

L'existence d'une théorie physique telle que BQM vous paraît-elle fournir un argument fort contre l'inévitabilité revendiquée de la théorie physique SQM en vigueur ?¹

Léo Vacher (vacher.leo.etu@gmail.com)

Commençons par rappeler que l'on entend par « inévitabilité de SQM » que cette formulation de la mécanique quantique serait nécessaire à l'histoire des sciences i.e. qu'elle n'aurait pas pu être substantiellement autre, en partie, car elle est imposée par l'expérience. Ainsi, une formulation alternative n'aurait pas pu légitimement l'emporter et être retenue². De par son existence même, BQM contredit donc directement l'inévitabilité de SQM, puisque les deux théories sont empiriquement équivalentes i.e. elles fournissent les mêmes prédictions expérimentales (dans l'état actuel des choses). Le choix d'une théorie préférable (si il doit être fait), devra donc être effectué pleinement sur des critères normatifs. On associe à SQM l'adoption d'un critère normatif positiviste et restrictif contre des critères normatifs plus permissifs pour BQM, visant en priorité une théorie interprétable et « détachable ». Comme discuté en grand détail dans (Soler, 2023), il semble impossible de justifier l'inévitabilité de SQM par la supériorité des critères normatifs positivistes dans le but d'ostraciser complètement BQM³. On pourra alors tenter d'argumenter que BQM a une moindre valeur en tant que théorie scientifique que SQM, en invoquant ici encore des critères non-empiriques plus ou moins contingents (n'oublions pas que pour pouvoir penser convenablement cette problématique, il faut également considérer l'existence de nombreux autres critères sociaux et historiques ayant cristallisé une préférence pour SQM⁴).

J'aimerais ici discuter deux nouveaux arguments - proches mais distincts - que l'on pourra qualifier d'inévitabilistes non ostracisants en faveur de la moindre valeur de BQM et qui me semblent très fréquemment invoqués : a) SQM a un champ d'application plus large que BQM⁵ et b) lorsque l'on cherche à étendre BQM, au pire, cela ne fonctionne pas, au mieux,

¹ Nombre de mots hors notes de bas de page et citations ~ 1099.

² Paraphrasé depuis (Soler, 2023), Chap. 5.3.2.

³ Notons que de nombreux physiciens favorables à SQM (consciemment ou non), ne voient pas de problèmes à parler de multivers (e.g. type Univers bulles et inflation éternelle), qui sont tout aussi voire plus inaccessibles expérimentalement que les particules de Bohm. Il me semble également que des théories comme celle des Univers parallèles d'Everett ont récemment reçu plus de crédit que BQM, alors qu'elles présentent les mêmes problèmes d'inaccessibilité empirique. Dans cet état de « dissonance cognitive », on peut alors légitimement se demander si l'argument des normes positivistes peut vraiment représenter la cause du rejet de BQM par la communauté des physiciens.

⁴ BQM arrive historiquement bien après que SQM se soit déjà imposé comme faisant autorité. Le personnage de Bohm a également pu à bien des égards apparaître comme marginal, ayant été radié de Princeton et forcé de quitter les Etats-Unis, car accusé de « communisme », il consacra la fin de sa vie à mettre en relation science, psychologie et spiritualité abordant notamment la question de la conscience. Pour ces raisons, il est encore souvent (et c'est déplorable) associé à des théories pseudo-scientifiques largement décredibilisantes.

⁵ La question de la capacité de généralisation et d'extensions de BQM (notamment aux cas incluant des champs électriques et magnétiques) n'est absolument pas mineure et elle semble même omniprésente dans les propos des physiciens lors des débats en (d'Espagnat & Zwirn, 2014), notamment p.246-247.

son contenu descriptif se voit trop altéré. SQM aurait donc inévitablement été choisie à long terme, car elle est la seule direction permettant une avancée significative de l'édifice de la physique et/ou le cadre que propose BQM est trop restreint et ne peut pas « survivre » à la généralisation. Il me semble que ces arguments de moindre valeur sont bien plus puissants et moins subjectifs que les arguments e.g. de beauté ou de simplicité discutés en Chapitre 11 de (Soler, 2023), et ils ne peuvent pas être aussi facilement déviés par des contre-arguments contingentistes. On pourra en effet argumenter qu'il est possible d'attester de a) et de b) objectivement et quantitativement au vu de l'état de l'art des publications scientifiques.

