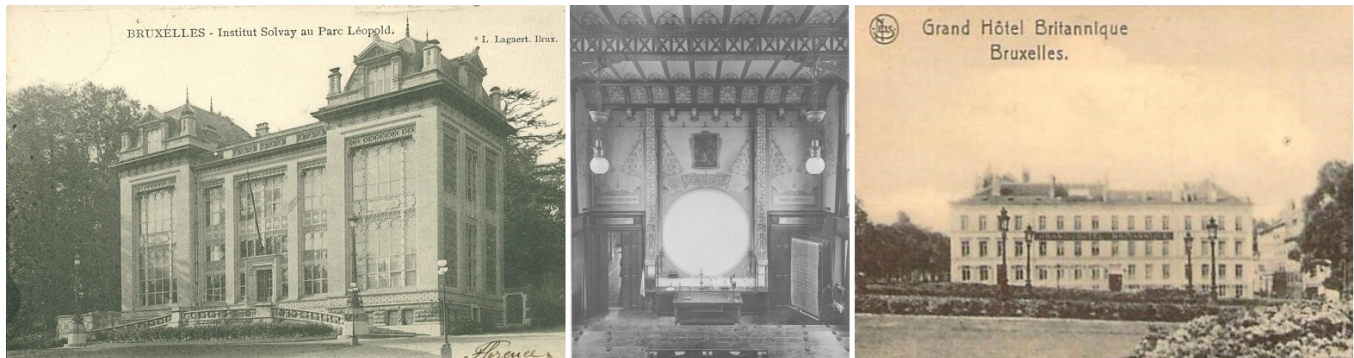


FIGURE F.3 – à gauche : vue extérieure de l'Institut de physiologie de Bruxelles (aujourd'hui lycée Emile Jacqmain) où se tenaient les réunions (c) Collection Dexia Banque - ARB-RBC ; au centre : le grand auditorium de l'institut (c) L'Émulation, 1902, pl. 21. [https://monument.heritage.brussels/fr/Bruxelles\\_Extension\\_Est/Rue\\_Belliard/135/36936](https://monument.heritage.brussels/fr/Bruxelles_Extension_Est/Rue_Belliard/135/36936) ; à droite : l'hôtel où sont descendus les participants [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grand\\_Hôtel\\_Britannique.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grand_Hôtel_Britannique.jpg).

Le programme est le suivant <sup>28</sup> :

- lundi 24 octobre au matin : exposé de W. L. Bragg suivi par une discussion ;
  - lundi 24 octobre l'après-midi : exposé de A. H. Compton suivi par une discussion ;
  - mardi 25 octobre au matin : réception et photographie des participants (cf. figure F.1) ;
  - mardi 25 octobre l'après-midi : exposé de L. de Broglie suivi par une discussion ;
  - mercredi 26 octobre au matin : exposé de M. Born et W. Heisenberg suivi par une discussion ;
  - mercredi 26 octobre l'après-midi : exposé de E. Schrodinger suivi par une discussion ;
  - jeudi 27 et vendredi 28 octobre le matin : voyage à Paris pour le centenaire de Fresnel ;
  - vendredi 28 l'après-midi et samedi 29 octobre le matin : discussion générale ;
  - samedi 29 octobre : déjeuner avec le Roi et la Reine des Belges et dîner offert par Armand Solvay.
- Einstein pour sa part a refusé au président du Conseil, Hendrik Lorentz, de faire un exposé :

Je me rappelle m'être engagé vis-à-vis de vous pour donner un rapport sur la statistique quantique au Congrès Solvay. Après avoir beaucoup réfléchi, je suis arrivé à la conviction que je ne suis pas compétent pour donner un tel rapport d'une façon qui corresponde réellement à l'état où en sont les choses. La raison en est que je n'ai pas été en mesure de participer aussi intensivement aux développements modernes de la théorie quantique qu'il aurait été nécessaire. Ceci est dû en partie à ce que j'ai, dans l'ensemble, un talent trop peu réceptif pour suivre les développements tumultueux, et en partie également parce que je n'approuve pas la manière de penser purement statistique sur laquelle les nouvelles théories sont fondées [...] Jusqu'à maintenant j'avais espéré être capable de donner quelque chose de valable à Bruxelles ; je viens d'abandonner cet espoir <sup>29</sup>.

Pour autant, Einstein n'est pas resté muet lors de ce congrès, comme nous allons le voir.

28. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, pp. 20-21.

29. PATY 1985, p. 332, citation d'une lettre d'Einstein à Lorentz du 17 juin 1927.

## F.1.2 Discussions entre Bohr et Einstein en marge du Conseil

### Des sources historiques rares font mention de discussions entre Bohr et Einstein en marge du Conseil

Bien qu'[Einstein](#) ne fut pas parmi ceux qui devaient faire une intervention, du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay il ne reste parfois que le souvenir d'un « affrontement » entre [Bohr](#) et Einstein. Bien loin d'un débat officiel (dans les actes publiés, [Bohr](#) et [Einstein](#) sont en fait relativement silencieux<sup>30</sup>), ce « duel intellectuel » aurait eu lieu en marge des exposés et discussions institués. Cela aurait pris la forme de discussions informelles au cours des poses et des repas (principalement au petit-déjeuner et au dîner)<sup>31</sup> qui n'ont été entendues que par quelques participants, en particulier [Heisenberg](#) et Ehrenfest.

Les sources historiques qui relatent cela résident, en fait, entièrement<sup>32</sup> sur des comptes-rendus faits par Bohr, [Heisenberg](#) et Ehrenfest. Si le compte-rendu d'?? (EHRENFEST 1927) se fait peu de temps après la conférence :

C'était pour moi un délice d'assister aux conversations entre [Bohr](#) et Einstein. Comme une partie d'échecs. [Einstein](#) sortant sans cesse de nouveaux exemples. Une sorte de perpetuum mobile de la deuxième espèce pour briser la RELATION D'INCERTITUDE. [Bohr](#) cherchant constamment à tirer d'un obscur nuage de fumées philosophiques les instruments pour démolir exemple après exemple. [Einstein](#) comme un diable dans sa boîte : jaillissant à nouveau chaque matin inentamé. C'était savoureux.

ceux de [Heisenberg](#) et [Bohr](#) sont publiés bien des années après. Malgré le temps passé, les écrits tardifs de [Heisenberg](#) corroborent ceux d'Ehrenfest, en 1958 :

à partir du printemps 1927, on disposait d'une interprétation cohérente de la théorie quantique, qui est souvent appelée « interprétation de Copenhague ». Cette interprétation a reçu son test crucial à l'automne 1927 lors de la conférence Solvay à Bruxelles. Les expériences de pensée qui avaient toujours conduit aux pires paradoxes ont été maintes fois discutées dans tous les détails, proposées en particulier par Einstein. De nouvelles expériences de pensée ont été inventées pour débusquer toute incohérence possible de la théorie, mais celle-ci expliquait toutes les expériences connues<sup>33</sup>.

En 1967, [Heisenberg](#) complète ses souvenirs des discussions informelles entre [Bohr](#) et Einstein.

Les discussions se sont bientôt concentrées sur un duel entre [Einstein](#) et [Bohr](#) sur la question de savoir dans quelle mesure la théorie atomique dans sa forme actuelle pouvait être considérée comme la solution finale des difficultés qui avaient été discutées pendant plusieurs décennies. Nous nous sommes généralement rencontrés déjà au petit-déjeuner à l'hôtel, et [Einstein](#) a commencé à décrire une expérience de pensée idéale grâce à laquelle il pensait mettre en lumière, de façon particulièrement clairement visibles, les contradictions internes de l'interprétation de Copenhague. Einstein, [Bohr](#) et moi avons marché ensemble de l'hôtel au bâtiment de la conférence, et j'ai écouté la discussion animée entre ces deux personnes dont

30. « The official discussions referred to above throw light on some of the exchanges on the questions that did interest Einstein, although Bohr's participation in them does not seem to have been so active. For example, no answer from [Bohr](#) to Einstein's analysis of the electron's passage through a slit or screen was recorded » (MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 250) et « we hardly find evidence of any Bohr-Einstein dialogue in the Proceedings of the Solvay Conference published in 1928, where very few discussion remarks by [Einstein](#) [...] and [Bohr](#) are recorded » (DE GREGORIO 2014, p. 14).

31. « Le relazioni alla conferenza Solvay furono eccellenti, ma il vero cuore dell'evento fu la discussione sulla meccanica quantistica tra [Bohr](#) ed Einstein, continuata nei corridoi, durante le passeggiate e i pasti. Mentre discutevano, il comune amico Paul ?? era di solito con loro in qualità di terza parte della discussione » (SEGRÈ 2011, p. 154).

32. C'est ce que disent Bacciagaluppi et Valentini (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, p. 268). Il est à noter que Pais cite un « témoignage de première main d'Otto Stern » (PAIS 1982, pp. 444-445) sur les discussions entre [Bohr](#) et [Einstein](#) en marge du Conseil Solvay. Or Stern n'était pas des participants au 5<sup>e</sup> congrès de 1927 mais de celui du 6<sup>e</sup> de 1930. Comme Pais lui-même déclare que « the debate in the corridors between [Bohr](#) and [Einstein](#) continued during the sixth Solvay Conference (on magnetism) in 1930 » (PAIS 1982, p. 446), on peut supposer que ce témoignage ne concernait pas le congrès de 1927.

33. Werner HEISENBERG 1989, Chap. 2, première édition en 1958, ma traduction.

les attitudes philosophiques étaient si différentes, et de temps en temps j'ai ajouté une remarque sur la structure du formalisme mathématique. Pendant la réunion et en particulier dans les pauses, nous les plus jeunes, principalement Pauli et moi, avons essayé d'analyser l'expérience d'Einstein, et à l'heure du déjeuner, les discussions se sont poursuivies entre Bohr et les autres de Copenhague. Bohr avait généralement terminé l'analyse complète de l'expérience de pensée en fin d'après-midi et la montrait à Einstein à la table du souper. Einstein n'avait aucune bonne objection à cette analyse, mais dans son cœur il n'était pas convaincu.<sup>34</sup>

Le rapport que fait Bohr en 1949 est cohérent avec celui de Heisenberg.

Nos entretiens [entre Bohr et Einstein] sur l'attitude à avoir face à une situation nouvelle en matière d'analyse d'expérience ont naturellement eu trait à de nombreux aspects de la pensée philosophique, mais, malgré toutes les divergences d'approche et d'opinion, un esprit des plus humoristiques a animé nos discussions. De son côté, Einstein nous a demandé avec moquerie si l'on pouvait vraiment croire que Dieu jouait aux dés (« Ob der liebe Gott würfelt »), auquel j'ai répondu en disant, comme d'anciens penseurs, qu'il fallait faire preuve de la grande prudence en parlant de Dieu dans le langage de tous les jours. Je me souviens aussi comment dans la discussion Ehrenfest, dans sa manière affectueuse de taquiner ses amis, a fait allusion en plaisantant à l'apparente similitude entre l'attitude d'Einstein et celle des opposants à sa propre théorie de la relativité ; mais aussitôt ?? a ajouté que sa tranquillité d'esprit ne serait revenue qu'à la condition qu'un accord avec Einstein soit trouvé.<sup>35</sup>

Ce qui est rapporté des apartés Bohr-Einstein dans la lettre d'?? (EHRENFEST 1927) fait plutôt référence aux débats institutionnalisés lors de la discussion générale<sup>36</sup>, et d'autre part, on ne dispose en fait que d'une unique source sur le détail scientifique de ces débats informels : il s'agit du texte tardif de Bohr (BOHR 1949). Aussi, on peut se demander si ce qu'écrit tardivement Bohr des discussions informelles au sujet des expériences de pensée proposées par Einstein est bien objectif : en particulier, les réponses qu'il apporte – en 1949 – à Einstein sont-elles identiques à celles qu'il a effectivement données à l'époque ? Ainsi, « toute tentative d'enquêter sur les discussions Einstein-Bohr à Bruxelles s'avère cruciale et problématique en même temps »<sup>37</sup>.

Si ?? est « presque sans réserve pro-Bohr contra-Einstein » (EHRENFEST 1927), d'autres physiciens présents à Bruxelles en octobre 1927 qui ont eu vent de ces discussions informelles, sans cependant y prendre part, n'ont pas le même avis. Ainsi, de Broglie a raconté qu'Einstein « opposait à Bohr de troublantes objections que ce dernier cherchait à écarter par de subtils raisonnements tout en développant son assez nébuleuse théorie de la complémentarité »<sup>38</sup>. Dirac, qui était lié à l'école de Copenhague, qui a aussi assisté à ces débats en petit comité, a une position plus nuancée que celle d'Ehrenfest :

Je n'ai pas beaucoup participé aux discussions entre Einstein et Bohr lors de la conférence Solvay. J'écoutais leurs arguments, mais je n'y ai pas pris part [...] Il semble clair que la mécanique quantique n'en est pas à son stade terminal. [...] Je considère qu'il est très probable, d'une façon ou d'une autre, qu'Einstein aura finalement raison même si, pour l'instant, les physiciens doivent accepter l'interprétation probabiliste de Bohr, du fait de l'existence des preuves tangibles actuelles<sup>39</sup>.

Quoi qu'il en soit, il semblerait que les documents qui nous sont parvenus sur ces discussions informelles entre Bohr et Einstein aient pour la plupart été produits par des physiciens de l'école de Copenhague. Il ne faut pas s'étonner alors que les commentateurs se fondant sur ces compte-rendus soient convaincus de

34. Werner HEISENBERG 1967, p. 107.

35. BOHR 1949, ma traduction.

36. comme le font remarquer Bacciagaluppi et Valentini (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, p. 22)).

37. DE GREGORIO 2014, p. 14, ma traduction.

38. GERMAIN 1987, p. VII.

39. SEGRÈ 2011, citation de Dirac p. 155, ma traduction de l'italien.

la « victoire » de Bohr lors de ce « duel », comme Diu <sup>40</sup> (DIU 2009, p. 7) : « Bohr – on peut le dire sans faire injure à son illustre adversaire – sortit vainqueur de la confrontation, et entraîna sur ses positions l'immense majorité des physiciens ». S'ils ne semblent pas prendre parti dans la controverse Bohr-Einstein, Baccigaluppi et Valentini <sup>41</sup> pointent tout de même dans leur ouvrage (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009) une « incompréhension de la réelle nature des arguments d'Einstein par Bohr, Heisenberg et Ehrenfest » <sup>42</sup>. Ainsi, la controverse Bohr-Einstein continue à notre époque de fasciner et le « début d'évaluation dépassionnée » <sup>43</sup> du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay n'est pas encore une évidence, preuve du fait que le débat sur l'interprétation des fondements de la mécanique quantique est encore bien vivant.

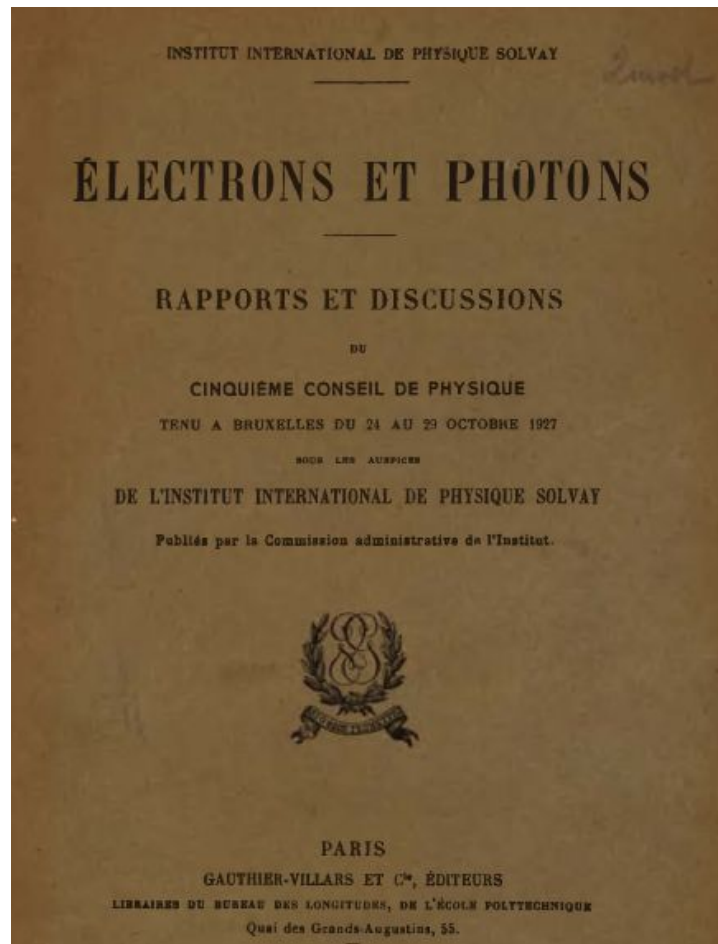


FIGURE F.4 – Couverture du rapport du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay.

