Les Interprétations de la Mécanique Quantique

– Grégory Moreau –

Table des Matières

I) Le contexte philosophique....2
1] Ontologies : les principales approches....2
2] Épistémologies : processus scientifiques....3

II) Le point de vue de Copenhague....4
1] La description scientifique (Bohr, Heisenberg)....4
2] Les interprétations de l'orthodoxie....4

III) Les interprétations réalistes....5
1] Brisure de la chaîne de Von Neumann (mécanisme dans les règles quantiques)....5
a – Décohérence macroscopique....5
b – Pragmatisme des laboratoires....6
2] Le réel voilé (sans modification des lois quantiques)....7
3] Les variables cachées (ajout d'un potentiel)....7
4] Interprétation modale (ajout de vecteur d'état)....8
5] Modification de l'Équation de Schrödinger (ajout d'un terme)....8
6] Familles cohérentes (ajout d'opérateurs)....9
7] Univers multiple (nouvelles applications des lois quantiques)....10

IV) Les interprétations idéalistes et compatibles....12
1] Interprétation statistique (sans modification des lois quantiques)....12
2] Point de vue informationnel pur (sans modification des lois quantiques)....12
3] Interprétation des corrélations (sans modification des lois quantiques)....12

V) Sur la non-localité....13
1] Théorème EPR....13
a – Expérience de pensée....13
b – Non-séparabilité et causalité....14
c – Le théorème....14
2] Inégalités de Bell....15
3] Expériences d'A.Aspect....16
4] Ordre implicite de D.Bohm....16

VI) Conclusion....17

I) Le contexte philosophique

1] Ontologies : les principales approches

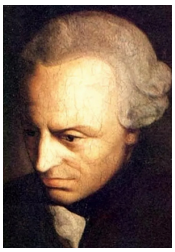
Ontologie = Branche de la philosophie qui a pour objet l'être en tant qu'être (incluant l'existence, la réalité) et qui étudie les propriétés générales de l'être.

A – Antiquité
« **Réalisme** des idées » (Platon, « idéalistes médiévaux »), Nominalisme ≠ Empirisme (Locke – *c.f.* I.2.c) [les sens, la matérialité]

B – **Réalisme** [défini aussi par Bitbol ; d'Espagnat ; Laloë]
(Pythagore, Démocrite, Newton, Galilée, Descartes, Diderot, Comte-Sponville)
Pythagorisme
(Néo-)Matérialisme

C – **Anti-réalisme** : réalité subjective (langage,...)
(Dummett, Berkeley)

E. Kant



D – **Idéalisme** (Kant, Hegel, Schopenhauer)
Versions de l'idéalisme...
modérée (Petitot)
radicale (Wittgenstein, Carnap, Quine, Putnam, Cassirer)

E – Phénoménologie / **Idéalisme** transcendental(e) (Husserl, Heidegger)
Sur les fondements de la science, au-delà de la question des choses, des phénomènes (kantiens). Rôle majeur de l'intuition, dans l'accession envisageable au « noumène ».

Réalisme	L' (In-) Connaissable	Facultés de connaissance
RÉALITÉ **INDÉPEN-DANTE** DE L'HOMME	Vérité accessible ou non	Notre pensée
RÉALITÉ	Monde perçu	Nos sens

* RÉALITÉ au sens de l'existence.

Idéalisme	Hindouisme (*Upanishad*)	L' (In-) Connaissable	Facultés de connaissance
RÉALITÉ PLUS **PROFONDE**	*Brahma :* principe fondamental du monde	« Volonté », universel La « Chose en soi », le « noumène », le « transcendant » L'« esprit », l'« absolu », l'essence d'un monde qui *évolue* vers du complexe (« substance vivante » ≠ « substance » achevée de Spinoza) [accessibilité : voir les ⇐'s] Chose scientifique ⇐	⇐ « Vouloir » (du corps), ascèse, irrationnel [⇐ croyance] Morale, foi ⇐⇐ (*Histoire* de la philosophie ; « phénoménologie de l'esprit » ; intuition intellectuelle) Raison : interroge, butte, dialectique (insoluble) ⇒ unité, « être-en-soi » décomposée en opp. ---------- Entendement : « intelligible », concepts (causalité) dynamiques opposées
RÉALITÉ UNIQUE	*Maja :* illusion, monde du devenir	« Représentation », espace-temps, « monde des phénomènes », empirique, « universel »	Perception sensorielle : données expérimentales
Fichte	Schopenhauer	Kant [*Critique de la raison pure*]	Hegel, Hölderlin, Schelling et Spinoza [accord sur l'accès (sinueux) possible à l'absolu]

* L'observation et la prise de conscience créent le monde réel[1] – chez Fichte (réel créé par le « moi »), Kant (nous contribuons activement par son exploration à la genèse du « monde »), Hegel (objet créé par le sujet, le « moi ») et Schopenhauer (plus de séparation entre l'objet et le sujet) ⇒ vision circulaire de Hegel : « l'esprit, l'absolu » tend à se comprendre lui-même ⇒ auto-déploiement (réalisation de soi) : savoir absolu au-delà d'une simple définition.

2] Épistémologies[2] : processus scientifiques

A – Scepticisme [ni expérience (*a posteriori*), ni connaissance (*a priori*)] (Hume)

1 Possible également, en toute logique, dans le réalisme au niveau du monde perçu (car la réalité est *indépendante* de nous-même donc de notre perception ET de nos pensées).