Concernant a) : une des forces indéniables de SQM est qu'elle se présente comme un cadre mathématique formel et extrêmement abstrait donnant une procédure très générale pour « quantifier » un système en imposant des relations de commutations entre observables, pourvu que l'on ait trouvé un espace des états pour décrire notre système⁶ (quantification dite « canonique »). Ceci explique la richesse de son champ d'application (théorie quantique des champs, matière condensée, physique moléculaire, informatique et logique quantique, gravitation quantique etc), allant bien au-delà du cas de la mécanique du point⁷. On peut répondre à cet argument en justifiant que SQM a reçu beaucoup plus de moyens humains et matériels pour se développer, expliquant en partie cet état de fait⁸. De plus, si on considère SQM comme une limite « thermodynamique » de BQM, redonnant les mêmes conséquences empiriques, on peut conclure que tous ces développements auraient également pu émerger (potentiellement sous une autre forme) avec BQM comme théorie canonique. Finalement, on pourra encore rétorquer que BQM propose des applications qui elles sont largement inaccessibles avec SQM, car son cadre normatif les interdit, l'exemple le plus frappant étant donné en Chimie quantique et analogues hydrodynamiques, mais également en optique, spintronique, et même marginalement en Cosmologie (voir e.g., (Oriols+, 2012)). BQM peut alors être pensée comme complémentaire à SQM. a) n'est donc pas convaincant.

Le point b) se présente comme une version forte de a). D'après M. Bitbol ou B. d'Espagnat, par exemple, l'intérêt majeur de BQM réside dans l'interprétabilité détachable claire qu'elle propose en termes d'ontologie à deux niveaux : particules guidées par une fonction d'onde

⁶ La formulation algébrique de SQM permet également de rendre les symétries explicites, et c'est sur cette recherche de symétries que s'est grandement construite la physique théorique moderne. On retrouve ici un lien direct avec l'argument de beauté ou de simplicité e.g. R. Balian « Pour ma part, j'aime bien les invariances. [SQM] est invariante unitaire. Le fait qu'il n'y ait pas d'invariance [dans BQM au niveau des trajectoires], me gêne beaucoup. » p. 282 (d'Espagnat & Zwirn 2014). On pourrait même se risquer à argumenter que c'est l'hégémonie de SQM et ses critères de scientificités tels que proposés au XXème siècle qui a imposé cette direction de quête de symétrie pour les développements de la physique théorique.

⁷ L'exemple de la logique/informatique quantique est très frappant : l'étude se restreint aux Q-Bits du type $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ dans un espace de Hilbert en deux dimensions. On peut alors faire agir des opérateurs sur eux (des portes quantiques) pour créer des variantes de la logique dans lesquels les propositions peuvent « interférer » entre elles. On généralise alors le principe de bivalence V/F des propositions de la logique classique ou 0/1 des bits en informatique standard. Tous ces développements, extrêmement riches, ne font pas appel à la notion de particule. En un sens, l'argument de « généralisation » est ici une version plus forte de l'argument « d'élégance » ou de « simplicité ».

⁸ N'oublions pas qu'il y a une énorme pression « pratique » à utiliser SQM de part ses multiples développements, mais également une forte contrainte « sociale » pour éviter d'être marginalisé.

(d'Espagnat & Zwirn, 2014)⁹ ¹⁰. Or, il semblerait que cette ontologie ne soit plus viable lors du passage de BQM au régime relativiste (RQM) et/ou quand le nombre de particules peut varier (théorie des champs (TQC)). Autrement dit : le contenu descriptif de BQM et l'ontologie associée ne peuvent pas être propagés (ou doivent être trop distordues) là où SQM semble prospérer¹¹. Ainsi, BQM se voit rejetée, non pas pour ce qu'elle est, mais pour ce qu'elle ne peut pas devenir. On pourrait d'abord suggérer qu'il n'est pas non plus clair si l'ontologie proposée par SQM est préservée en STQC, et qu'un travail titanesque reste encore à faire pour interpréter le formalisme des champs relativistes. Cependant, il semble indiscutable que les principaux critères imposés par SQM (e.g. absence de trajectoire, non déterminisme et ambitions positivistes/operationalistes ...) sont bien directement transposables en STQC¹². La critique de M. Bitbol semble dirigée particulièrement contre