40. Il semble clair que Diu est « presque sans réserve pro-Bohr contra-Einstein » (EHRENFEST 1927), comme Ehrenfest. C'est un tenant de cette « interprétation de Copenhague », qui balaie d'un revers de la main toutes les critiques à son encontre tenues pour des « escarmouches d'arrière-garde » (DIU 2009, p. 7), niant toute interprétation alternative possible puisque la mécanique quantique s'intéresse à « un domaine où toute intuition anthropomorphe est a priori défailante » (DIU 2009, p. 8). Cette position extrême le fait parfois tenir des propos étonnants : « le formalisme quantique n'a rien d'exceptionnel. Il est enseigné, sans difficulté majeure, dans nos Universités » (DIU 2009, p. 7).

41. Valentini est un physicien « bohémien », c'est-à-dire partisan de l'interprétation causale de la mécanique quantique initialement proposée par de Broglie en 1927 au 5<sup>e</sup> congrès Solvay. Le propos du livre qu'il a écrit avec Baccigaluppi est donc en grande partie de montrer qu'une autre interprétation que celle de Copenhague est possible. Nous y reviendrons.

42. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, p. 268.

43. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, pp. 24-25.



### F.1.3 Différentes interventions au 5<sup>e</sup> Conseil Solvay

#### Les actes du 5<sup>e</sup> Congrès Solvay sont publiés dans un rapport en français

Des notes sténographiques sont prises lors des journées du Conseil Solvay<sup>44</sup> qui – sans doute – aident à la rédaction du rapport (I. SOLVAY 1928). C'est Vershaffelt qui se charge de mettre en forme les actes du congrès avec l'aide de Kramers à partir en particulier des contributions qui lui ont été envoyées et qu'il a traduites (sauf celle de de Broglie) en français. Le rapport (cf. figure F.4) est publié en 1928 sans qu'on connaisse le mois exact. Cela a lieu nécessairement après la mort de Lorentz le 4 février 1928 (puisque le prologue du rapport est un éloge funèbre à Lorentz, le président des conseils Solvay) plus probablement à la fin de l'année 1928<sup>45</sup> (comme l'atteste une lettre remerciant, en janvier 1929, pour la réception des actes du congrès<sup>46</sup>).

Lors de l'introduction est présentée la photographie officielle ainsi que la liste des participants... à laquelle manque Erwin Schrödinger ! Apparaissent ensuite, dans l'ordre chronologique des interventions, les contributions suivies par leurs discussions spécifiques. La discussion générale clôt le rapport.

Bacciagaluppi et Valentini, qui consacrent la dernière partie de leur ouvrage<sup>47</sup> à la traduction en anglais de ces actes du colloque, notent quelques erreurs dans le rapport original à l'issue de chaque intervention. S'il est naturel que quelques « coquilles » se soient glissées dans ce rapport officiel du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay, il faut par contre être conscient que « les actes ne sont pas un rapport exhaustif et littéral des discussions entre les participants, comme le révèle les rapports sténographiques ; il s'agit plutôt d'un compte rendu rationalisé »<sup>48</sup> car le rapport publié d'une part n'est pas toujours parfaitement fidèle aux notes sténographiques<sup>49</sup> et, d'autre part, toutes les remarques orales des participants n'y sont pas consignées<sup>50</sup>.

#### Dans ces actes, l'« intervention » de Bohr a un statut particulier

Le chapitre « le postulat des quanta et le nouveau développement de l'atomistique » (I. SOLVAY 1928, pp. 215-247) a un statut tout à fait particulier vis-à-vis des autres interventions consignées dans le rapport. Une note au bas de la première page de cette partie indique en effet :

Cet article, qui est la traduction d'une note publiée tout récemment dans *Naturwissenschaften*, t. 16, 1928, p. 245, a été ajouté à la demande de son auteur [Niels Bohr], pour remplacer l'exposé de ses idées qu'il fit au cours de la discussion générale suivante. Il est essentiellement la reproduction d'une conférence sur l'état actuel de la théorie des quanta qui fut faite à Côme le 16 septembre 1927, à l'occasion des fêtes jubilaires en l'honneur de Volta.

Bohr a donc suggéré qu'une traduction de sa conférence de Côme – amendée pour la revue *Naturwissenschaften* comme nous le verrons – soit incluse dans le rapport à la place de la plupart de ses interventions orales lors de la discussion générale<sup>51</sup>. « Cela a donné lieu à une croyance commune que Bohr a donné

44. Des auteurs font référence à des notes « pour la plupart non encore éditées » qui sont conservées aux archives Niels Bohr à Copenhague (DE GREGORIO 2014, p. 25) et (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, p. 23).

45. Le retard de publication semble imputable à Bohr car les autres contributions ont toutes été envoyées avant fin janvier (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, pp. 22-24).

46. INCONNU 1929.

47. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, pp. 277-535.

48. DE GREGORIO 2014, p. 14, ma traduction.

49. Par exemple : « Notes from Solvay Meeting (1927), discussion following Compton's speech, p. 2. This Einstein remark is cancelled in the report, but remains well readable » (DE GREGORIO 2014, p. 15, note 62).

50. « very little of what [the participants] said came through in the official published discussions » (MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 246).

51. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, Note de bas de page p. 16.

un rapport sur un pied d'égalité avec les autres rapports, et que la discussion générale à la conférence était la discussion qui a suivi »<sup>52</sup> : rétrospectivement (« pour l'Histoire »), tout se passe comme si le physicien danois avait fait un exposé à Bruxelles (ce qui n'est pas le cas), exposé qui n'avait été suivi d'aucune discussion (et donc pas le moins mis en cause).

Initialement, il s'agissait donc d'une intervention au congrès de Côme, un mois avant celui de Bruxelles où étaient présents tous les participants du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay hormis Einstein, Schrödinger et Dirac<sup>53</sup>. Mais l'exposé à Côme le 16 septembre lors duquel Bohr lit son « manuscrit de huit pages préparé à la dernière minute - c'est-à-dire le 13 septembre 1927 - devenu assez sommaire vers la fin »<sup>54</sup> semble un échec<sup>55</sup>.

Bohr considère le Conseil Solvay comme un rattrapage du congrès de Côme :

La présence d'Einstein lors de la discussion générale de Côme nous a manqué, mais peu de temps après, en octobre 1927, j'ai eu l'occasion de le rencontrer à Bruxelles à la Cinquième Conférence Physique de l'Institut Solvay, consacrée au thème "Electrons et photons". Lors des réunions de Solvay, Einstein avait été depuis le début une figure de premier plan, et plusieurs d'entre nous sont venus à la conférence avec la grande hâte de connaître sa réaction à la dernière étape du développement qui, à notre avis, a largement contribué à clarifier les problèmes qu'il avait lui-même suscité dès le départ avec tant d'ingéniosité<sup>56</sup>.

Entre les deux congrès, Pauli et Darwin restent avec Bohr au bord du lac de Côme afin d'améliorer le texte produit pour la conférence de Côme<sup>57</sup>.

Alberto De Gregorio (DE GREGORIO 2014) donne une description détaillée de la lente mise au point du texte signé par Bohr depuis la conférence de Côme, où « Bohr a prononcé un discours très concis en septembre [1927]. La formulation de ses idées s'est pleinement développée seulement entre la cinquième Conférence Solvay, à Bruxelles en octobre, et le début de 1928. Concernant la présentation finale par Bohr de son concept de complémentarité dans ses articles de 1928, les rapports sténographiques de la conférence Solvay suggèrent de reconsidérer le rôle qu'ont eu les discussions avec ses collègues »<sup>58</sup>. Il est établi que les débats ont fait évoluer Bohr lors de la maturation de ses idées sur la complémentarité<sup>59</sup>. Ainsi, après le 5<sup>e</sup> Conseil Solvay le texte est toujours en gestation (ce qui explique son envoi tardif pour les actes), Bohr le faisant évoluer avec l'aide de nombreux physiciens<sup>60</sup>.

52. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, Note de bas de page p. 16, ma traduction.

53. MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 192.

54. MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 192.

55. « Unlike these experts [Fermi, Heisenberg, and Pauli], other participants were not terribly impressed, and Bohr often referred to a remark of Eugene Wigner summarizing the prevailing feeling as : « This lecture will not induce any of us to change his own opinion about quantum mechanics ». Notably, Rosenfeld stated about Bohr's lecture : « This complementarity business was just a way of putting [into] words the situation that everybody knew. I suppose if you look at it now, the Como lecture did not clinch the argument; all this question about defining the concepts came later ». Perhaps Klein, though not present at the meeting, hit the mark when he assigned the major fault to the fact that Bohr had not yet well organized his ideas in the manuscript he used because « this was so short that nobody could have understood it really » (MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 195).

56. BOHR 1949.

57. « a manuscript of October 12-13, 1927, which was discussed with Darwin and Pauli by Bohr in Italy, after the Volta Conference, and which improved the unsubstantial manuscript of September 13 : we shall consider that these discussions allowed a substantial improvement of Bohr's presentation of complementary sides of nature, rather than a mere refinement of an already developed presentation » (DE GREGORIO 2014, p. 2).

58. DE GREGORIO 2014, résumé, ma traduction.

59. Ce constat est partagé par Pais : « The dialogue between Bohr and Einstein had one positive outcome : it forced Bohr to express the tenets of complementarity in increasingly precise language » (PAIS 1982, p. 363).

60. « After the Solvay Conference, various colleagues continued to help Bohr to give "The final touch" to his work. In 1928 Bohr wrote another detailed piece of work on the complementary aspects of atomic physics, further expanding the previous paper on the Proceedings of the Volta Conference [...] Dirac's involvement, and most relevantly Pauli's continued help [...] but also Fowler and Hartree were involved with translation and proofs correction (DE GREGORIO 2014, p. 17-18)

On peut se demander si [Bohr](#) ne voit pas là un texte majeur pour la mise en place de l'interprétation de Copenhague dans la mesure où cet article sera publié de nombreuses fois en 1928 (à la fois en français dans les actes du Conseil Solvay et en allemand dans *Naturwissenschaften* – comme déjà précisé – mais aussi en anglais dans la revue *Nature* et en danois – en 1929<sup>61</sup>).

Alors que la conférence est décrite par [Langevin](#) comme celle où « la confusion des idées a atteint son apogée »<sup>62</sup>, la transformation des interventions orales de [Bohr](#) lors d'une discussion commune en un exposé très structuré que de nombreux physiciens ont passé du temps à parfaire participe à une ré-écriture indéniable de l'histoire. Volonté délibérée ou non, cela affermit l'idée<sup>63</sup> que la cinquième conférence Solvay apparaît comme le moment où l'interprétation de Copenhague, en tant que système de pensée cohérent et clair, est mise en place :

En relatant le développement de la théorie quantique, il ne faut surtout pas oublier les discussions de la conférence Solvay à Bruxelles en 1927, présidée par Lorentz. Grâce à la possibilité d'échanges [Aussprache] entre les représentants de différents axes de recherche, cette conférence a contribué extraordinairement à la clarification des fondements physiques de la théorie quantique ; elle apparaît pour ainsi dire comme l'achèvement de la théorie quantique vis-à-vis du monde extérieur<sup>64</sup>.

### La semaine de colloque débute par deux exposés d'expérimentateurs

Quels que soient ses limites et ses défauts, le rapport du 5<sup>e</sup> Conseil Solvay n'en reste pas moins le témoignage le plus complet du congrès et, en tant que tel, un document incontournable. Nous allons nous fonder sur son étude dans la suite de notre exposé.

Le premier jour du colloque ont lieu deux exposés d'expérimentateurs : Compton et Bragg. « L'intervention de Compton a notamment donné lieu à un échange animé d'idées et d'arguments auquel, outre les expérimentateurs (par exemple Bragg, Marie Curie, Richardson et Wilson), presque tous les théoriciens présents ont participé - c'est-à-dire Bohr, Born, Debye, Dirac, Ehrenfest, Lorentz, [Pauli](#) et Schrodinger - à une exception près : selon les actes publiés de la cinquième conférence Solvay, [Einstein](#) est resté silencieux après les présentations de Compton et Bragg »<sup>65</sup>. Il faut dire que l'effet Compton est souvent invoqué comme preuve de l'interprétation corpusculaire du rayonnement électromagnétique proposé plus de vingt ans auparavant par [Einstein](#) (EINSTEIN 1905) et que [Bohr](#) lui-même réfutait encore en 1922 lors de la remise de son prix Nobel<sup>66</sup> l'existence du corpuscule de lumière, le photon (baptisé ainsi par Gilbert N. Lewis en octobre 1926<sup>67</sup>).

Afin de clarifier notre propos, la succession d'interventions dans la suite de la semaine et la discussion générale finale (telles qu'elles apparaissent dans le rapport publié) ne seront pas présentées chronologiquement mais réordonnées en deux catégories : celles qui vont dans le sens de la mise en place d'une théorie unifiée (l'interprétation de Copenhague), l'autre étant celles d'oppositions à une telle théorie indéterministe.

61. DE GREGORIO 2014, p. 17.

62. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, p. 24.

63. BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, p. 24.

64. Werner HEISENBERG 1929, p. 495.

65. MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 242, ma traduction.

66. Voir aussi Pais (PAIS 1982, p. 416) : « In January 1924, Niels Bohr, Hendrik Anton Kramers, and John Clarke Slater submitted to the Philosophical Magazine an article [B1] that contained drastic theoretical proposals concerning the interaction of light and matter. It was written after Compton's discovery, yet it rejected the photon. It was also written after [Einstein](#) and [Bohr](#) had met. »

67. MEHRA et RECHENBERG 2000, p. 241.

## F.2 Mise en place de l'« interprétation de Copenhague » de la mécanique quantique



FIGURE F.5 – De gauche à droite : Max Born, Werner Heisenberg, Niels Bohr, Wolfgang Pauli et Paul Dirac, tenants de l'interprétation de Copenhague.

### F.2.1 Exposé de Born et Heisenberg

#### L'exposé de Born et Heisenberg est un des fondements de l'« interprétation de Copenhague »

Sobrement appelée « la mécanique des quanta », l'intervention « à quatre mains » de Max Born et Werner Heisenberg (I. SOLVAY 1928, exposé pp. 143-181 et discussion spécifique pp. 182-184) place en son cœur la construction axiomatique de la nouvelle mécanique des quanta :

nous sommes placés devant la double tâche, d'abord d'indiquer un système de principes les plus simples possibles et directement rattachés aux observations, d'où la théorie tout entière puisse être déduite comme d'un système d'axiomes mathématiques. [...] Les lacunes de la théorie ont été comblées par von Neumann [...]. Bien que cette théorie n'ait pas encore été élaborée dans toutes les directions, on peut cependant dire avec certitude qu'il est possible d'établir une mécanique des quanta parfaite au point de vue mathématique.<sup>68</sup>

L'exposé met en place les principes de la mécanique quantique telle qu'elle est traditionnellement présentée depuis :

— la théorie est fondée sur l'existence de discontinuités :

La mécanique des quanta est fondée sur cette idée que la physique atomique se distingue essentiellement de la physique classique par l'existence de discontinuités. La mécanique des quanta doit être considérée comme une extension directe de la théorie des quanta, établie par Planck, Einstein et Bohr<sup>69</sup>.

— la physique est indéterministe et fondée sur l'aléa :

les discontinuités introduisent dans la physique de l'atome un élément statistique. Cet élément statistique constitue une partie essentielle des bases de la mécanique des quanta ; d'après celle-ci l'allure d'une expérience ne peut, dans beaucoup de cas, être déduite des conditions initiales que d'une manière statistique. [...] Il semble donc qu'il n'y ait aucun argument d'ordre empirique qui s'oppose à ce qu'on admette en principe l'indétermination du microcosme. [...] Il s'agit [...] d'une impuissance essentielle, profondément ancrée dans la nature de notre pouvoir de comprendre les phénomènes physiques. On voit que la mécanique des quanta fournit des valeurs moyennes avec exactitude, mais ne

68. I. SOLVAY 1928, pp. 168-170, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

69. I. SOLVAY 1928, p. 143, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

peut prédire la venue d'un événement isolé. Le déterminisme qui jusqu'ici a été admis comme base des sciences exactes de la nature semble ne plus pouvoir être admis sans conteste<sup>70</sup>.