⁹ M. Bitbol: (d'Espagnat & Zwirn, 2014), p. 274: «Le premier problème [de BQM][...] est la multiplicité des ontologies qu'on doit avancer si on veut réaliser le programme d'interprétation réaliste de Bohm dans tous les domaines validité des théories quantiques.» Et plus loin, à la suite d'une argumentation complète trop longue pour être retranscrite ici : « voilà donc trois ontologies pour un même projet de reconstitution d'une ontologie. Cela nous interroge [...] qu'est ce qui nous garantit que nos ontologies présentes ne seront pas également abandonnées ? » Ou encore p.241 au sujet de l'interaction particule/photon dans BQM «Cela dit, il y a quand même une difficulté. Il n'est pas question de réfuter complètement [BQM], mais cette théorie soulève (au moins) un problème philosophique. Dans cette théorie, la particule peut se voir attribuer deux statuts ontologiques profondément distincts, pour ne pas dire incompatibles. Le premier statut [...] c'est l'idée d'un petit corps qui se déplace en continuité dans sa trajectoire et une permanence dans son existence. Le deuxième statut ontologique de la particule c'est celui d'un mode d'excitation du champ, qui est favorisé dans certains développements ultérieurs de [BQM]. »

Egalement la phrase de B. d'Espagnat dans ce sens (p. 241) : « On a perdu ce qui était agréable. Et puis, indépendamment de toute question d'agrément, on a changé d'ontologie. On est passé d'une ontologie de petits corps à une ontologie de champs. S'agissant d'une théorie dont le trait le plus séduisant est d'être ontologiquement interprétable, c'est là une péripétie qui déconcerte ! À quand le prochain changement ? Qu'est ce qui est réel ? En ce qui me concerne, c'est sans doute cette bizarrerie qui alimente le plus mon scepticisme à l'égard de [BQM]. » et A. Aspect de répondre « Je suis assez d'accord. Dans ce cas là, on pourra se demander si les descriptions sont réellement plus confortables que la théorie quantique habituelle ». Il s'agit donc là d'un reproche gravissime considéré comme majeur par les plus éminents. physiciens quantiques.

¹⁰ M. Bitbol argumente également (p.279 de (d'Espagnat & Zwirn, 2014)) que certaines expériences sur le neutron (Brown+, 1995) semblent mettre à mal cette position (la masse n'apparaissant pas comme une propriété localisée des particules). Cependant, ce point extrêmement technique et les interprétations à en tirer ne semblent pas claires, et ouvrent un spectre assez large sur la gravité de la situation pour BQM. J'interprète cela simplement comme une généralisation de la nature des observables (autres que la position) en BQM, qui ne sont pas une propriété des particules mais du système particule / ψ /appareil de mesure au cas de la masse. Une tentative sérieuse d'étudier ce point plus en détail au regard de la littérature récente dépasse malheureusement très largement le contexte de ce bref essai. Il semblerait pourtant que cette expérience ait joué un rôle majeur dans la préférence récente pour les théories d'Everett discutée en note de bas de page 3, pour une discussion voir (Brown & Wallace, 2004) et (Maudlin 2010). Notons aussi au passage que de récents développements expérimentaux sur les expériences dites de « Weak measurements » et leurs controverses ont réouvert la question de la distinction expérimentale entre BQM et SQM, démontrant que ce type de débat suscite encore le vif intérêt d'une petite communauté.

¹¹ En quelque sorte, il s'agit d'utiliser la stratégie inévitable de l'appel au long terme [Chap. 12.2.2. (Soler, 2023)], en argumentant que le long terme ... c'est maintenant !