- les probabilités des événements peuvent être déduits de la fonction  $\Psi$  qui est relative à une onde de probabilité :

Les ondes sont des ondes de probabilité. Ce ne sont pas, à vrai dire, les probabilités elles-mêmes, mais certaines « amplitudes de probabilité » qui se propagent continûment et satisfont à des équations différentielles ou intégrales, comme dans la physique du continu classique. Mais à côté de cela il y a des discontinuités, des corpuscules, dont la fréquence est réglée par le carré de ces amplitudes<sup>71</sup>.

- les inégalités de Heisenberg fixent une limite à la connaissance due à l'indétermination :

la vérification du nouveau système de concepts dans ce sens consiste dans la fixation des limites dans lesquelles est permise l'application des termes et concepts anciens (classiques), tels que « lieu, vitesse, : impulsion, énergie d'une particule (électrons) » (Heisenberg). Or, on trouve que toutes ces grandeurs, prises séparément, peuvent être mesurées et définies avec précision, comme dans la théorie classique, mais que quand on veut mesurer simultanément des grandeurs canoniquement conjuguées (plus généralement : des grandeurs dont les opérateurs ne sont pas permutables) on ne peut pas descendre au-dessous d'une limite d'indétermination caractéristique<sup>72</sup>.

Notons par contre qu'il n'est pas fait référence dans l'exposé au fait que, selon l'interprétation de Copenhague, la fonction d'onde  $\Psi$  subit un effondrement lors d'une mesure. Cependant l'intervention de Born mentionne plusieurs fois « la notion de "réduction du paquet de probabilité" développée par Heisenberg »<sup>73</sup>.

C'est une théorie conquérante, qui n'admet pas d'autre concurrente, que présentent Born et Heisenberg :

nous tenons la mécanique des quanta pour une théorie complète, dont les hypothèses fondamentales physiques et mathématiques ne sont plus susceptibles de modification. Des suppositions au sujet de la signification physique des grandeurs de la mécanique quantique, qui seraient en contradiction avec les postulats de Jordan ou d'autres équivalents, seraient aussi, à notre avis, en contradiction avec les faits expérimentaux. [...] Dans la question de la « validité de la loi de causalité » notre opinion est celle-ci : [...] notre hypothèse fondamentale de l'indéterminisme essentiel est d'accord avec l'expérience. Le développement ultérieur de la théorie du rayonnement ne changera rien à cet état de choses<sup>74</sup>.

Ainsi, selon eux, la description par la fonction d'onde  $\Psi$  est complète et cette théorie se présente comme immuable et la seule valable.

## F.2.2 Article de Bohr joint aux actes du congrès

### C'est le cas aussi de l'article de Bohr joint aux actes du congrès

Le texte de Bohr qui expose son point de vue relativement aux problèmes de la théorie des quanta (I. SOLVAY 1928, pp. 215-247), reprend les mêmes fondements pour la nouvelle théorie : discontinuités, inégalités de Heisenberg et indétermination.

Un caractère de la théorie des quanta, c'est qu'elle reconnaît une limitation fondamentale des notions physiques, quand celles-ci sont appliquées aux phénomènes atomiques. [...] Ce postulat a pour conséquence le renoncement à la description causale des phénomènes atomiques dans le temps et dans l'espace. En réalité, notre description des phénomènes naturels repose en définitive sur la supposition que

70. I. SOLVAY 1928, p. 144-145 et 160, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

71. I. SOLVAY 1928, p. 165, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

72. I. SOLVAY 1928, pp. 168-170, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

73. I. SOLVAY 1928, pp. 250-253, intervention de Max Born lors de la discussion générale.

74. I. SOLVAY 1928, p. 178, dans l'intervention de Max Born et Werner Heisenberg.

les phénomènes en question peuvent être observés sans que, par là, on les influence sensiblement. [...] Mais le postulat des quanta exprime précisément que chaque observation de phénomènes atomiques exige une action réciproque, pas du tout négligeable, entre l'objet observé et l'instrument de mesure, de sorte que l'on ne peut attribuer ni aux phénomènes, ni aux moyens d'observation une réalité physique indépendante dans le sens ordinaire<sup>75</sup>.

Mais **Bohr** ajoute deux points d'interprétation absents de l'exposé de **Born** et **Heisenberg** :

— le principe de correspondance :

on pourrait arriver à une concordance formelle avec les représentations classiques dans les cas limites où la différence relative des propriétés d'états voisins disparaît asymptotiquement et où dans des applications statistiques, les discontinuités peuvent être négligées.[...] Les efforts faits pour voir dans la théorie des quanta une généralisation logique des théories classiques conduisirent à l'établissement de ce qu'on appelle le principe de correspondance<sup>76</sup>.

— la complémentarité :

nous nous trouvons donc, aussi longtemps que nous nous en tenons aux notions classiques, dans la question de la nature de la matière aussi devant un inévitable dilemme [entre onde et particule]. En réalité, il ne s'agit pas ici de conceptions contradictoires des phénomènes, mais de conceptions complémentaires, qui ne fournissent que par leur combinaison une généralisation naturelle du mode de description classique<sup>77</sup>.

**Bohr** insiste beaucoup sur la complémentarité qui est proposée comme un remède à toutes les difficultés d'interprétation :

Nous nous trouvons ici, en effet, sur la voie, suivie par Einstein, de l'adaptation de nos formes d'intuition, empruntées aux impressions sensorielles, à la connaissance de plus en plus approfondie des lois de la nature. Les obstacles que nous rencontrons dans cette voie proviennent avant tout du fait que pour ainsi dire chaque terme de notre langage est lié à ces formes de représentation. Dans la théorie des quanta, cette difficulté se présente immédiatement dans la question de l'impossibilité d'éviter le caractère d'irrationalité qui est inhérent au postulat des quanta. Mais j'espère que la notion de complémentarité conviendra pour caractériser l'état de choses actuel, qui montre une profonde analogie avec les difficultés générales de la formation des notions humaines, basées sur la séparation de sujet et d'objet<sup>78</sup>.

## F.2.3 Positions défendues par les partisans de l'interprétation de Copenhague lors des différentes discussions

**Les positions défendues par les partisans de l'interprétation de Copenhague lors des différentes discussions montrent un « front commun »**

Les seules dissensions entre les membres de l'école de Copenhague qui apparaissent dans le rapport opposent **Heisenberg** et **Dirac** sur le processus de mesure :

Je ne suis pas d'accord avec M. Dirac quand il dit que dans l'expérience décrite la nature fait un choix. [...] Evidemment, nous disons que ce choix de la nature ne peut jamais être connu avant que l'expérience décisive ait été faite ; pour cette raison, nous ne pouvons faire aucune objection réelle à ce choix, parce que l'expression « la nature fait un choix » n'implique alors aucune constatation physique. Je dirais

75. I. SOLVAY 1928, pp. 215-216, dans l'intervention de Niels Bohr.

76. I. SOLVAY 1928, p. 229, dans l'intervention de Niels Bohr.

77. I. SOLVAY 1928, p. 218, dans l'intervention de Niels Bohr.

78. I. SOLVAY 1928, p. 247, dans l'intervention Niels Bohr.

plutôt, comme je l'ai fait dans mon dernier mémoire, que l'observateur lui-même fait le choix, parce que ce n'est qu'au moment où l'observation est faite que le « choix » est devenu une réalité physique<sup>79</sup>.

Notons que le désaccord porte sur un problème métaphysique qui entoure l'effondrement du paquet d'onde (qu'est-ce qui le déclenche ?), Dirac comme Heisenberg étant d'accord sur le fait que, parmi tous les possibles, une seule possibilité ne se réalise et que son choix est imposé par le hasard. Comme le résume Lorentz :

Admettre la possibilité que la nature fait un choix signifie, je pense, qu'il nous est impossible de savoir d'avance comment les phénomènes se passeront dans l'avenir. C'est donc de l'indéterminisme que vous voulez ériger en principe. D'après vous, il y a des événements que nous ne pouvons prédire, alors que jusqu'ici nous avons toujours admis la possibilité de ces prédictions<sup>80</sup>.

Le reste des interventions qu'on trouve dans les actes du congrès montre un accord sans faille entre les tenants de cette vision indéterministe. Pourtant, lors des mois précédents, les relations étaient pour le moins compliquées entre Bohr et Heisenberg :

[qui] prirent soin de s'éviter pendant quelques jours avant de se rencontrer pour discuter de l'article sur le principe d'incertitude. Bohr escomptait que Heisenberg, ayant eu le temps de se calmer, entende enfin raison et récrive l'article en conséquence. Or il refusa de procéder à quelque changement que ce soit. « Bohr a essayé d'expliquer que ce n'était pas bien, et que je ne devrais pas publier l'article » dira plus tard Heisenberg. « Je me souviens que ça s'est terminé quand j'ai fondu en larmes parce que je ne pouvais carrément pas supporter cette pression de la part de Bohr »<sup>81</sup>.

L'article qui paraît en mars 1927<sup>82</sup> se termine par une note qui semble avoir scellé la réconciliation des deux hommes. Si Bohr dans les actes se réfère à Heisenberg très souvent (plus de 20 fois !)<sup>83</sup>, la raison en est certainement qu'il veut épargner la susceptibilité de son jeune collaborateur. En se citant les uns les autres à Bruxelles<sup>84</sup>, les membres de l'école de Copenhague forment donc une sorte de « front uni », proposant une vision cohérente et sans fissure, et rejetant aussi toute autre vision comme le résume Dirac :

Je voudrais maintenant faire connaître mon opinion au sujet du déterminisme et de la signification des nombres qui se présentent dans les calculs de la théorie des quanta, telle qu'elle se dessine dans mon esprit après avoir réfléchi aux remarques de M. Bohr. Dans la théorie classique, on part de certains nombres qui décrivent complètement l'état initial du système et l'on déduit d'autres nombres qui décrivent complètement l'état final. Cette théorie déterministe ne s'applique qu'à un système isolé. Or, comme M. Bohr l'a fait observer, un système isolé est, par définition, inobservable. On ne peut observer un système qu'en le troublant et en examinant sa réaction à la perturbation. Par conséquent, puisque la physique ne s'occupe que de grandeurs observables, la théorie déterministe classique est indéfendable<sup>85</sup>.

79. I. SOLVAY 1928, p. 264-265, intervention de Heisenberg pendant la discussion générale.

80. I. SOLVAY 1928, p. 265, intervention de Lorentz pendant la discussion générale.

81. KUMAR 2020, p. 344.

82. Werner HEISENBERG 1927.

83. « l'application sans contradiction de ces méthodes fut donnée récemment par Heisenberg » (p. 219); « Heisenberg a établi la relation » (p. 223); « Heisenberg se base » (p. 223); « Heisenberg fait remarquer » (p. 228); « Heisenberg dans un travail fondamental où il réussit à s'affranchir complètement » (p. 230); « Heisenberg, dans son travail déjà mentionné » (p. 232); « Heisenberg a réussi à éclaircir d'une façon très intéressante divers paradoxes » (p. 232); « ainsi que l'a montré Heisenberg » (ou des versions approchantes pp. 228, 230 236); « souvent discutées et traitées aussi par Heisenberg » (p. 241); « le point de départ des réflexions originales de Heisenberg » (p. 241); « ainsi que Heisenberg l'a exposé » (pp. 240 et 243); le « problème de la résonance, qui fut éclairci par Heisenberg » (p. 245); etc.

84. à l'image de Pauli : « Je suis tout à fait du même avis que M. Bohr [...] En résumé, je veux donc dire que la manière de voir de Bohr, d'après laquelle les propriétés des objets physiques d'être définis et descriptibles dans l'espace et dans le temps sont complémentaires, semble être plus générale qu'un moyen technique spécial » (I. SOLVAY 1928, p. 256-257, intervention de Pauli dans la discussion générale).

85. I. SOLVAY 1928, p. 261, intervention de Dirac pendant la discussion générale.

Fin 1927, il n'est absolument pas évident que la représentation du monde que proposent ces chercheurs, bien différente de la physique classique, devienne la vision « standard » ou « orthodoxe »<sup>86</sup>. De fortes oppositions se font entendre, comme nous allons le voir.

### F.3 Oppositions à l'interprétation de Copenhague

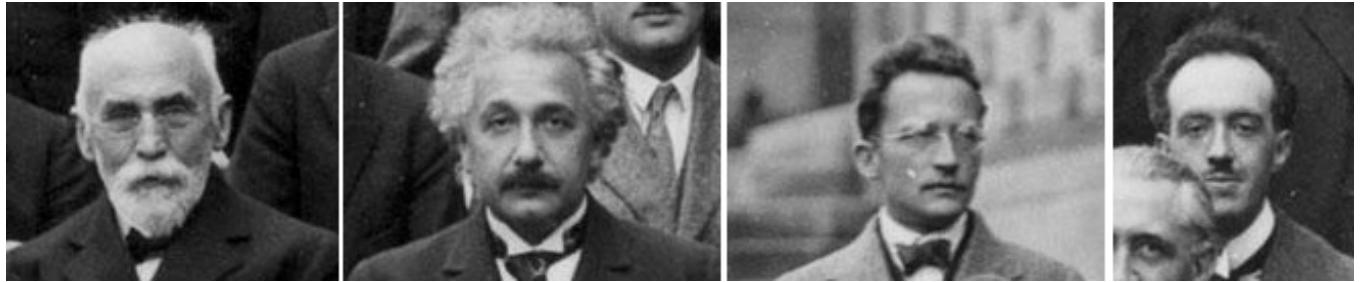


FIGURE F.6 – De gauche à droite : Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Erwin Schrödinger et Louis de Broglie, opposants à l'interprétation de Copenhague.

#### F.3.1 La mise en cause de l'interprétation de Copenhague

##### Lorentz exprime des regrets concernant l'évolution de la mécanique quantique

Lors de l'ouverture de la discussion générale, le président, Hendrik Lorentz, réaffirme ses conceptions classiques de la physique :

Nous voulons nous faire une représentation des phénomènes, nous en former une image dans notre esprit. [...] Pour moi, un électron est un corpuscule qui, à un instant donné, se trouve en un point déterminé de l'espace, et si j'ai eu l'idée qu'à un moment suivant ce corpuscule se trouve ailleurs, je dois songer à sa trajectoire, qui est une ligne dans l'espace. [...] Il se peut, évidemment, que cette théorie soit bien difficile à développer, mais a priori cela ne me paraît pas impossible. Je me figure que, dans la nouvelle théorie, on a encore de ces électrons. [...] Il me semble qu'on peut toujours espérer qu'on fera plus tard ce que nous ne pouvons pas encore faire en ce moment. Même si l'on abandonne les anciennes idées, on peut toujours conserver les anciennes dénominations. Je voudrais conserver cet idéal d'autrefois, de décrire tout ce qui se passe dans le monde par des images nettes. Je suis prêt à admettre d'autres théories, à condition qu'on puisse les traduire par des images claires et nettes<sup>87</sup>.

Lorentz s'interroge, après l'exposé de Born et Heisenberg, à propos du formalisme de la mécanique des matrices, qui deviendra la mécanique quantique :

On me dit que par toutes ces considérations on est parvenu à former des matrices qui représentent ce que l'on peut observer dans l'atome, par exemple les fréquences des radiations émises. Toutefois,

86. « Le conclusioni di Bohr sul significato della meccanica quantistica erano così provocatorie che *Nature* fece seguire all'articolo un commento in cui gli editor esprimevano il desiderio che tale articolo non rappresentasse l'ultima parola sulla meccanica quantistica, perché le concezioni lì presentate sembravano non poter essere "espresse in un linguaggio figurato". Probabilmente il comitato editoriale di *Nature* sperava che il principio di causalità sarebbe stato riabilitato e che si sarebbe potuto determinare quando una particella è una particella e quando un'onda è un'onda » (SEGRÈ 2011, p. 157).

87. I. SOLVAY 1928, pp. 248-249, intervention de Lorentz pendant la discussion générale.



la circonstance que les coordonnées, l'énergie potentielle, etc., sont maintenant représentées par des matrices, indique que ces grandeurs ont perdu leur sens initial et qu'on a fait un pas énorme dans la voie de l'abstraction<sup>88</sup>.