¹² Cela n'est pas une surprise et est fortement relié à la discussion du point a). STQC est avant tout une application de la « recette algébrique » de SQM sur un espace de Hilbert dont les vecteurs représentent les états à plusieurs particules (espace de Fock e.g. un produit tensoriel d'espaces de Hilbert). Le cadre interprétatif mal défini de SQM n'ajoute aucune contrainte et rends donc les généralisations plus aisées et si j'ose dire « mécaniques/automatiques ».

les travaux ultérieurs de Bohm lui-même (Bohm & Hiley, 1995), (Bohm, 1980). Pour autant que je sache, la recherche au sujet de BTQC/BRQM est encore ouverte et (trop) peu avancée pour pouvoir réellement trancher ainsi¹³. Des alternatives crédibles ont été récemment proposées par d'autres que Bohm et semblent conserver le cadre descriptif de BQM e.g. (Dürr+, 2004 & 2005), (Nikolic, 2009 & 2022). Malheureusement, peu de gens étant vraiment familiers avec BQM, un nombre infime de chercheurs peut vraiment suivre ces derniers développements et une confusion générale règne dès que la question est abordée dans un débat¹⁴ (et elle l'est systématiquement, car STQC est considérée comme plus fondamentale et générale que SQM). De par son exigence de détachabilité, BQM rend pourtant explicites les problèmes posés par l'expérience au sujet du réalisme et de la non localité auquel SQM évite de s'exposer directement en imposant une sorte de status quo consensuel autour d'un cadre interprétatif extrêmement vague¹⁵. Les propositions de RBQM semblent systématiquement violer explicitement l'invariance de Lorentz (à des degrés plus ou moins forts), nous forçant à repenser aussi les implications du cadre proposé par la relativité restreinte (voir une discussion en (Dürr+, 2013)). Après les trajectoires et le déterminisme, RBQM pourrait donc encore lever des impossibilités comme ceux de « référentiel privilégié » ou « d'éther », grâce à une approche normative plus permissive (Gondran+, 2014). La contingence SQM/BQM étendue et rendue légitime au cas des champs relativistes (plus « fondamentaux » et aux applications plus larges), accroîtrait donc la contradiction présente sur les plans descriptifs/normatifs/interprétatifs et elle serait

¹³ On pourra également argumenter (je ne le fais pas ici par manque de place) qu'il n'y a aucun problème à ce que l'ontologie de BQM se voit complètement transformée lors du passage à RBQM/BTQC. Après tout, nous pouvons tout de même proposer une alternative à RSQM/STQC, perpétuant l'opposition à l'inévitabilité de SQM et à ces généralisations avec un nouveau cadre descriptif, qui n'est pas identique à celui de BQM. Cependant, il n'est pas clair que cet argument suffise à contrer complètement l'argument inévitabiliste de moindre valeur de généralisation, car on devrait concéder que BQM, tel quel, a en effet un cadre scientifique plus restreint que SQM. De plus on devrait fragiliser, du moins en partie, la possibilité d'une interprétation réaliste en termes de particules, si chères aux Bohmiens. Dans le même esprit, on pourrait argumenter que BQM n'a pas à être étendue ou à se justifier plus loin que le cadre qu'elle a fixée (nombre constant de particules non relativistes) dans lequel elle est équivalente à SQM. Cependant, on ne ferait que botter en touche concernant l'accusation de moindre valeur et d'inévitabilité de SQM « sur le long terme », et à mon sens, on se priverait de toute la richesse scientifique que pourrait justement proposer BQM. Ces deux approches ne me semblent donc pas viables.

¹⁴ voir encore (d'Espagnat & Zwirn, 2014) p. 246. Le sujet est abordé brièvement et dans la confusion générale, avec F. Laloë qui commencera par « Je ne m'avancerai pas sur la théorie des champs en général, car je ne suis pas assez spécialiste ». Le fait étant que le sujet est extrêmement peu exploré et discuté, mais pourtant sans arrêt réclamé lorsqu'on expose un « physicien candide » à BQM pour la première fois. Voir encore A. Grrinbaum (p.266) : «on n'a jamais essayé d'imaginer quelles seraient les conséquences [de BQM] pour la théorie de l'espace-temps. A ma connaissance, cela n'a jamais été exploré par quiconque », pourtant le sujet a bien été exploré, mais extrêmement peu et avec une visibilité très faible.

¹⁵ En effet, la version faible de SQM « operationaliste » cherche à ne pas se prononcer sur la nature des objets microscopique non observable mais est toujours (consciemment ou non) partiellement ontologisé, et ce, de manière confuse [voir (Soler, 2023) chapitre 12.1.5.]. Nous sommes donc en adéquation avec le « Shut up and calculate » attribué à tort à R. Feynmann, dans lequel tout le monde continue finalement à parler timidement sans même s'en rendre compte. Les ontologisations assumées de SQM, elles, me semblent finalement relativement marginales, car elles suggèrent explicitement une forme d'anti-réalisme holistique (voir le cas extrême de l'interprétation relationnelle proposée par (Rovelli, 1997) ou les positions de (Bitbol, 2008) lui-même, voire d'idéalisme (le problème de la mesure pouvant très vite amener à la question de la conscience voir e.g., (Atmanspacher, 2020)). Ces points de vue ne me semblent pourtant pas représentatifs de la vision de la majorité des physiciens, revendiquant souvent une certaine forme de réalisme ou de positivisme.

précieuse, car elle offrirait aux physiciens de nouveaux prismes pour penser leurs théories¹⁶ et proposer de nouvelles expériences, généralisations¹⁷ et théories englobantes [e.g. QM en espaces courbes, gravité quantique, et théories des cordes, à ce sujet voir (Dürr+, 2007), (Nikolic, 2006)]. Je me place donc fortement en faveur d'une intensification de la recherche d'extensions vers un régime pluraliste appliqué aux généralisations de SQM et BQM, en opposition au régime moniste actuel¹⁸.

¹⁶ Il suffit de voir comment une discussion de BQM apparaît comme une surprise pour beaucoup de physiciens pourtant experts de SQM dans (d'Espagnat & Zwirn, 2014), et l'ampleur de la confusion et la richesse des discussions qui émergent d'une telle confrontation

¹⁷ Notons que l'existence de théories alternatives empiriquement équivalentes mais marginales n'est pas un cas isolé à BQM: il en va de même pour la relativité générale qui peut être réécrite de manière empiriquement équivalente en termes d'objets géométriques différents (e.g. Torsion T , ou non-métricité Q au lieu de courbure R , voir (Jiménez+, 2019)). Ces relectures conduisant donc à des interprétations et cadres descriptifs différents (dans une moindre mesure que pour BQM et SQM pour les exemples ici mentionnés). Plus puissamment encore, ces différents cadres conduisent naturellement à la recherche d'extensions théoriques différentes (e.g., modifications du Lagrangien en $f(Q)$ et $f(T)$ au lieu de $f(R)$) associées à des prédictions expérimentales incompatibles, enrichissant donc grandement les perspectives de recherche.

¹⁸ Bien que la démarche du physicien théoricien contemporain au regard de l'état actuel de la recherche est quasiment toujours de se projeter vers une unique théorie unifiant les théories quantique des champs (de jauge) et la gravité, je ne souhaite pas ici faire appel inconsciemment à « la stratégie inévitabiliste de l'appel au long terme », restant donc ouvert à la possibilité qu'une multiplicité des théories empiriquement équivalentes puisse se maintenir dans les théories futures érigées à partir de BQM. Pour cela, il apparaît tout de même clair, pour les raisons que j'ai évoquées, que BQM est dans une situation critique où elle se doit de proposer des généralisations claires aux champs de la TQC ayant une visibilité conséquente, au risque de se voir abandonner en raison des arguments a) et b).