Il faut bien reconnaître que [Lorentz](#) ne montre aucune inadéquation de la mécanique quantique naissante avec la réalité des faits observés. Il fait seulement état de regrets : il aurait bien aimé que la nouvelle physique ressemble à l'ancienne. Cela n'a pas dû émouvoir les jeunes chercheurs du groupe de Copenhague.

### Einstein propose une expérience de pensée pour montrer l'incomplétude de la mécanique quantique

Contrairement à [Lorentz](#), [Einstein](#) développe un argumentaire qui tend à montrer que la mécanique quantique aboutit à une contradiction. En effet, lors de la discussion générale, il intervient (I. SOLVAY 1928, pp. 253-256, intervention d'Einstein dans la discussion générale) lors d'un court exposé pour présenter une expérience de pensée :

Soit S un écran dans lequel on a pratiqué une petite ouverture O [figure F.7], et soit P une pellicule photographique en forme de demi-sphère de grand rayon. Supposons que des électrons tombent sur S dans la direction des flèches. Une partie de ces électrons passe par O : à cause de la petitesse de l'ouverture et de la vitesse des particules, ils se répartissent uniformément sur toutes les directions et vont agir sur la pellicule<sup>89</sup>.

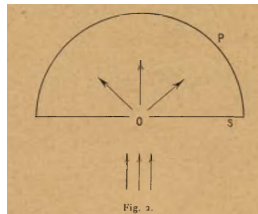


FIGURE F.7 – La figure associée au raisonnement d'[Einstein](#)<sup>90</sup>.

[Einstein](#) compare et oppose deux points de vue sur la nature de la fonction d'onde  $\Psi$ . D'après la conception I,  $\Psi$  représente un ensemble – c'est une vision statistique – ou un « nuage » – c'est la vision de [Schrödinger](#) – d'électrons ; tandis que selon la conception II (celle de l'interprétation de Copenhague),  $\Psi$  est une description complète d'un électron individuel. [Einstein](#) soutient que la conception II est incompatible avec la localité :

D'après la deuxième [conception],  $|\Psi|^2$  exprime la probabilité qu'à un instant considéré la même particule se trouve à un endroit déterminé (de l'écran par exemple). [...] Mais [cela] suppose un mécanisme d'action à distance tout particulier, qui empêche que l'onde continûment répartie dans l'espace produise une action en deux endroits de l'écran<sup>91</sup>.

L'argument d'[Einstein](#) en 1927<sup>92</sup> est le premier élément d'une succession d'expériences de pensée qui

88. I. SOLVAY 1928, p. 183, intervention de Lorentz dans la discussion générale.

89. I. SOLVAY 1928, p. 254, intervention d'Einstein dans la discussion générale.

90. I. SOLVAY 1928, p. 255, intervention d'Einstein dans la discussion générale.

91. [de Broglie](#) reviendra en 1956 sur l'objection d'[Einstein](#) (L. d. BROGLIE 1956b, pp. 72-74). Un peu plus tard (en 1959), il interprètera les objections d'[Einstein](#) non pas par le rejet de l'indéterminisme mais par le rejet de la non-localité (L. d. BROGLIE 1959, p. 964).

aboutiront au paradoxe EPR en 1935<sup>93</sup>. L'idée est dans tous les cas identique : le rejet de toute action à distance (ou dit autrement la conviction que la physique *doit* être locale) aboutit à une contradiction avec l'interprétation de Copenhague.

Mais si, comme le pense Einstein, la mécanique quantique proposée par l'école de Copenhague est effectivement mise en défaut, il faut que ses détracteurs proposent une alternative.

### F.3.2 Une première théorie alternative, la mécanique ondulatoire, défendue lors de l'exposé de Schrödinger

#### La mécanique ondulatoire de Schrödinger se heurte au problème de l'interprétation du paquet d'onde en terme de particules

[Schrödinger](#) explique dans son exposé le sens qu'il donne à la fonction d'onde :

le système réel est une image composite du système classique dans tous ses états possibles, obtenue en employant  $\Psi\Psi^*$  comme "fonction de poids". Les systèmes auxquels on applique la théorie se composent classiquement d'un grand nombre de points matériels chargés. Ainsi que nous venons de le voir, la charge de chacun de ces points est distribuée d'une façon continue à travers l'espace et chaque point à charge  $e$  fournit à la charge dans l'élément de volume tridimensionnel  $dx dy dz$  la contribution  $e \int d\tau$ <sup>94</sup>.

Il s'agit autrement dit de considérer une particule chargée (l'électron par exemple) à l'instar de ce que l'on fait en électromagnétisme classique lorsque l'on s'intéresse à une densité volumique de charge  $\rho$ . L'onde de fonction  $\Psi$  devient donc pour [Schrödinger](#) en quelque sorte « un nuage d'électrons étendu dans l'espace » selon l'expression d'Einstein<sup>95</sup>.

Si les tenants de l'interprétation de Copenhague [Born](#) et [Heisenberg](#) rejettent la théorie de [Schrödinger](#) lors de leur exposé sans vraiment développer :

son idée [celle de Schrödinger], que ces ondes constituent l'essence même de la matière, que les particules ne sont que des paquets d'ondes, n'est pas seulement en contradiction avec les principes de la théorie de Bohr, si bien fondée, mais elle conduit aussi à des conséquences impossibles ; c'est pourquoi nous n'en parlerons pas ici<sup>96</sup>.

ainsi que [Bohr](#) dans son texte :

On ne peut construire, au moyen de vibrations [...], un groupe d'ondes pouvant représenter, même approximativement, le « mouvement » d'une particule<sup>97</sup>.

[Lorentz](#) aussi lors de la discussion générale critique l'interprétation de [Schrödinger](#) :

Le paquet d'ondes donnait de l'électron une image bien saisissante, mais dans l'atome l'électron devait être entièrement fondu. [...] Mais il y a aussi une difficulté pour les électrons libres, parce qu'en réalité un paquet d'ondes ne conserve pas, en général, sa forme d'une façon durable. Des paquets d'ondes

93. « A huge literature arose out of the famous « EPR » paper by Einstein, Podolsky and Rosen (1935), entitled « Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? ». The EPR paper argued, on the basis of (among other things) the absence of action at a distance, that quantum theory must be incomplete. It is less well-known that a much simpler argument, leading to the same conclusion, was presented by [Einstein](#) eight years earlier in the general discussion at the fifth Solvay conference. [...] Thus, according to this reasoning, if one assumes locality, then quantum theory (as normally understood today) is incomplete. The conclusion of Einstein's argument in 1927 is the same as that of EPR in 1935, even if the form of the argument is rather different » (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, p. 194).

94. I. SOLVAY 1928, p. 192, intervention de Schrödinger.

95. I. SOLVAY 1928, p. 254, intervention d'Einstein dans la discussion générale.

96. I. SOLVAY 1928, p. 164, intervention de Born et Heisenberg.

97. I. SOLVAY 1928, p. 237, intervention de Niels Bohr.

limités ne semblent pas pouvoir se conserver ; il se produit une diffusion. L'image de l'électron donnée par un paquet d'ondes n'est donc pas satisfaisante, sauf peut-être pendant un temps assez court <sup>98</sup>.

### Le problème de l'interprétation de l'onde se pose aussi s'il y a plusieurs particules, la fonction d'onde étant définie dans l'espace de configurations

D'autre part, dans son exposé, Erwin [Schrödinger](#) articule son propos sur le passage de sa théorie traitant une particule (dans ce cas la fonction d'onde  $\Psi(x, y, z, t)$  est alors un champ – classique – dépendant de l'espace et du temps) à plusieurs ( $n$ ) particules. Dans ce dernier cas, la fonction est définie sur un espace plus complexe, « l'espace de configurations » qui dépend des coordonnées de chacune des particules dans l'espace réel, et du temps :  $\Psi(x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n, t)$ .

On développe actuellement sous ce nom, l'une à côté de l'autre, deux théories qui sont, il est vrai, étroitement liées, mais ne sont pas cependant identiques. Dans l'une, qui se rattache directement aux importantes thèses de M. [de Broglie](#), il s'agit d'ondes dans l'espace à trois dimensions. [...] L'autre théorie s'écarte davantage des idées originales de M. [de Broglie](#), en ce sens qu'elle prend comme base un phénomène ondulatoire dans l'espace des coordonnées de situation. [...] C'est pourquoi nous l'appellerons la mécanique ondulatoire polydimensionnelle <sup>99</sup>.

[Heisenberg](#) doute du caractère explicatif de cette théorie lors de la discussion :

M. [Schrödinger](#) dit à la fin de son rapport que les considérations qu'il a faites confirment l'espoir que quand nos connaissances se seront approfondies il sera possible d'expliquer et de comprendre en trois dimensions les résultats fournis par la théorie polydimensionnelle. Je ne vois rien dans les calculs de M. [Schrödinger](#) qui justifie cet espoir <sup>100</sup>.

Dit autrement : puisque même la mécanique ondulatoire ne fournit pas de cadre interprétatif général, il convient de s'en passer.

Et c'est justement ce qui gêne Louis [de Broglie](#) :

[Cette] théorie [...] nie la localisation permanente des corpuscules dans l'espace physique, elle envisage cependant l'espace abstrait formé par la réunion des coordonnées des divers corpuscules du système. Or quelle idée intelligible peut-on se faire des coordonnées d'un corpuscule qui n'est pas localisé dans l'espace physique ? D'autre part, il apparaît comme peu admissible que le mouvement d'un système de corpuscules ne puisse être décrit que dans le cadre, visiblement abstrait et fictif, de l'espace de configuration et en puisse pas être représenté dans l'espace physique réel à trois dimensions <sup>101</sup>.

Einstein, entre autres pour les mêmes raisons que [de Broglie](#), refuse l'espace de configuration :

il me semble que des objections de principe s'opposent à cette représentation polydimensionnelle. Dans cette représentation, en effet, deux configurations d'un système, qui ne se distinguent que par la permutation de deux particules de même espèce, sont figurées par deux points différents (de l'espace de configuration), ce qui n'est pas d'accord avec les nouveaux résultats de la statistique <sup>102</sup>.

[Einstein](#) ne soutient pas [Schrödinger](#) parce qu'il ne le considère pas convaincu du caractère déterministe de la physique ni de la causalité <sup>103</sup>.

98. I. SOLVAY 1928, p. 287, intervention de Lorentz dans la discussion générale.

99. I. SOLVAY 1928, p. 185, intervention de Schrödinger.

100. I. SOLVAY 1928, p. 211, intervention de Heisenberg dans la discussion qui suit l'exposé de Schrödinger.

101. L. d. BROGLIE 1959, p. 968.

102. I. SOLVAY 1928, p. 256, intervention d'Einstein dans la discussion générale.

103. « Les schrödingeries ne m'inspirent guère de sympathie. Ce n'est pas causal, et puis c'est carrément primitif » (EINSTEIN 1989, p. 206, lettre du 11 janvier 1927 à Ehrenfest).

D'après les actes du Conseil, [Einstein](#) comme [de Broglie](#) restent muets lors de la discussion de l'exposé de Schrödinger. Ce dernier fait face, seul, aux critiques venues de l'école de Copenhague. Il semble ainsi que, pour la plupart des opposants à la mécanique quantique qui se met en place, la mécanique ondulatoire proposée par [Schrödinger](#) ne soit pas une théorie alternative satisfaisante.

### F.3.3 Une seconde théorie alternative, celle de l'onde pilote, proposée lors de l'exposé de de Broglie

#### Louis de Broglie présente une version simplifiée de la théorie qu'il veut construire

Louis [de Broglie](#) est en 1927 un chercheur français sans lien avec les grands laboratoires de Copenhague et Göttingen <sup>104</sup> en train de chercher une théorie quantique qu'il nomme la « théorie de la double solution ». Cette théorie n'est pas aboutie pour le congrès de Bruxelles, il en propose une version simplifiée appelée « théorie de l'onde pilote » dans laquelle la particule a une trajectoire en partie définie par l'onde qui, en quelque sorte, guide le corpuscule :

nous avons considéré les corpuscules comme « extérieurs » à l'onde  $\Psi$ , leur mouvement étant seul déterminé par la propagation de l'onde. Ce n'est là, sans doute, qu'un point de vue provisoire <sup>105</sup>.

La dernière phrase montre que la théorie de l'onde pilote ne le convainc pas totalement. [de Broglie](#) reviendra en 1956 sur son exposé de 1927 au Congrès Solvay :

Chargé de présenter un rapport sur la Mécanique ondulatoire devant le Conseil Solvay qui devait se réunir à Bruxelles en octobre 1927, je reculai devant la difficulté de justifier mathématiquement le point de vue de la double solution et je me contentai d'exposer dans mon rapport le point de vue de l'onde-pilote. Au Conseil Solvay, tandis que quelques « anciens » ([Lorentz](#), [Einstein](#), [Langevin](#), [Schrödinger](#)) maintenaient la nécessité de rechercher une interprétation causale de la Mécanique ondulatoire sans cependant se prononcer sur ma tentative, MM. [Bohr](#) et [Born](#) ainsi que leurs jeunes disciples (MM. [Heisenberg](#), [Dirac](#), etc.) se prononçaient catégoriquement en faveur de la nouvelle interprétation purement probabiliste qu'ils venaient de développer et ne discutaient même pas mon point de vue. C'est M. [Pauli](#) qui fit la seule objection précise à ma théorie <sup>106</sup>.

#### La proposition de de Broglie de l'onde pilote est peu soutenue

Effectivement, Léon [Brillouin](#) est un des rares à, si ce n'est soutenir, du moins protéger Louis de Broglie et sa théorie de l'onde pilote contre les attaques qui lui sont adressées <sup>107</sup>. De son côté, Einstein, pendant la discussion générale où il présente son expérience de pensée que nous avons exposée plus haut, conclut après avoir proposé son paradoxe :

à mon avis, on ne peut lever cette objection que de cette façon-ci, qu'on ne décrit pas seulement le processus par l'onde de Schrödinger, mais qu'en même temps on localise la particule pendant la propagation. Je pense que M. [de Broglie](#) a raison de chercher dans cette direction <sup>108</sup>.

104. Cf. la thèse de Vila-Valls ([VILA-VALLS 2012](#), pp. 63-64 en particulier pour [de Broglie](#) en 1927) pour plus d'informations sur Louis [de Broglie](#).

105. I. SOLVAY 1928, p. 122.

106. L. d. BROGLIE 1956b, p. 169.

107. [VILA-VALLS 2012](#), p. 178.

108. I. SOLVAY 1928, pp. 255-256, intervention d'Einstein dans la discussion générale.

Einstein attend donc que la mécanique quantique soit complétée par des « variables cachées » (en l'occurrence la localisation de la particule). Aussi la théorie que propose de Broglie semble satisfaire ses attentes<sup>109</sup>. On peut alors se demander pourquoi Einstein apporte un appui si limité à la théorie de l'onde pilote<sup>110</sup>. Mon hypothèse, c'est qu'Einstein est conscient dès 1927 que cette théorie à variables cachées est justement non locale, ce qu'il rejette absolument<sup>111</sup>. Quant à Schrödinger, on ne trouve pas trace dans le rapport de commentaire de sa part sur la proposition théorique de Louis de Broglie<sup>112</sup>, peut-être parce que « Schrödinger n'a jamais donné son adhésion au programme de recherche sur les "variables cachées" »<sup>113</sup>.

Si la trajectoire des particules peut paraître à Einstein une nécessité, elle ne présente pas d'attraits à ceux qui, comme Kramers, pensent que la description de l'état du système est complète avec la fonction d'onde :

Je ne vois pas bien, pour ma part, l'avantage qu'il y a, pour la description des expériences, à se faire une image où les photons parcourent des trajectoires bien définies<sup>114</sup>.

Les partisans de l'interprétation de Copenhague ne voient donc pas d'intérêt à une représentation imagée de la réalité.

Quoi qu'il en soit « Louis de Broglie a pu mesurer à quel point il était isolé dans ses tentatives lors du Conseil Solvay de 1927. Il ne reçut un soutien que très timide de la part d'Einstein, et sa présentation ne reçut que très peu de commentaires de la part des autres physiciens pourtant réticents vis-à-vis de l'interprétation entièrement probabiliste qui était présentée par les physiciens de Copenhague- Göttingen »<sup>115</sup>.

### Pauli présente un argument qui stoppe la théorie de l'onde pilote en 1927... jusqu'en 1952

Mais ce qui empêche véritablement l'adoption de la théorie proposée par de Broglie, c'est l'intervention de Pauli<sup>116</sup> qui accuse l'onde pilote d'être incohérente avec les observations :

Il me semble que la conception de M. de Broglie, en ce qui concerne les résultats statistiques de l'expérience de choc, est bien d'accord, avec la théorie de Born dans le cas de chocs élastiques, mais qu'il n'en est plus ainsi lorsque l'on considère aussi des chocs non élastiques<sup>117</sup>.

Esseulé<sup>118</sup>, ne trouvant pas de réponse à objecter à Pauli, pas vraiment convaincu par sa propre théorie, de Broglie abandonne l'onde pilote :

Au Conseil Solvay d'octobre 1927, mon exposé sur l'onde-pilote trouva peu d'audience. M. Pauli fit à mes conceptions de sérieuses objections auxquelles j'entrevois une réponse possible, mais sans

109. Ce qui est confirmé par sa proposition en 1928 pour le Prix Nobel : « Je propose [pour le Prix Nobel], sur un pied d'égalité, les théoriciens Heisenberg et Schrödinger (un prix Nobel partagé pour 1930 ?). En ce qui concerne leur réussite, chacun de ces chercheurs mérite un prix Nobel à lui seul, bien que leurs théories coïncident en gros en ce qui concerne le lien à la réalité. Cependant, à mon avis, de Broglie devrait avoir la préséance, en particulier parce que [son] idée est certainement correcte, alors qu'il me semble encore aujourd'hui problématique de savoir ce qui restera finalement des théories grandioses des deux derniers chercheurs précédemment cités » (PAIS 1982, p. 515, lettre d'Einstein au comité Nobel, ma traduction).

110. Einstein « m'encourageait dans la voie où je m'étais engagé, mais sans cependant approuver nettement ma tentative » (L. d. BROGLIE 1952, p. 301).

111. Je n'ai trouvé aucun document qui vienne étayer cette supposition.

112. « M. Schrödinger, ne croyant pas à l'existence des corpuscules ne pouvait me suivre » (L. d. BROGLIE 1952, p. 301).

113. SCHRÖDINGER 1951, p. 154, note n°39 de Michel Bitbol.

114. I. SOLVAY 1928, p. 266, intervention de Kramers dans la discussion générale.

115. VILA-VALLS 2012, pp. 187-188.

116. VILA-VALLS 2012, p. 187.

117. I. SOLVAY 1928, p. 280, intervention de Pauli dans la discussion générale.

118. « En continuant ses tentatives, Louis de Broglie prenait le risque de se marginaliser complètement dans la communauté des théoriciens quantistes à une période où il ne faisait que débiter sa carrière scientifique. de Broglie reconnut lui-même également que son nouveau métier d'enseignant lui laissait moins le loisir de continuer sur cette voie, en raison du fait qu'il ne pouvait pas se permettre de présenter à ses étudiants des ébauches de théories » (VILA-VALLS 2012, pp. 187-188).

pouvoir la préciser entièrement. [...] Je revins à Paris très troublé par ces discussions et, en méditant sur ce sujet, j'arrivai à la conviction que, pour la raison que j'ai exposée plus haut et quelques autres encore, la théorie de l'onde pilote était intenable. N'osant pas en revenir à la double solution à cause de ses difficultés mathématiques, je me décourageai et me ralliai à l'interprétation purement probabiliste de [Bohr](#) et Heisenberg. Depuis vingt-cinq ans, je l'ai adoptée comme base de mon enseignement, et exposée dans mes livres et mes conférences <sup>119</sup>.

[de Broglie](#) revient en 1956 (L. d. BROGLIE 1956b, pp. 168-179) sur l'objection de Pauli :

La situation en était là, à peu près stabilisée depuis un quart de siècle, quand a paru, il y a quelques mois, l'article de M. Bohm (David BOHM 1952) [qui reprend] la théorie de l'onde pilote que j'avais exposée au Conseil Solvay. [...] En dehors du mérite d'avoir ramené l'attention sur ces questions, M. Bohm a eu aussi celui de faire un certain nombre de remarques intéressantes et, en particulier, de faire une analyse des processus de mesure envisagés du point de vue de l'onde-pilote qui paraît permettre d'écarter les objections opposées à mes idées par M. [Pauli](#) en 1927 <sup>120</sup>.

## Conclusion

Ainsi, l'abandon de la théorie de l'onde pilote par son seul défenseur ([de Broglie](#)) revenait à ne pas offrir d'alternative à l'interprétation de Copenhague. Cette dernière triomphe donc en 1927 <sup>121</sup>, et avec elle c'est toute une génération de chercheurs qui émerge. Si [Schrödinger](#) avait pris avant le Conseil la succession de Max [Planck](#) à la Friedrich-Wilhelms-Universität à Berlin, les – très – jeunes du groupe de Copenhague à Bruxelles se voient offrir des postes prestigieux dans les plus grandes universités : [Heisenberg](#) est nommé professeur à l'université de Leipzig (et directeur de l'institut de physique théorique), [Pauli](#) à Zurich, [Dirac](#) au St. John's College de Cambridge (puis il sera membre de la Royal Society avant d'occuper la chaire de Cambridge créée par Newton) <sup>122</sup>. Convertis à l'interprétation de Copenhague, Léon [Brillouin](#) obtient la chaire de théories physiques à la faculté des sciences de l'université de Paris, et Louis [de Broglie](#) se voit confier, pendant un an, la responsabilité d'un cours libre dans cette même Sorbonne <sup>123</sup>.

Les succès phénoménaux de la mécanique quantique depuis 1927 ont relégué au second plan les problèmes relatifs aux fondements théoriques et à l'interprétation qu'on peut en avoir. Certes [Schrödinger](#) (avec le fameux chat, en 1935) et [Einstein](#) (en particulier avec le paradoxe EPR – en 1935 aussi) continueront après le 5<sup>e</sup> Conseil Solvay d'interpeller la communauté scientifique sur certains aspects qui leur semblent problématiques. Mais les développements de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle <sup>124</sup> montrent d'une

119. L. d. BROGLIE 1952, p. 301.

120. L. d. BROGLIE 1952, p. 305.

121. « This period begins in 1927, when the Solvay Council is closed with wide agreement with the complementarity interpretation, elaborated by Niels Bohr; and it goes up to the end of the 1940s. At that time, in spite of the disputes around 1927 and the ongoing opposition of [Schrödinger](#) (1935) and [Einstein](#) (1935), the ambiance was marked by the large adhesion to complementarity interpretation » (FREIRE 2003, p. 575).

122. SEGRÈ 2011, p. 156.

123. « Il est difficile d'éviter la conclusion que la stature de [de Broglie](#) en tant que contributeur majeur à la théorie quantique a indûment souffert du fait que, pendant la majeure partie du XX<sup>e</sup> siècle, la théorie proposée qu'il a proposée a été considérée à tort comme intenable ou incompatible avec l'expérience. Indépendamment du fait que la théorie des ondes pilotes de [de Broglie](#) soit plus proche de la vérité que d'autres interprétations, le fait qu'il s'agisse d'une approche cohérente et viable de la physique quantique – qui n'a pas de problème de mesure, qui montre que l'objectivité et le déterminisme ne sont pas incompatibles avec physique quantique, et qui a poussé [Bell](#) à développer ses fameuses inégalités – implique nécessairement une réévaluation de la place de [de Broglie](#) dans l'histoire de la physique du XX<sup>e</sup> siècle » (BACCIAGALUPPI et VALENTINI 2009, pp. 86-87).

124. La théorie de l'onde pilote actualisée par Bohm (1952), les inégalités de [Bell](#) (1966) et les différents tests expérimentaux de ces dernières en particulier.

part que l'argument d'[Einstein](#) (fondé sur la localité) contre la mécanique quantique est réfuté par l'expérience, et d'autre part qu'une formulation causale à variables cachées (non locale) telle que la théorie de l'onde pilote est possible, qui donne les mêmes prédictions que la mécanique quantique « orthodoxe ».

Ainsi, il existe – au moins ! – deux mécaniques quantiques possibles : celle qui est enseignée souvent comme l'unique théorie quantique (l'interprétation de Copenhague) et la théorie de l'onde pilote. L'existence de plusieurs théories quantiques incohérentes entre elles (du point de vue de leurs principes, des concepts qui les fondent et de leurs interprétations philosophiques diamétralement opposées) et pourtant tout-à-fait équivalentes en ce qui concerne leurs prédictions scientifiques est un exemple frappant de sous-détermination des théories par les observations expérimentales.

Si une théorie a éclipsé l'autre lors de la cinquième conférence Solvay, ce n'est pas dû uniquement à des raisons scientifiques. On peut effectivement se demander, dans une approche contrefactuelle interrogeant la contingence historique, ce qui se serait passé si [Einstein](#) et [Schrödinger](#) avaient soutenu [de Broglie](#) et si, dans le même temps, [Bohr](#), [Born](#) et [Heisenberg](#) avaient été désunis.

-





# **Bibliographie**



# Références bibliographiques classées par auteur puis par date

- AHARONOV, Yakir et Lev VAIDMAN (1996). « About Position Measurements Which Do Not Show the Bohmian Particle Position ». In : CUSHING, James T., Arthur FINE et Sheldon GOLDSTEIN. *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*. Kluwer Academic Publishers. T. 184. BOSTON STUDIES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., p. 141-154. ISBN : 978-90-481-4698-7.
- ANDRADE E SILVA, Joao Luis (1998). « Les savants et le courage ». In : *Louis de Broglie tel que nous l'avons connu*. Fondation Louis de Broglie. CNAM, p. 1-11.
- ASLANGUL, Claude (2016). *Mécanique quantique : cours*. ISSN : 1783-7227. De Boeck supérieur : Louvain-la-Neuve Belgique, Belgique. xxviii+715. ISBN : 978-2-8073-0295-2.
- ASPECT, Alain (2010). « Fascinante mécanique quantique ». In : DARS, Jean-Francois et Anne PAPILLAULT. *Le plus grand des hasards Surprises quantiques*. Regards Sur La Science. Belin, p. 130-135.
- ASPECT, Alain, Jean DALIBARD et Gérard ROGER (20 déc. 1982). « Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers ». In : *Physical Review Letters* 49(25). Publisher : American Physical Society, p. 1804-1807. DOI : [10.1103/PhysRevLett.49.1804](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.49.1804> (visité le 22/11/2020).
- AUFFÈVES, Alexia (5 oct. 2016). « Libérons le chat de Schrödinger ! » In : *Pour la Science* dossier 93.
- BACCIAGALUPPI, Guido (2020). « The Role of Decoherence in Quantum Mechanics ». In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Sous la dir. d'Edward N. ZALTA. Fall 2020. Metaphysics Research Lab, Stanford University. URL : <https://plato.stanford.edu/archives/fall2020/entries/qm-decoherence/> (visité le 09/10/2020).
- BACCIAGALUPPI, Guido et Antony VALENTINI (24 oct. 2009). *Quantum Theory at the Crossroads : Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge University Press. arXiv : [quant-ph/0609184](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0609184). URL : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0609184> (visité le 23/05/2020).
- BÄCHTOLD, Manuel (24 mar. 2009). *L'interprétation de la mécanique quantique : Une approche pragmatiste*. Vision des sciences. Hermann : Paris. ISBN : 978-2-7056-6834-1. URL : [https://www.researchgate.net/publication/278757630\\_L%27interpretation\\_de\\_la\\_mecanique\\_quantique\\_une\\_approche\\_pragmatiste](https://www.researchgate.net/publication/278757630_L%27interpretation_de_la_mecanique_quantique_une_approche_pragmatiste).
- BAILLY, Sean (29 oct. 2015). *Lintrication quantique confirmée par une expérience de Bell sans faille*. Pour la Science. Publisher : Pour la Science. URL : <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/lintrication-quantique-confirmee-par-une-experience-de-bell-sans-faille-12185.php> (visité le 13/04/2021).
- BALIBAR, Françoise et al. (12 mar. 2007). *Quantique : Éléments*. URL : <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00136189> (visité le 03/02/2021).

- BALIBAR, Sébastien (2010). « Voir et comprendre ». In : DARS, Jean-Francois et Anne PAPILLAULT. *Le plus grand des hasards Surprises quantiques*. Regards Sur La Science. Belin, p. 83-85.
- BASDEVANT, Jean-Louis (2010). *Le principe de moindre action et les principes variationnels en physique*. Vuibert : Paris.
- BASDEVANT, Jean-Louis, Jean DALIBARD et Manuel JOFFRE (2002). *Mécanique quantique*. Les éditions de l'École polytechnique : Palaiseau, France. 524 p. ISBN : 978-2-7302-0914-4.
- BECKER, Adam (20 mar. 2018). *What Is Real ? : The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics*. Basic Books : New York. 384 p. ISBN : 978-0-465-09605-3.
- BELL, J. S. (1976). « The measurement theory of Everett and de Broglie's pilot wave ». In : *Quantum mechanics, determinism, causality and particles : an international collection of contributions in honor of Louis de Broglie on the occasion of the jubilee of his celebrated thesis*. Sous la dir. de Moshé FLATO et al. ISSN : 0165-2419. Dordrecht, Pays-Bas, Etats-Unis d'Amérique, p. 11-17. ISBN : 978-90-277-0623-2.
- BELL, John S. (1964). « On the Einstein Podolsky Rosen Paradox ». In : *Physics*( 1), p. 195-200.
- BELL, John S. (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics : Collected Papers on Quantum Philosophy*. Cambridge University Press.
- BENSAUDE VINCENT, Bernadette (1985). « L'évolution de la complémentarité dans les textes de Bohr (1927-1939) ». In : *Revue d'histoire des sciences* 38(3). Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 231-250. DOI : [10.3406/rhs.1985.4006](https://doi.org/10.3406/rhs.1985.4006). URL : [https://www.persee.fr/doc/rhs\\_0151-4105\\_1985\\_num\\_38\\_3\\_4006](https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1985_num_38_3_4006) (visité le 08/12/2020).
- BENSAUDE-VINCENT, Bernadette (1985). « France, un accueil difficile ». In : DELIGEORGES, Stéphane Directeur de publication. *Le monde quantique*. ISSN : 0337-8160. Éditions du Seuil : Sciences & avenir : Paris, France, p. 67-80. ISBN : 978-2-02-008908-1.
- BERGÉ, Pierre, Christian VIDAL et Yves POMEAU (1997). *L'ordre dans le chaos : Vers une approche déterministe de la turbulence*. Hermann. 352 p. ISBN : 978-2-7056-5980-6. (Visité le 12/09/2020).
- BESSON, Virgile (18 jan. 2012). *Les premiers travaux de Jean-Pierre Vigié sur la théorie des quanta : une rencontre entre science et marxisme (1951-1954)*. Mémoire de Master 2 HPDS-Lyon 1.
- BESSON, Virgile (15 fév. 2018). « L'interprétation causale de la mécanique quantique : biographie d'un programme de recherche minoritaire (1951-1964) ». These de doctorat. Lyon. URL : <http://www.theses.fr/2018LYSE1014> (visité le 30/08/2020).
- BLIOKH, Konstantin Y. et al. (juil. 2013). « Photon trajectories, anomalous velocities and weak measurements : a classical interpretation ». In : *New Journal of Physics* 15(7). Publisher : IOP Publishing, p. 073022. ISSN : 1367-2630. DOI : [10.1088/1367-2630/15/7/073022](https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/7/073022). URL : <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/7/073022>.
- BOHM, D. et Y. AHARONOV (15 nov. 1957). « Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky ». In : *Physical Review* 108(4). Publisher : American Physical Society, p. 1070-1076. DOI : [10.1103/PhysRev.108.1070](https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1070). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.108.1070> (visité le 25/11/2020).
- BOHM, David (1952). « A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. (part I et part II) ». In : *Physical Review* 85(2), p. 166-193. URL : <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.060406>.
- BOHM, David, B. J. HILEY et P. N. KALOYEROU (1987). « An Ontological Basis for the Quantum Theory. 1. Nonrelativistic Particle Systems. 2. A Causal Interpretation of Quantum Fields ». In : *Phys.Rept.* 144, p. 323-375. DOI : [10.1016/0370-1573\(87\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0370-1573(87)90024-X). URL : <https://inspirehep.net/literature/246069> (visité le 06/12/2020).