BIBLIOGRAPHIE

- (Atmanspacher, 2020) : H. Atmanspacher - 2020 - Quantum Approaches to Consciousness - The Stanford encyclopedia of Philosophy
- (Bitbol, 2008) : M. Bitbol - 2008 - Mécanique quantique: Une introduction philosophique. Flammarion
- (Bohm & Hiley, 1995) : D. Bohm and B. J. Hiley - 1995 - The undivided Universe - Routledge edition, (Reprint)
- (Bohm, 1980) : D. Bohm - 1980 - Wholeness and the implicate order - Routledge edition.
- (Brown+, 1995) : H. R. Brown, C. Dewdney, and G. Horton - 1995 - Bohm Particles and Their Detection in the Light of Neutron Interferometry - Foundation of physics. 25, 329-347.
- (Brown & Wallace, 2004) : H. Brown & D. Wallace Solving the Measurement Problem: De Broglie-Bohm Loses Out to Everett - Foundations of Physics 35, 517-540.
- (d'Espagnat & Zwirn, 2014) : auteurs multiples sous la direction de B. d'Espagnat et H. Zwirn - 2014 - Le monde quantique: les débats philosophiques de la physique quantique. Editions Matériologiques.
- (Dürr+, 2004) : D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka, and N. Zanghi - 2004 - Bohmian Mechanics and Quantum Field Theory - Phys. Rev. Lett. **93**, 090402
- (Dürr+, 2005) : D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka, and N. Zanghi - 2005 - Bell-Type Quantum Field Theories - Journal of Physics A: Mathematical and General. 38, N.4
- (Dürr+, 2007) : D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka, and N. Zanghi - 2007 - Quantum Mechanics in Multiply-Connected Spaces - Journal of Physics A: Mathematical and General. 40, N.12
- (Dürr+, 2013) : D. Dürr, S. Goldstein, T. Norsen, W. Struyve and N. Zanghi - 2013 - Can Bohmian mechanics be made relativistic? - *Proc.Roy.Soc.Lond.A* 470 (2013) 20130699
- (Fankhauser & Dürr 2021) : J. Fankhauser, P. M. Dürr - 2021 - How (not) to understand weak measurements of velocities - Studies in History and Philosophy of Science Part A. 85, 16-29.
- (Gondran+, 2014) M. Gondran et A. Gondran - 2014 - Mécanique quantique : et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ? - Editions Matériologiques
- (Jiménez+, 2019) : J.B. Jiménez, L. Heisenberg, T. S. Koivisto - 2019 - The Geometrical Trinity of Gravity
- (Maudlin, 2010) : T. Maudlin - 2010 - Can the World be Only Wavefunction?, in Saunders et al. 2010: 121–143.
- (Nikolic, 2006) : H. Nikolic - 2007 - Bohmian mechanics in relativistic quantum mechanics, quantum field theory and string theory - J. Phys.: Conf. Ser. **67** 012035
- (Nikolic, 2009) : H. Nikolic - 2009 - QFT as pilot-wave theory of particle creation and destruction - International Journal of Modern Physics A 25(07)
- (Nikolic, 2022) : H. Nikolic - 2022 - Relativistic QFT from a Bohmian perspective: A proof of concept - Foundations of Physics 52(4).
- (Oriols+, 2012) : X. Oriols, J. Mompart - 2012 - Applied Bohmian Mechanics: From Nanoscale Systems to Cosmology - Jenny Stanford Publishing
- (Rovelli, 1997) : C. Rovelli - 1997 - Relational Quantum Mechanics - Int. J. of Theor. Phys. 35
- (Soler, 2023) : L. Soler - 2023 - Réflexions historiques, sociologiques et philosophiques sur la coexistence actuelle de deux théories quantiques incompatibles impossibles à départager expérimentalement.

ANNEXE : Présentation condensée de SOM et BQM:

A) : Standard Quantum mechanics (SQM) et interprétation de Copenhague.