- BOHR, Niels (1949). « Niels Bohr's report of conversations with Einstein and Einstein's reply ». In : *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*. Cambridge University Press. Cambridge. URL : <https://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/dk/bohr.htm> (visité le 19/04/2021).
- BORN, M., W. HEISENBERG et P. JORDAN (1<sup>er</sup> août 1926). « Zur Quantenmechanik. II. » In : *Zeitschrift für Physik* 35(8), p. 557-615. ISSN : 0044-3328. DOI : [10.1007/BF01379806](https://doi.org/10.1007/BF01379806). URL : <https://doi.org/10.1007/BF01379806> (visité le 19/04/2021).
- BORN, M. et P. JORDAN (1<sup>er</sup> déc. 1925). « Zur Quantenmechanik ». In : *Zeitschrift für Physik* 34(1), p. 858-888. ISSN : 0044-3328. DOI : [10.1007/BF01328531](https://doi.org/10.1007/BF01328531). URL : <https://doi.org/10.1007/BF01328531> (visité le 19/04/2021).
- BORN, Max (1955). « L'interprétation statistique de la mécanique quantique - (Conférence Nobel, 1954.) » Trad. par E. BAUER. In : *J. Phys. Radium* 16(10), p. 737-743. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00235259> (visité le 29/12/2020).
- BORN, Max (1959). « Dans quelle mesure la mécanique classique peut-elle prédire les trajectoires ? » In : *J. Phys. Radium* 20(1), p. 43-50. DOI : [10.1051/jphysrad:0195900200104300](https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00235987). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00235987> (visité le 16/04/2021).
- BOUCHENE, Aziz (20 fév. 2017). « Le problème de l'interprétation et de la mesure en mécanique quantique. Apport de la théorie de Bohm. » IRSAMC. URL : <http://www.irsamc.ups-tlse.fr/spip.php?article1331> (visité le 22/08/2020).
- BRICMONT, Jean (2001). « La non-localité et la théorie de Bohm ». In : ESPAGNAT, Bernard d'. *Implications philosophiques de la science contemporaine*. Académie des Sciences Morales et Politiques. URL : <https://academisciencismoralesetpolitiques.fr/2001/02/20/implications-philosophiques-de-la-science-contemporaine/> (visité le 18/08/2020).
- BRICMONT, Jean (2007). « La mécanique quantique pour non-physicien ». URL : [www.mathematik.uni-muenchen.de/~bohmmech/BohmHome/files/2007\\_bricmont-mq1new.pdf](http://www.mathematik.uni-muenchen.de/~bohmmech/BohmHome/files/2007_bricmont-mq1new.pdf) (visité le 21/07/2020).
- BRICMONT, Jean (2020). *Comprendre la physique quantique*. Odile Jacob : Paris, France. 319 p. ISBN : 978-2-7381-4964-0.
- BRILLOUIN, Marcel (24 nov. 1918). *Lettre de Marcel Brillouin à Ernest Solvay*. Letter. URL : <http://www.thesolvayscienceproject.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/863#?c=0&m=0&s=0&cv=0> (visité le 20/04/2021).
- BROGLIE, Louis de (25 nov. 1924). « Recherches sur la théorie des Quanta ». Thèse de doct. Migration - université en cours d'affectation. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006807> (visité le 13/07/2020).
- BROGLIE, Louis de (juin 1927). « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement ». In : *J. Phys. Radium* 8(5), p. 225-241. DOI : [10.1051/jphysrad:0192700805022500](https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00205292). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00205292> (visité le 13/07/2020).
- BROGLIE, Louis de (1929). *Conférence Nobel*. URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/broglie/lecture/> (visité le 17/04/2021).
- BROGLIE, Louis de (1937). *Matière et lumière*. ISSN : 0246-5558. Albin Michel : Paris (22, rue Huyghens), France. x+342.
- BROGLIE, Louis de (1939). « LA THÉORIE QUANTIQUE DU RAYONNEMENT ». In : *Revue de Métaphysique et de Morale* 46(2). Publisher : Presses Universitaires de France, p. 199-210. ISSN : 0035-1571. URL : <https://www.jstor.org/stable/40898315> (visité le 14/07/2021).
- BROGLIE, Louis de (1947). *Physique et microphysique*. ISSN : 0246-5558. Albin Michel : Paris, France. 370; 8.

- BROGLIE, Louis de (1949). « L'enseignement de la physique ». In : *Recherches d'un demi-siècle*. ISSN : 0246-5558. A. Michel : Paris, France, p. 29-39. ISBN : 978-2-226-00292-1.
- BROGLIE, Louis de (1951). « Remarques sur la théorie de l'onde pilote ». In : *Comptes rendus de l'Académie des sciences.*( 233), p. 641-644.
- BROGLIE, Louis de (1952). « La physique quantique restera-t-elle indéterministe ? » In : *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* 5(4), p. 289-311. DOI : <https://doi.org/10.3406/rhs.1952.2967>. URL : [www.persee.fr/doc/rhs\\_0048-7996\\_1952\\_num\\_5\\_4\\_2967](http://www.persee.fr/doc/rhs_0048-7996_1952_num_5_4_2967).
- BROGLIE, Louis de (29 mar. 1953a). *Lettre à David Bohm*. Letter. URL : <https://www.christies.com/en/lot/lot-6296880>.
- BROGLIE, Louis de (1953b). « Vue d'ensemble sur mes travaux scientifiques ». In : *Louis de Broglie : physicien et penseur*. Sous la dir. d'André GEORGE. ISSN : 0755-1827. Albin Michel : Paris, France, p. 457-486.
- BROGLIE, Louis de (16 oct. 1954). « Conférence faite au Palais de la découverte ». In : TONNELAT, Marie-Antoinette. *Louis de Broglie et la mécanique ondulatoire*. Savants du monde entier / 33. Seghers : Paris.
- BROGLIE, Louis de (5 déc. 1955). *Le dualisme des ondes et des corpuscules dans l'oeuvre de Albert Einstein*. éloge funèbre. Lecture lors de la séance du 5 décembre 1955 : Académie des Sciences. URL : [https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Einstein/Einstein\\_oeuvre.htm](https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Einstein/Einstein_oeuvre.htm).
- BROGLIE, Louis de (26 fév. 1956a). « Conférence faite au Conservatoire des arts et métiers ». In : TONNELAT, Marie-Antoinette. *Louis de Broglie et la mécanique ondulatoire*. Savants du monde entier / 33. Seghers : Paris.
- BROGLIE, Louis de (1956b). *Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire : la théorie de la double solution*. Library Catalog : cds.cern.ch Publisher : Gauthier-Villars. Gauthier-Villars : Paris. 297 p. URL : <https://cds.cern.ch/record/224852> (visité le 04/08/2020).
- BROGLIE, Louis de (1959). « L'interprétation de la mécanique ondulatoire ». In : *J. Phys. Radium* 20(12), p. 963-979. DOI : [10.1051/jphysrad:019590020012096300](https://doi.org/10.1051/jphysrad:019590020012096300). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00236174> (visité le 10/03/2021).
- BROGLIE, Louis de (1968a). « Quelques vues personnelles sur l'évolution de la physique ». In : *Recherches d'un demi-siècle*. ISSN : 0246-5558. A. Michel : Paris, France, p. 49-55. ISBN : 978-2-226-00292-1.
- BROGLIE, Louis de (1968b). « Thermodynamique relativiste et mécanique ondulatoire ». In : *Annales de l'I.H.P. Physique théorique* 2(9), p. 89-108. URL : [http://www.numdam.org/item/AIHPA\\_1968\\_\\_9\\_2/](http://www.numdam.org/item/AIHPA_1968__9_2/) (visité le 14/07/2021).
- BROGLIE, Louis de (1970). « Rôle essentiel de la science fondamentale ». In : *Recherches d'un demi-siècle*. ISSN : 0246-5558. A. Michel : Paris, France, p. 371-373. ISBN : 978-2-226-00292-1.
- BROGLIE, Louis de (1972). « Allocution prononcée par Louis de Broglie lors de la célébration de son 80e anniversaire ». In : *Recherches d'un demi-siècle*. ISSN : 0246-5558. A. Michel : Paris, France, p. 56-62. ISBN : 978-2-226-00292-1.
- BROGLIE, Louis de (1973a). « Étude du mouvement des particules dans un milieu réfringent ». In : *Recherches d'un demi-siècle*. ISSN : 0246-5558. A. Michel : Paris, France, p. 259-270. ISBN : 978-2-226-00292-1.
- BROGLIE, Louis de (1973b). « Sur les véritables idées de base de la mécanique ondulatoire ». In : *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. 2(277), p. 71-73. URL : [https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Broglie/Broglie\\_pdf/CR1973\\_p71.pdf](https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Broglie/Broglie_pdf/CR1973_p71.pdf) (visité le 13/07/2020).
- BROGLIE, Louis de (1974). « Exposé pour la télévision ». In : *Recherches d'un demi-siècle*. ISSN : 0246-5558. A. Michel : Paris, France, p. 91-95. ISBN : 978-2-226-00292-1.

- BROGLIE, Louis de (1975). « Il n'y a que les visionnaires qui créent ». In : *Recherches d'un demi-siècle*. ISSN : 0246-5558. A. Michel : Paris, France, p. 384-385. ISBN : 978-2-226-00292-1.
- BROGLIE, Maurice de (31 mai 1945). *Réponse au discours de réception de Louis de Broglie à l'Académie française*. URL : <https://www.academie-francaise.fr/reponse-au-discours-de-reception-de-louis-de-broglie> (visité le 02/07/2021).
- BROGLIE, Maurice de (1951). *Les premiers congrès de physique solvay et l'orientation de la physique depuis 1911*. Albin Michel.
- CHEVALLEY, Catherine (1985). « Complémentarité et langage dans l'interprétation de Copenhague ». In : *Revue d'histoire des sciences* 38(3). Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 251-292. DOI : [10.3406/rhs.1985.4007](https://doi.org/10.3406/rhs.1985.4007). URL : [https://www.persee.fr/doc/rhs\\_0151-4105\\_1985\\_num\\_38\\_3\\_4007](https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1985_num_38_3_4007) (visité le 29/11/2020).
- COHEN-TANNOUDJI, Claude (2010). « Images physiques, concepts quantiques ». In : DARS, Jean-Francois et Anne PAPILLAULT. *Le plus grand des hasards Surprises quantiques*. Regards Sur La Science. Belin, p. 92-97.
- COHEN-TANNOUDJI, Claude, Franck LALOË et Bernard DIU (2018). *Mécanique Quantique - Nouvelle édition*. EDP sciences. Physique - savoirs actuels. CNRS éditions. ISBN : 2-7598-2287-7. (Visité le 08/11/2020).
- COLIJN, C. et E. R. VRSCAY (25 avr. 2003). « Spin-dependent Bohm trajectories associated with an electronic transition in hydrogen ». In : *Journal of Physics A : Mathematical and General* 36(16), p. 4689-4702. ISSN : 0305-4470, 1361-6447. DOI : [10.1088/0305-4470/36/16/317](https://doi.org/10.1088/0305-4470/36/16/317). arXiv : [quant-ph/0304203](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0304203). URL : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0304203> (visité le 13/03/2021).
- COMPTON, Arthur H. (1927). *Conférence Nobel*. URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/compton/lecture/> (visité le 17/04/2021).
- COMTET, Alain (2009). « Champs et particules : deux figures du continu et du discret dans les théories physiques ». In : *Intellectica* 51(1). Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 243-258. DOI : [10.3406/intel.2009.1739](https://doi.org/10.3406/intel.2009.1739). URL : [https://www.persee.fr/doc/intel\\_0769-4113\\_2009\\_num\\_51\\_1\\_1739](https://www.persee.fr/doc/intel_0769-4113_2009_num_51_1_1739) (visité le 05/04/2021).
- COPPENS, Nicolas (1<sup>er</sup> jan. 2007). « Le suivi des conceptions des lycéens en mécanique : développement et usages d'exercices informatisés ». These de doctorat. Paris 7. URL : <https://www.theses.fr/2007PA077142> (visité le 16/04/2021).
- COUPRIE, Benjamin (oct. 1927). *Photographie des participants au 5ième Congrès Solvay de 1927 - Institut International de Physique Solvay, Bruxelles*. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Solvay\\_conference\\_1927\\_Version2.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Solvay_conference_1927_Version2.jpg) (visité le 18/04/2021).
- CUSHING, James T. (1996). « The Causal Quantum Theory Program ». In : CUSHING, James T., Arthur FINE et Sheldon GOLDSTEIN. *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*. Kluwer Academic Publishers. T. 184. BOSTON STUDIES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., p. 1-20. ISBN : 978-90-481-4698-7.
- DALIBAR, Jean (2010). « Les lapins de Schrödinger ». In : DARS, Jean-Francois et Anne PAPILLAULT. *Le plus grand des hasards Surprises quantiques*. Regards Sur La Science. Belin, p. 98-101.
- DARRIGOL, Olivier (1985). « La complémentarité comme argument d'autorité (1927-1934) ». In : *Revue d'histoire des sciences* 38(3). Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 309-323. DOI : [10.3406/rhs.1985.4009](https://doi.org/10.3406/rhs.1985.4009). URL : [https://www.persee.fr/doc/rhs\\_0151-4105\\_1985\\_num\\_38\\_3\\_4009](https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1985_num_38_3_4009) (visité le 30/12/2020).
- DAUDEL, Raymond (1998). « Louis de Broglie, mon maître ». In : *Louis de Broglie tel que nous l'avons connu*. Fondation Louis de Broglie. CNAM, p. 53-55.

- DE GREGORIO, Alberto (fév. 2014). « Bohr's way to defining complementarity ». In : *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 45, p. 72-82. ISSN : 13552198. DOI : [10.1016/j.shpsb.2013.10.002](https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2013.10.002). arXiv : [1212.6481](https://arxiv.org/abs/1212.6481). URL : <http://arxiv.org/abs/1212.6481> (visité le 17/04/2021).
- DIMARCQ, Noël (2010). « Capteurs d'espace-temps ». In : DARS, Jean-Francois et Anne PAPILLAULT. *Le plus grand des hasards Surprises quantiques*. Regards Sur La Science. Belin, p. 76-79.
- DIRAC, Paul A. M. (1930). *The principles of quantum mechanics*. ISSN : 0950-5563. Clarendon Press : Oxford, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord. x+258.
- DIRAC, Paul A. M. (1933). *Conférence Nobel*. URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/dirac/lecture/> (visité le 17/04/2021).
- DIU, Bernard (2009). *Le congrès Solvay de 1927 : petite chronique d'un grand événement*. Bibnum Education. URL : <http://journals.openedition.org/%20bibnum/846>.
- DREZET, Aurélien et Benjamin STOCK (28 fév. 2021). « A causal and continuous interpretation of the quantum theory : About an original manuscript by David Bohm sent to Louis de Broglie in 1951 ». In : *arXiv :2103.00576 [physics, physics :quant-ph]*. arXiv : [2103.00576](https://arxiv.org/abs/2103.00576). URL : <http://arxiv.org/abs/2103.00576> (visité le 17/06/2021).
- DUPLESSIS, Pascal (12 sept. 2008). « Les conceptions des élèves au centre de la didactique de l'information ? » In : 12ème Séminaire du GRCDI Contextes et enjeux de la culture informationnelle, approches et questions de la didactique de linformation. Rennes, p. 17. URL : [https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/sic\\_01468722](https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/sic_01468722).
- DÜRR, Detlef, Sheldon GOLDSTEIN et Nino ZANGHÌ (29 déc. 1995). « Bohmian Mechanics and the Meaning of the Wave Function ». In : *arXiv :quant-ph/9512031*. arXiv : [quant-ph/9512031](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9512031). URL : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9512031> (visité le 06/12/2020).
- DÜRR, Detlef, Sheldon GOLDSTEIN et Nino ZANGHÌ' (1996). « Bohmian Mechanics as the Foundation of Quantum Mechanics ». In : CUSHING, James T., Arthur FINE et Sheldon GOLDSTEIN. *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*. Kluwer Academic Publishers. T. 184. BOSTON STUDIES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., p. 21-44. ISBN : 978-90-481-4698-7.
- EHRENFEST, Paul (avr. 1921). « Le principe de correspondance ». In : *Rapport du troisième congrès Solvay "Atomes et Électrons"*. Sous la dir. de L. ROSENFELD et J. Rud NIELSEN. T. 3. Elsevier, p. 248-254. DOI : [10.1016/S1876-0503\(08\)70097-5](https://doi.org/10.1016/S1876-0503(08)70097-5). (Visité le 05/04/2021).
- EHRENFEST, Paul (3 nov. 1927). *lettre de P. Ehrenfest à S. Goudsmit, G. Uhlenbeck et G. Dieke traduite par Rémy Lambrechts*. Text. Library Catalog : [www.bibnum.education.fr](http://www.bibnum.education.fr). URL : <http://www.bibnum.education.fr/physique/physique-quantique/le-congres-solvay-de-1927-petite-chronique-d-un-grand-evenement> (visité le 25/06/2020).
- EINSTEIN, Albert (1905). « Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt ». In : *Annalen der Physik* 322(6), p. 132-148. ISSN : 0003-3804. DOI : [10.1002/andp.19053220607](https://doi.org/10.1002/andp.19053220607). URL : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1905AnP...322..132E/abstract> (visité le 19/04/2021).
- EINSTEIN, Albert (1989). *Oeuvres choisies : mécanique statistique et physique quantique*. Sous la dir. de Françoise BALIBAR et al. ISSN : 1144-6676. Éditions du Seuil : Éditions du CNRS : Paris, France. 270 p. ISBN : 978-2-02-010027-4.
- ENGLERT, Berthold-Georg et al. (1992). « Surrealistic bohm trajectories ». In : *Zeitschrift für Naturforschung A* 47(12). Publisher : De Gruyter, p. 1175-1186.
- FERRARI, Jérôme (juin 2018). « Péripiétés quantiques ». In : *Clef CEA*( 66), p. 2.