Formalisme et connexion opérationnalisante

L'état d'un système microscopique S est décrit par un vecteur appelé vecteur d'état $|\psi\rangle$ dans un espace vectoriel complexe (de Hilbert) \mathcal{H} , équipé d'un produit scalaire hermitien $h(\cdot, \cdot)$ ¹⁹ : $\mathcal{H} \times \mathcal{H} \rightarrow \mathbb{C}$. A chaque vecteur $|v\rangle \in \mathcal{H}$, on peut alors associer un co-vecteur $\langle v| = h(|v\rangle, \cdot)$ appartenant au dual \mathcal{H}^* . On appelle observable tout opérateur $\hat{O} : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ étant Hermitien sur \mathcal{H} i.e. satisfaisant la relation $\langle \hat{O}v|w\rangle = \langle w|\hat{O}v\rangle^*$. Cette propriété garantit que les valeurs propres o de \hat{O} sont réelles. Les résultats d'une mesure sur le système S d'une observable \hat{O} peuvent uniquement prendre des valeurs parmi les valeurs propres o de \hat{O} avec une probabilité associée $p_o = \langle \psi|o\rangle\langle o|\psi\rangle$, où $|o\rangle \in \mathcal{H}$ est le vecteur propre associé à la valeur propre o c.à.d. que $\hat{O}|o\rangle = o|o\rangle$. Pour pouvoir interpréter $|\psi\rangle$ comme une densité de probabilités, il doit respecter $\langle \psi|\psi\rangle = 1$. Après mesure associée à une valeur o , l'état $|\psi\rangle$ se retrouve instantanément projeté sur le vecteur $|o\rangle$, on parle de réduction du paquet d'onde. Lorsque aucune mesure n'est effectuée sur S , son vecteur d'état $|\psi\rangle$ évolue selon l'équation de Schrödinger $\hat{H}|\psi\rangle = -i\hbar\partial_t|\psi\rangle$ où i est l'unité imaginaire et \hat{H} l'opérateur Hamiltonien, définit ici comme le générateur des translations dans le temps t (et identifiable à l'énergie de S). L'expression des observables \hat{O} et opérateurs d'évolution agissant sur $|\psi\rangle$ peuvent être déduits par des arguments de symétrie (e.g. Noether) ou en utilisant le principe de correspondance pour obtenir une forme proche de celle donnée par la physique classique. De plus, afin d'assurer la conservation des probabilités, tout opérateur d'évolution \hat{U} agissant sur $|\psi\rangle$ doit être unitaire (ou anti-unitaire) $\hat{U}^\dagger\hat{U} = \hat{I}$. Lorsque des observables \hat{O} et \hat{Q} ne commutent pas i.e. $\hat{O}\hat{Q} - \hat{Q}\hat{O} \neq 0$, il n'est pas possible de trouver une base de vecteurs propres commune aux deux observables. Ainsi il est impossible de mesurer simultanément la valeur des deux observables car toute mesure de o associée à \hat{O} et projetant $|\psi\rangle$ sur $|o\rangle$ ne pourra pas être associée à une valeur propre q de \hat{Q} et vecteur propre $|q\rangle$. C'est le cas des opérateurs de position \hat{X} et d'impulsion \hat{P} (le générateur des translations spatiales $\propto i\partial_x$) associés à une particule (ou à un système). On appelle fonction d'onde, la fonction à valeurs complexes $\psi(x) = \langle x|\psi\rangle$ correspondant à l'amplitude de probabilité de la particule d'être mesurée à la position x , où $|x\rangle$ sont les vecteurs propres de \hat{X} . On peut associer à chaque particule élémentaire un moment angulaire intrinsèque dit de spin, caractérisant la représentation irréductible de $SO(3)$ à laquelle la particule est associée i.e. comment la fonction d'onde se transforme sous rotations. Lorsque plusieurs systèmes interagissent, ils partagent le même vecteur d'état $|\psi\rangle$, on parle alors de systèmes intriqués. Toute mesure effectuée sur un des sous systèmes pourra ainsi affecter immédiatement les autres sous systèmes, et ce indépendamment de la distance physique qui les séparent.

Interprétation de Copenhague, contenu descriptif et critères normatifs associés:

En un mot, on peut résumer l'interprétation dite de « Copenhague » comme suit: toute l'information possible sur S est contenue dans $|\psi\rangle$. Autrement dit, tout ce qui est « au delà » de $|\psi\rangle$ n'appartient pas à SQM (ou plus fortement : n'est pas réel). En cela on lui associe des critères normatifs positivistes restrictifs, au sens où elle crée des « interdits » (restrictifs) car elle disqualifie tout ce qui n'est pas accessible directement par l'expérience (positivistes). On peut encore la qualifier « d'opérationnalisante », car elle ne cherche qu'à donner des prédictions valides aux résultats de mesures « for all practical purposes ». De nombreuses notions « classiques » se voient alors exclues.

¹⁹ $h(v, w) = h(w, v)^*$

Par exemple, la notion de trajectoire n'est pas possible pour les particules. De même le formalisme est intrinsèquement indéterministe et probabiliste. Pour les systèmes intriqués, SQM peut proposer une interprétation « holistique » dans laquelle les systèmes forment un tout unique, rendant moins explicite le problème posé par la non localité. La notion de mesure brise l'évolution unitaire de $|\psi\rangle$ pour le projeter immédiatement sur l'un des vecteurs propre d'une observable. Elle est souvent considérée comme mal comprise (donnant naissance au « problème de la mesure ») et ouvre la porte à de nombreuses lectures plus ou moins fortes et anti-réalistes de SQM.

B) Bohmian Quantum Mechanics (BQM)

Formalisme et connexion opérationnalisante

Le cadre de BQM est d'abord pensé dans le cas particulier d'une (ou plusieurs) particule(s) classique(s) non relativiste(s). ψ étant une fonction complexe, on peut l'expliciter sous forme polaire comme $\psi = R e^{i\mathcal{S}/\hbar}$, permettant alors une réécriture de l'équation de Schrödinger sous une forme singulièrement proche de l'équation de Hamilton-Jacobi classique dans laquelle R^2 est interprétée comme une densité de probabilité de particules (classiques) et \mathcal{S} comme la fonction de Hamilton (action pour chaque trajectoire) associée à \mathcal{S} . Cela suggère très fortement que les particules quantiques suivent bien des trajectoires classiques avec l'influence d'un potentiel additionnel (et non local) $Q = -(\hbar^2 \nabla^2 R^2)/(2m R^2)$ appelé « potentiel quantique ». Pour obtenir une équivalence empirique complète avec SQM, il faut opérer les deux identifications suivantes :

1. « L'équilibre quantique », à savoir que le module de la fonction d'onde est bien identifiable avec une distribution de probabilité de particules c.à.d. $R^2 = |\psi|^2$. ψ évoluant sous l'action de l'équation de Schrödinger, si une telle hypothèse est vraie à un temps t , elle le sera tout le temps.
2. La vitesse des particules (libres) est donnée par $\vec{v} = (\hbar \nabla \mathcal{S})/m$ (équation de guidage), i.e. les particules sont guidées par la phase de la fonction d'onde. Cette hypothèse est physiquement souhaitable pour deux raisons a) on l'obtient dans le formalisme de Hamilton-Jacobi si on identifie \mathcal{S} à la fonction de Hamilton et b) Elle est équivalente à dire que $\vec{v} = \vec{j}/R^2$ où $\vec{j} = \hbar \text{Im}(\psi^* \nabla \psi)/m$ est le courant de probabilité associé à la densité de probabilité R^2 .

En dérivant la vitesse ainsi définie, on obtient l'équation de « Bohm-Newton » $\dot{\vec{v}} = -\nabla(V + Q)$. Il devient alors possible de calculer et d'associer des trajectoires aux particules dans tous les cas d'études traditionnels associés à la mécanique quantique (fentes d'Young, oscillateur harmonique, atome d'hydrogène ...). Q permet l'existence de trajectoires autrement non classiques et chaotiques. La théorie est déterministe et tout l'aspect stochastique émerge donc de ce comportement chaotique des particules à l'échelle microscopique. La mesure est expliquée par l'interaction entre les particules et l'appareil de mesure. Les observables autre que la position ne décrivent pas des propriétés des particules mais de la combinaison appareil d'observation - fonction d'onde et particules. Le spin apparaît comme une propriété de la fonction d'onde, pas des particules. Les relations de non commutations entre \hat{X} et \hat{P} proviennent de l'aspect inévitablement perturbatif de la mesure d'objets microscopiques. Dans le cas général, toutes les particules partagent une seule et même fonction d'onde. L'intrication émerge lorsque plusieurs particules partagent une fonction d'onde qui ne peut pas être séparée comme un produit (généralement lorsque les particules interagissent). Lors d'une mesure, on peut montrer que l'appareil rend nécessairement séparable les fonctions d'ondes, en accord avec le comportement attendu (décohérence).

Interprétation de BQM, contenu descriptif et critères normatifs associés:

Le cadre interprétatif de BQM peut être dit "détachable" car il suppose l'existence d'objets (en l'occurrence d'une ontologie à deux niveaux particules et fonction d'ondes) indépendamment de la

mesure, et plus généralement, indépendamment des êtres humains. En cela on qualifie souvent BQM de « réaliste », mais suivant (Soler, 2023), on préfère utiliser « détachable ». Elle propose donc une ontologie à deux niveaux : particules microscopiques guidées par une fonction d'onde non locale. L'existence de ces objets ne peut cependant pas être mise en évidence expérimentalement. Les particules possèdent à tout instant des trajectoires continues et la théorie est fondamentalement déterministe. L'analogie est souvent proposée entre le rapport BQM/SQM et physique statistique/thermodynamique classique. BQM rendrait alors compte du comportement microscopique « caché » et inexplicable par SQM. La mesure devient parfaitement expliquée par l'interaction chaotique et perturbative de l'appareil de mesure sur le système. On voit donc que BQM, même si parfaitement empiriquement équivalente à SQM, est profondément incompatible avec cette dernière de par ses critères normatifs et descriptifs.