- FEYNMAN, Richard Phillips et al. (2018). *Le cours de physique de Feynman*. Sous la dir. de F. MULLER et Julien LEROY. Dunod : Paris, France. xxii+533. ISBN : 978-2-10-079057-9.
- FLACK, R. et B. J. HILEY (2014). « Weak measurement and its experimental realisation ». In : *Journal of Physics : Conference Series* 504. DOI : [10.1088/1742-6596/504/1/012016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/504/1/012016). URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/504/1/012016> (visité le 21/02/2021).
- FREEDMAN, Stuart J. et John F. CLAUSER (1972). « Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories ». In : *Phys. Rev. Lett.* 28, p. 938-941. URL : <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.28.938> (visité le 22/11/2020).
- FREIRE, Olival (1<sup>er</sup> août 2003). « A Story Without an Ending : The Quantum Physics Controversy 1950-1970 ». In : *Science et Education* 12(5), p. 573-586. ISSN : 1573-1901. DOI : [10.1023/A:1025317927440](https://doi.org/10.1023/A:1025317927440). URL : <https://doi.org/10.1023/A:1025317927440> (visité le 22/07/2020).
- GENNES, Pierre-Gilles de (1998). « Deux souvenirs d'étudiant ». In : *Louis de Broglie tel que nous l'avons connu*. Fondation Louis de Broglie. CNAM, p. 73.
- GEORGE, André, éd. (1953). *Louis de Broglie : physicien et penseur*. ISSN : 0755-1827. Albin Michel : Paris, France. xi+497.
- GERMAIN, Paul (7 déc. 1987). « Louis de Broglie ou la passion de la "vraie" physique ». In : *Louis de Broglie tel que nous l'avons connu*. Fondation Louis de Broglie. URL : [http://www.ordiecole.com/broglie\\_eloge.pdf](http://www.ordiecole.com/broglie_eloge.pdf).
- GERNERT, Dieter (1<sup>er</sup> jan. 2007). « Du rasoir d'Ockham et de son usage inadéquat ». In : *traduit de : J. of Scientific Exploration* 21, p. 135-140. URL : [https://www.researchgate.net/publication/202774909\\_Du\\_rasoir\\_d%27Ockham\\_et\\_de\\_son\\_usage\\_inadequat](https://www.researchgate.net/publication/202774909_Du_rasoir_d%27Ockham_et_de_son_usage_inadequat).
- GIORDAN, André (mar. 1996). « Les conceptions de l'apprenant : Un tremplin pour l'apprentissage. » In : *Sciences humaines* Hors série(12), p. 48-50. URL : <https://www.andregiordan.com/articles/apprendre/concepttapp.html> (visité le 03/05/2021).
- GOLDSTEIN, Sheldon (2017). *Bohmian Mechanics*. In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Sous la dir. d'Edward N. ZALTA. Summer 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. URL : <https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/qm-bohm/> (visité le 22/07/2020).
- GONDRAN, Alexandre et Michel GONDRAN (25 août 2015). *Interprétation de l'expérience des fentes de Young*. Comment comprendre la mécanique quantique ? URL : <https://thequantumphysics.wordpress.com/interpretation-de-l'experience-des-fentes-de-young/> (visité le 11/10/2020).
- GONDRAN, Michel et Alexandre GONDRAN (2014). *Mécanique quantique*. Cairndomain : www.cairn.info ISSN : 2275-9948. Éditions Matériologiques. ISBN : 978-2-919694-68-6. DOI : [10.3917/edmat.gondr.2014.01](https://doi.org/10.3917/edmat.gondr.2014.01). URL : <https://www.cairn.info/mecanique-quantique--9782919694686.htm> (visité le 01/08/2021).
- GONDRAN, Michel, Alexandre GONDRAN et Camille NOÛS (2021). « The Two-Scale Interpretation : de Broglie and Schrödingers External and Internal Wave Functions ». In : *Annales de la Fondation Louis de Broglie*. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02435248> (visité le 06/05/2021).
- GRATIAS, Denis (2010). « Le soupirant ». In : DARS, Jean-Francois et Anne PAPILLAULT. *Le plus grand des hasards Surprises quantiques*. Regards Sur La Science. Belin, p. 157-159.
- HARDY, Lucien (1996). « Contextuality in bohmian mechanics ». In : CUSHING, James T., Arthur FINE et Sheldon GOLDSTEIN. *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*. Kluwer Academic Publishers. T. 184. BOSTON STUDIES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SPRINGER-SCIENCE - BUSINESS MEDIA, B.V., p. 67-76. ISBN : 978-90-481-4698-7.

- HAROCHE, Serge, Jean-Michel RAIMOND et Michel BRUNE (sept. 1997). « Le chat de schrödinger se prête à l'expérience ». In : *La Recherche* (31). URL : <https://www.larecherche.fr/le-chat-de-schr%C3%B6dinger-se-pr%C3%AAt-e-%C3%A0-lexp%C3%A9rience> (visité le 11/03/2021).
- HECHT, Eugene, Tamer BECHERRAWY et Joël MARTIN (1999). *Physique*. Paris, Belgique, France. xxiv+1304. ISBN : 978-2-7445-0018-3.
- HEISENBERG, Werner (sept. 1925). « Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen ». In : *Zeitschrift für Physik* 33, p. 879-893. URL : [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%9Cber\\_quantentheoretische\\_Umdeutung\\_kinematischer\\_und\\_mechanischer\\_Beziehungen&oldid=982402937](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%9Cber_quantentheoretische_Umdeutung_kinematischer_und_mechanischer_Beziehungen&oldid=982402937) (visité le 29/12/2020).
- HEISENBERG, Werner (1<sup>er</sup> mar. 1927). « Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik ». In : *Zeitschrift für Physik* 43(3), p. 172-198. ISSN : 0044-3328. DOI : 10.1007/BF01397280. URL : <https://doi.org/10.1007/BF01397280> (visité le 03/02/2021).
- HEISENBERG, Werner (1<sup>er</sup> juin 1929). « Die Entwicklung der Quantentheorie 1918-1928 ». In : *Naturwissenschaften* 17(26), p. 490-496. ISSN : 1432-1904. DOI : 10.1007/BF01505682. URL : <https://doi.org/10.1007/BF01505682> (visité le 20/04/2021).
- HEISENBERG, Werner (1932). *Conférence Nobel*. URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1932/heisenberg/lecture/> (visité le 17/04/2021).
- HEISENBERG, Werner (1967). « Quantum theory and its interpretation ». In : *Niels Bohr; His Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues*. North-Holland Publishing Company.
- HEISENBERG, Werner (1969). *La partie et le tout. Le monde de la physique atomique - Souvenirs 1920-1965*. Flammarion. Champs - sciences. Flammarion 2016. 432 p. (Visité le 29/11/2020).
- HEISENBERG, Werner (1989). *Physics & philosophy : the revolution in modern science*. Penguin : London, England, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord. 201 p. ISBN : 978-0-14-022859-5.
- HENSEN, B. et al. (oct. 2015). « Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres ». In : *Nature* 526(7575). Number : 7575 Publisher : Nature Publishing Group, p. 682-686. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/nature15759. URL : <https://www.nature.com/articles/nature15759> (visité le 22/11/2020).
- HILEY, Basil J. et Peter VAN REETH (2018). « Quantum Trajectories : Real or Surreal? » In : *Entropy* 20(5). Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 353. DOI : 10.3390/e20050353. URL : <https://www.mdpi.com/1099-4300/20/5/353> (visité le 26/08/2020).
- HOLLAND, Peter (1993). *The Quantum Theory of Motion : An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge University Press. URL : <https://doi.org/10.1017/CB09780511622687> (visité le 05/08/2020).
- HOLLAND, Peter (1996). « IS QUANTUM MECHANICS UNIVERSAL? » In : CUSHING, James T., Arthur FINE et Sheldon GOLDSTEIN. *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*. Kluwer Academic Publishers. T. 184. BOSTON STUDIES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SPRINGER-SCIENCE - BUSINESS MEDIA, B.V., p. 99-109. ISBN : 978-90-481-4698-7.
- HOWARD, Don (1<sup>er</sup> déc. 2004). « Who Invented the "Copenhagen Interpretation" ? A Study in Mythology ». In : *Philosophy of Science* 71, p. 669-682. DOI : 10.1086/425941.
- INCONNU (12 jan. 1929). *Lettre à Ch. Lefébure accusant réception du volume Electrons et photons*. URL : <https://bibnum.explore.psl.eu/s/psl/ark:/18469/1w5b> (visité le 20/04/2021).
- KOCSIS, Sacha (2011). « Observing the Average Trajectories of Single Photons in a Two-Slit Interferometer ». In : *Science* 332(6034), p. 1179-1173.
- KUHN, Thomas S. (1970). *La structure des révolutions scientifiques*. Champs. Flammarion. (Visité le 01/05/2020).

- KUMAR, Manjit (2020). *Le grand roman de la physique quantique : Einstein, Bohr... et le débat sur la nature de la réalité*. Trad. par Bernard SIGAUD. ISSN : 2427-1616. Flammarion : Paris, France. 633 p. ISBN : 978-2-08-151272-6.
- LALOË, Franck (2011). *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* CNRS éditions. URL : <https://www.amazon.fr/Comprenons-nous-vraiment-m%C3%A9canique-quantique-Franck/dp/2759806219> (visité le 22/07/2020).
- LALOË, Franck (2014). « Séance V. La théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie et David Bohm et Séance VI. La théorie de l'onde pilote : problèmes et difficultés ». In : ESPAGNAT, Bernard d' et Hervé ZWIRN. *Le monde quantique - Les débats philosophiques de la physique quantique - Sous la direction de Bernard d'Espagnat, Hervé Zwirn*. Sciences et philosophie. ISSN : 2275-9948 Pages : 211-260 Publication Title : Le monde quantique. Editions Matériologiques, 211 à 298. ISBN : 978-2-919694-58-7.
- LANGMUIR, Irving (oct. 1927). *Film amateur des participants au 5eme Congrès Solvay de 1927 lors d'une pause - Bruxelles*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=8GZdZUouzBY> (visité le 17/04/2021).
- LANGMUIR, Irving (1932). *Conférence Nobel*. URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1932/langmuir/lecture/> (visité le 17/04/2021).
- LAPLACE, Pierre Simon marquis de (1814). *Essai philosophique sur les probabilités*. Google-Books-ID : rDUJAAAIAAJ. Mme. Ve. Courcier. 132 p.
- LAUTESSE, Philippe, Lionel CHAUSSARD et al. (14 mar. 2019). « « A la recherche du réel perdu » ou la pertinence de l'utilisation d'une bande dessinée dans l'enseignement de la mécanique quantique en Licence. » In : *Tréma*( 51). ISBN : 9791096627073 Number : 51 Publisher : Faculté d'Education de l'Université de Montpellier. ISSN : 1167-315X. DOI : 10.4000/trema.5138. URL : <http://journals.openedition.org/trema/5138> (visité le 07/05/2021).
- LAUTESSE, Philippe, Adrien VILA VALLS et al. (mar. 2014). « Enseigner la physique quantique en Terminale scientifique en France. L'objet quantique, une référence problématique ». In : *8ème rencontres scientifiques de l'Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies*. T. 18. Issue : 1. ESPE - Université Aix-Marseille : Marseille, France, p. 323. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00971372> (visité le 07/12/2020).
- LE BELLAC, Michel (2010). *Le monde quantique*. ISSN : 2108-5978. EDP sciences : Les Ulis, France. 227 p. ISBN : 978-2-7598-0443-6.
- LEAVENS, C. Richard (1996). « THE "TUNNELING-TIME PROBLEM" FOR ELECTRONS ». In : CUSHING, James T., Arthur FINE et Sheldon GOLDSTEIN. *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*. Kluwer Academic Publishers. T. 184. BOSTON STUDIES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., p. 111-129. ISBN : 978-90-481-4698-7.
- LÉVY-LEBLOND, Jean-Marc (1988). « Neither waves, nor particles, but quantons ». In : *Nature*( 334), p. 6177. URL : <https://www.nature.com/articles/334019c0> (visité le 07/12/2020).
- LÉVY-LEBLOND, Jean-Marc et Françoise BALIBAR (1984). *Quantique : rudiments*. InterÉditions : Centre national de la recherche scientifique : Paris, France. xvii+494. ISBN : 978-2-7296-0046-4.
- LÉVY-LEBLOND, Jean-Marc et Françoise BALIBAR (1<sup>er</sup> avr. 1998). « Answer to Question "When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle?" » In : *American Journal of Physics* 66(4). Publisher : American Association of Physics Teachers, p. 279-280. ISSN : 0002-9505. DOI : 10.1119/1.18874. URL : <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.18874> (visité le 11/11/2020).
- LOCHAK, Georges (1992). *Louis de Broglie : un prince de la science*. Figures de la science. Flammarion : Paris. 264 p. ISBN : 978-2-08-211553-7 et 2-082-11553-4.

- LORENTZ, Hendrik (4 jan. 1912). *Lettre d'Hendrik Lorentz à Ernest Solvay*. Letter. URL : <http://www.thesolvayscienceproject.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/759#?c=0&m=0&s=0&cv=0> (visité le 20/04/2021).
- LORENTZ, Hendrik (3 avr. 1926). *Lettre d'Hendrik Lorentz à Charles Lefébure*. Letter. URL : <http://www.thesolvayscienceproject.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/421#?c=0&m=0&s=0&cv=0> (visité le 20/04/2021).
- LORENZ, Edward N. (29 déc. 1972). « Predictability : Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set off a Tornado in Texas ? » conférence à l'American Association for the Advancement of Science pour le Programme de recherche sur l'atmosphère globale, lors de la 139e réunion de l'Association américaine pour l'avancement de la science. Washington.
- LOUJOZ, Louis (2017). *Multivers et réalité humaine*. Editions du Moindre. ISBN : 978-2-9548279-0-2. URL : <https://www.amazon.fr/Multivers-r%C3%A9alit%C3%A9-humaine-Louis-Loujoz/dp/2954827904> (visité le 09/08/2020).
- MADLUNG, E. (1927). « Quantum Theory in Hydrodynamical Form ». In : *Zeit. f. Phys.* 40, p. 322. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01504657> (visité le 27/08/2020).
- MARCHILDON, Louis (2019). « La réalité face à la théorie quantique ». In : *Metascience* 1, p. 271-292. URL : <https://philpapers.org/rec/MARLRF-4>.
- MARTIN-ROBINE, Florence (17 avr. 2006). *Histoire du principe de moindre action : Trois siècles de principes variationnels de Fermat à Feynman*. Vuibert : Paris. 226 p. ISBN : 978-2-7117-7151-6.
- MATHIEU D'ESCAUDOEUVRES, Georges (1998). « Le "treffliche" Louis de Broglie ». In : *Louis de Broglie tel que nous l'avons connu*. Fondation Louis de Broglie. CNAM, p. 139-147.
- MEHRA, Jagdish et Helmut RECHENBERG (2000). *The historical development of quantum theory / Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg. - New York : Springer-Verlag, c1982-<c1987 >. - ISBN 0-387-90642-8. The completion of quantum mechanics, 1926-1941*. Publication Title : The historical development of quantum theory. Springer : New York, Etats-Unis d'Amérique. xv+670. ISBN : 978-0-387-95181-2.
- MERMIN, N. David (sept. 1998). « What is quantum mechanics trying to tell us ? » In : *American Journal of Physics* 66(9), p. 753-767. ISSN : 0002-9505, 1943-2909. DOI : [10.1119/1.18955](https://doi.org/10.1119/1.18955). arXiv : [quant-ph/9801057](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9801057). URL : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9801057> (visité le 25/11/2020).
- MERMIN, N. David (1<sup>er</sup> mai 2004). « Could Feynman Have Said This ? » In : *Physics Today* 57(5). Publisher : American Institute of Physics, p. 10-11. ISSN : 0031-9228. DOI : [10.1063/1.1768652](https://doi.org/10.1063/1.1768652). URL : <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.1768652> (visité le 07/05/2021).
- MERMIN, N. David (4 jan. 2008). « Is the Moon There When Nobody Looks ? Reality and the Quantum Theory ». In : *Physics Today* 38(4). Publisher : American Institute of Physics AIP, p. 38. ISSN : 0031-9228. DOI : [10.1063/1.880968](https://doi.org/10.1063/1.880968). URL : <https://physicstoday.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.880968> (visité le 11/03/2021).
- MESSIAH, Albert (1969). *Mécanique quantique*. Dunod : Paris. URL : <https://www.dunod.com/sciences-techniques/mecanique-quantique-0> (visité le 08/11/2020).
- MEYER, Claude (15 nov. 2001). « Les représentations mentales. Entre « res » et « flatus vocis » ». In : *Communication. Information médias théories pratiques* (vol. 21/1). ISBN : 9782895180913 Number : vol. 21/1 Publisher : Editions Nota bene, p. 9-31. ISSN : 1189-3788. DOI : [10.4000/communication.5445](https://doi.org/10.4000/communication.5445). URL : <http://journals.openedition.org/communication/5445> (visité le 03/05/2021).
- MOSSERI, Rémy (1999). *Léon Brillouin, 1889-1969 : à la croisée des ondes*. Un savant, une époque. ISSN : 0764-5511. Belin : Paris. 255 p. ISBN : 978-2-7011-2299-1.

- NERNST, Walther (26 juil. 1910). *Lettre de Walther Nernst à Ernest Solvay*. Letter. URL : <http://www.thesolvayscienceproject.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/704#?c=0&m=0&s=0&cv=0> (visité le 20/04/2021).
- NEUMANN, John von (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Traduction anglaise de 2018 disponible à l'adresse <https://press.princeton.edu>. Traduction anglaise de 2018 disponible à l'adresse <https://press.princeton.edu>. Springer Verlag : Berlin. (Visité le 08/11/2020).
- ORIOIS, X. et Jordi MOMPART (juin 2012). « Overview of Bohmian Mechanics. Applied Bohmian Mechanics : From Nanoscale Systems to Cosmology. » In : *Applied Bohmian Mechanics : From Nanoscale Systems to Cosmology*. DOI : [10.1201/b12311](https://doi.org/10.1201/b12311). URL : [https://www.researchgate.net/publication/225273736\\_Overview\\_of\\_Bohmian\\_Mechanics/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/225273736_Overview_of_Bohmian_Mechanics/citation/download).
- PAIS, Abraham (1982). *"Subtle is the Lord..." : the science and the life of Albert Einstein*. Oxford, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Etats-Unis d'Amérique. xvi+552 ; 8. ISBN : 978-0-19-285138-3.
- PAIS, Abraham (1998). « De Broglie, Einstein and the birth of the matter wave concept ». In : *Louis de Broglie tel que nous l'avons connu*. Fondation Louis de Broglie. CNAM, p. 151-154.
- PAN, Alok (juin 2010). « Understanding the spreading of a Gaussian wave packet using the Bohmian machinery ». In : *Pramana - Journal of Physics* 74, p. 867-874. DOI : [10.1007/s12043-010-0079-7](https://doi.org/10.1007/s12043-010-0079-7). URL : [https://www.researchgate.net/publication/225494984\\_Understanding\\_the\\_spreading\\_of\\_a\\_Gaussian\\_wave\\_packet\\_using\\_the\\_Bohmian\\_machinery](https://www.researchgate.net/publication/225494984_Understanding_the_spreading_of_a_Gaussian_wave_packet_using_the_Bohmian_machinery) (visité le 26/08/2020).
- PASSON, Oliver (1<sup>er</sup> nov. 2004). « How to teach Quantum Mechanics ». In : *European Journal of Physics* 25(6), p. 765-769. ISSN : 0143-0807, 1361-6404. DOI : [10.1088/0143-0807/25/6/008](https://doi.org/10.1088/0143-0807/25/6/008). arXiv : [quant-ph/0404128](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0404128). URL : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0404128> (visité le 22/07/2021).
- PASSON, Oliver (15 jan. 2005). « Why isn't every physicist a Bohmian? » In : URL : [https://www.researchgate.net/publication/2194415\\_Why\\_isn%27t\\_every\\_physicist\\_a\\_Bohmian](https://www.researchgate.net/publication/2194415_Why_isn%27t_every_physicist_a_Bohmian).
- PASSON, Oliver (2006). « What you always wanted to know about Bohmian mechanics but were afraid to ask ». In : *Physics and Philosophy* 3. URL : <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0611032> (visité le 15/08/2020).
- PATY, Michel (1985). « Einstein et la complémentarité au sens de Bohr : du retrait dans le tumulte aux arguments d'incomplétude ». In : *Revue d'histoire des sciences* 38(3). Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 325-351. DOI : [10.3406/rhs.1985.4010](https://doi.org/10.3406/rhs.1985.4010). URL : [https://www.persee.fr/doc/rhs\\_0151-4105\\_1985\\_num\\_38\\_3\\_4010](https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1985_num_38_3_4010) (visité le 20/04/2021).
- PATY, Michel (2000). « Interprétations et significations en physique quantique ». In : *Revue Internationale de Philosophie* 2, p. 199-242. URL : <https://philpapers.org/rec/PATIES>.
- PAULI, Wolfgang (1945). *Conférence Nobel*. URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/pauli/lecture/> (visité le 17/04/2021).
- PERUZZI, Giulio (30 nov. 1999). « Réflexions philosophiques ». In : *Pour La Science Les génies de la science*(34). Publisher : Pour la Science. URL : <https://www.pourlascience.fr/sd/histoire-sciences/reflexions-philosophiques-3953.php> (visité le 05/05/2021).
- PESTRE, Dominique (1984). *Physique et physiciens en France : 1918-1940*. ISSN : 0761-1102. Paris, France. xxxix+356. ISBN : 978-2-903928-08-7.
- PHARABOD, Jean-Pierre (1987). « L'éventail des interprétations. » In : *Raison présente*. La nouvelle physique abolit-elle le réel?( 84), pp. 15-23.
- PHILIPPIDIS, C., C. DEWDNEY et B. J. HILEY (1979). « Possible Bohmian trajectories in the double-slit experiment ». In : *Il Nuovo Cimento (B)* 52, p. 15-28. DOI : [10.1007/BF02743566](https://doi.org/10.1007/BF02743566).

- SAMUELI, Jean-Jacques et Alexandre MOATTI (mai 2012). *Sur le principe de la moindre action*. Bibnum Education. Library Catalog : [www.bibnum.education.fr/physique/physique-mathematique/sur-le-principe-de-la-moindre-action](http://www.bibnum.education.fr/physique/physique-mathematique/sur-le-principe-de-la-moindre-action) (visité le 17/07/2020).
- SANZ, Angel (2018). « Bohmian pathways into chemistry : A brief overview ». URL : [https://www.researchgate.net/publication/322518244\\_Bohmian\\_pathways\\_into\\_chemistry\\_A\\_brief\\_overview](https://www.researchgate.net/publication/322518244_Bohmian_pathways_into_chemistry_A_brief_overview) (visité le 11/11/2020).
- SANZ, Angel et S. MIRET-ARTES (12 juin 2008). « A trajectory-based understanding of quantum interference ». In : *J. Phys. A : Math. Theor.* 41. DOI : [10.1088/1751-8113/41/43/435303](https://doi.org/10.1088/1751-8113/41/43/435303).
- SCHRÖDINGER, Erwin (1926a). « Quantisierung als Eigenwertproblem (I) ». In : *Annalen der Physik*( 79), p. 361-376. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19263840404> (visité le 07/12/2020).
- SCHRÖDINGER, Erwin (1926b). « Quantisierung als Eigenwertproblem (II) ». In : *Annalen der Physik*( 79), p. 489-527. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19263840404> (visité le 07/12/2020).
- SCHRÖDINGER, Erwin (1926c). « Quantisierung als Eigenwertproblem (III) ». In : *Annalen der Physik*( 80), p. 437-490. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19263840404> (visité le 07/12/2020).
- SCHRÖDINGER, Erwin (1926d). « Quantisierung als Eigenwertproblem (IV) ». In : *Annalen der Physik*( 81), p. 109-139. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19263840404> (visité le 07/12/2020).
- SCHRÖDINGER, Erwin (1933). *Conférence Nobel*. URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/schrodinger/lecture/> (visité le 17/04/2021).
- SCHRÖDINGER, Erwin (1951). *Physique quantique et représentation du monde*. Points. Seuil 1992. 185 p. ISBN : 2-02-013319-9. URL : <https://www.decitre.fr/livres/physique-quantique-et-representation-du-monde-9782020133197.html> (visité le 20/08/2020).
- SEGRÈ, Gino (10 jan. 2011). *Faust a Copenaghen*. Google-Books-ID : lGnAIIemYoC. Il Saggiatore. 322 p. ISBN : 978-88-6576-047-5.
- SOLER, Léna (2006). « Une nouvelle espèce d'incommensurabilité en philosophie des sciences ? » In : *Revue Philosophique de Louvain* 104(3). Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 554-580. URL : [https://www.persee.fr/doc/phlou\\_0035-3841\\_2006\\_num\\_104\\_3\\_7679](https://www.persee.fr/doc/phlou_0035-3841_2006_num_104_3_7679) (visité le 26/10/2020).
- SOLER, Léna (2009). « The Convergence of Transcendental Philosophy and Quantum Physics : Grete Henry-Hermann's 1935 Pioneering Proposal ». In : *Constituting Objectivity : Transcendental Perspectives on Modern Physics*. Sous la dir. de Michel BITBOL, Pierre KERSZBERG et Jean PETITOT. The Western Ontario Series in Philosophy of Science. Springer Netherlands. ISBN : 978-1-4020-9509-2. DOI : [10.1007/978-1-4020-9510-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9510-8). URL : <https://www.springer.com/gp/book/9781402095092> (visité le 08/11/2020).
- SOLVAY, Armand (14 sept. 1926). *Lettre d'Armand Solvay à Octave Dony-Henault*. Letter. URL : <http://www.thesolvayscienceproject.be/items/show/877> (visité le 20/04/2021).
- SOLVAY, Ernest (1910). *Liste des participants, classés par pays, au conseil scientifique de 1911 convoqué par Monsieur Ernest Solvay, de Bruxelles*. URL : <https://bibnum.explore.psl.eu/s/psl/ark:/18469/2699> (visité le 20/04/2021).
- SOLVAY, Ernest (15 juin 1911). *Invitation d'Ernest Solvay, à un "Conseil scientifique international pour élucider quelques questions d'actualité des théories moléculaires et cinétiques"*. Letter. URL : <http://www.thesolvayscienceproject.be/items/show/877>

- [//www.thesolvayscienceproject.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/708#?c=0&m=0&s=0&cv=0](http://www.thesolvayscienceproject.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/708#?c=0&m=0&s=0&cv=0) (visité le 20/04/2021).
- SOLVAY, Ernest (jan. 1912). *Lettre d'Ernest Solvay à Hendrik Lorentz*. Letter. URL : <http://www.thesolvayscienceproject.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/843#?c=0&m=0&s=0&cv=0> (visité le 20/04/2021).
- SOLVAY, Institut (1928). *Electrons et photons : rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927*. Institut international de physique Solvay. Gauthier-Villars et cie : Paris. URL : <http://bib63.ulb.ac.be/exhibits/show/the-solvay-science-project/item/907#?c=0&m=0&s=0&cv=0> (visité le 13/07/2020).
- TONOMURA, A. et al. (1<sup>er</sup> fév. 1989). « Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern ». In : *American Journal of Physics* 57(2). Publisher : American Association of Physics Teachers, p. 117-120. ISSN : 0002-9505. DOI : [10.1119/1.16104](https://doi.org/10.1119/1.16104). (Visité le 19/08/2021).
- TOWLER, Mike (2020). *De Broglie-Bohm pilot-wave theory and the foundations of quantum mechanics - A graduate lecture course by Mike Towler (University of Cambridge, Lent term 2009)*. URL : [https://casinoqmc.net/pilot\\_waves.html](https://casinoqmc.net/pilot_waves.html) (visité le 03/10/2020).
- TREPS, Nicolas (2010). « Comme c'est bizarre... » In : DARS, Jean-Francois et Anne PAPILLAULT. *Le plus grand des hasards Surprises quantiques*. Regards Sur La Science. Belin, p. 113. (Visité le 12/09/2020).
- TUMULKA, Roderich (juin 2018). « On Bohmian Mechanics, Particle Creation, and Relativistic Space-Time : Happy 100th Birthday, David Bohm ! » In : *Entropy* 20(6). Number : 6 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 462. DOI : [10.3390/e20060462](https://doi.org/10.3390/e20060462). URL : <https://www.mdpi.com/1099-4300/20/6/462> (visité le 03/10/2020).
- VALENTINI, Antony (1996). « PILOT-WAVE THEORY OF FIELDS, GRAVITATION AND COSMOLOGY ». In : CUSHING, James T., Arthur FINE et Sheldon GOLDSTEIN. *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*. Kluwer Academic Publishers. T. 184. BOSTON STUDIES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., p. 45-66. ISBN : 978-90-481-4698-7.
- VIGIER, Jean-Pierre et Louis de BROGLIE (1951). « Introduction géométrique de l'onde pilote en théorie unitaire affine ». In : *Comptes rendus de l'Académie des sciences.*( 233), p. 1010-1013.
- VILA VALLS, Adrien (2013). « Louis de Broglie a-t-il adhéré à l'interprétation de Copenhague ? » In : *Cahiers François Viète Série II (n°4 (2011))*. Publisher : Centre François Viète, Université de Nantes, p. 33-51. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00854403> (visité le 24/06/2021).
- VILA-VALLS, Adrien (14 nov. 2012). « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925 -1960) ». These de doctorat. Lyon 1. URL : <https://www.theses.fr/2012LY010218> (visité le 19/08/2020).
- WEINBERG, Steven (2013). *Lectures on quantum mechanics*. Cambridge University Press : Cambridge, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord. xix+358. ISBN : 978-1-107-02872-2.
- YOCARIS, Ilias (9 juil. 2010). « Des images et des paraboles : Niels Bohr et le discours descriptif en physique quantique ». In : *Cahiers de Narratologie. Analyse et théorie narratives*( 18). Number : 18 Publisher : REVEL. ISSN : 0993-8516. DOI : [10.4000/narratologie.6025](https://doi.org/10.4000/narratologie.6025). URL : <http://journals.openedition.org/narratologie/6025> (visité le 20/02/2021).
- ZWIRN, Hervé (2001). « Mécanique quantique et connaissance du réel ». In : ESPAGNAT, Bernard d'. *Implications philosophiques de la science contemporaine*. Académie des Sciences Morales et Politiques. URL : <https://academiesciencesmoraletespolitiques.fr/2001/02/20/implications-philosophiques-de-la-science-contemporaine/> (visité le 18/08/2020).

ZWIRN, Hervé (mar. 2020). « L'observateur, un défi pour la physique quantique ». In : *Pour La Science*( 509). Publisher : Pour la Science, p. 24-31. URL : <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/une-realite-classique-derriere-letrangete-quantique-18878.php> (visité le 23/05/2020).