2 Au sens de la théorie des connaissances, de sa méthodologie.

B – Phénomén(al)isme : existence d'objets extérieurs à nous mais réduits à leurs apparences sensibles (pas de noumène) (Mach)
C – Empirisme pré et post-Kantien (Bacon, Locke)
versus rationalisme (Descartes, Leibniz)
D – Positivisme (Comte) : Sciences humaines ⇒ Sciences exactes (= fondements)
E – Constructivisme (Goodman) : image/réalité biaisée par interaction esprit-réalité
F – Conventionnalisme (Poincaré) : libres (//exp.) décisions au coeur des sciences, abstraction insaisissable dans l'activité de recherche (*hist.* géométries non euclidiennes)
G – Descriptions initiales comme progrès continus de la Science, et changements de 'paradigmes' (Bachelard, Kuhn)

II) Le point de vue de Copenhague

1] La description scientifique (Bohr, Heisenberg)

La description de la Mécanique Quantique (MQ), que nous dénommerons plutôt « description standard » vu les diverses nuances existant parmi les auteurs sur le point de vue de Copenhague, est la suivante. De manière générale, le 'vecteur d'état' est associé à la préparation [conditionnement à l'équilibre thermique par exemple] d'un système physique (non à une propriété physique du système : *superposition* possible). Sa fonction d'onde est 'indépendante' [au sens physique] de l'observateur. Le résultat d'une mesure (phénomène dit de réduction du paquet d'onde), qui peut subvenir, représente lui une propriété physique du système. Pour le physicien N.Bohr, « le point de vue de la *complémentarité* se présente comme une généralisation rationnelle de l'idée même de causalité », reliant une procédure de préparation d'un système à une mesure d'observable qui le caractérise – sans usage explicite d'*une* réduction du vecteur d'état du système (ni donc de la problématique *superposition* d'états ne définissant pas de manière unique et claire son état occupé) vu la non-séparabilité entre ce système et l'appareillage expérimental. On est encore à ce niveau dans une description plutôt qu'une interprétation. Néanmoins, l'approche *probabiliste* (ondulatoire) et la notion de *superposition* d'états sont inhérentes au formalisme quantique afin de pouvoir rendre compte de certaines expériences telles les deux fentes de Young (phénomène d'interférences notamment destructives, variété de positions possibles sur la plaque photographique). Reste donc à leur donner un sens, une interprétation satisfaisante voire intuitive...

2] Les interprétations de l'orthodoxie

N.Bohr a plutôt une vision réaliste de la MQ au sens philosophique (*c.f.* I.1) : typiquement l'état avant la mesure (sans propriété physique connue) revêt une réalité [existence] indépendante de notre perception donc (pour Bohr) de nous-même (et inaccessible aussi).

W.Heisenberg se situe lui dans l'idéalisme philosophique : « Mais les atomes ou les particules élémentaires ne sont pas réels ; ils forment un monde de potentialités ou de possibilités, plutôt qu'un monde de choses et de faits ». Pas de réalité indépendante donc (pour lui) mais une réalité dans l'observation subjective : « Les sciences de la nature ne donnent pas simplement une description et une explication de la nature ; elles font partie des interactions entre la nature et nous-mêmes ; elles décrivent la nature telle qu'elle réagit à notre méthode pour lui poser des questions » [tiré de '*Physics and philosophy*'].
Pour P.Jordan, tel que cité par J.S.Bell : « les observations ne se contentent pas de perturber ce qui doit être mesuré, elles le *produisent.* », ce qui rejoint la création de l'objet par le sujet dans l'idéalisme allemand.
La vision de E.Schrödinger s'accorde de même avec l'idéalisme : « le monde ne m'est donné qu'une seule fois, et pas une fois pour son existence et une autre pour sa perception. Le sujet et l'objet sont un. » (pas de réalité existant de manière indépendante du sujet, et, relation forte objet-sujet).

III) Les interprétations réalistes

1] Brisure de la chaîne de Von Neumann (mécanisme dans les règles quantiques)

a – Décohérence macroscopique

(Zurek, Zeh, Gell-Mann, Hartle, voir aussi la logique partielle de Griffiths, Omnès)

Considérons un atome dans un état quantique superposé du type

$$a\,|\alpha\rangle + b\,|\beta\rangle$$

tel que permis par l'Équation de E.Schrödinger. On parle alors d'état *cohérent* dans le sens où les coefficients, a et b, sont reliés par la normalisation de l'état global et ont une phase physique relative. Ces états ortho-normalisés $|\alpha\rangle, |\beta\rangle$ de l'atome peuvent être des états propres d'énergie (excitation : modèle en couche), de position,… Supposons maintenant que cet atome émet un photon dont l'impulsion correspond à un certain état de l'atome. L'état du Système atome + photon pourrait alors s'écrire comme suit,

$$a\,|\alpha\rangle\, c_{\alpha 1}\,|k_\alpha\rangle \;+\; b\,|\beta\rangle\, c_{\beta 1}\,|k_\beta\rangle$$

$|k_\alpha\rangle, |k_\beta\rangle$ étant les états propres orthonormés de l'impulsion du photon et $c_{\alpha 1}$, $c_{\beta 1}$ des coefficients ; il s'agit là d'un état dit intriqué. Si le photon a l'impulsion k_α (k_β), suite à une mesure, alors l'atome est dans l'état réduit $|\alpha\rangle$ ($|\beta\rangle$) – ce qui fait sens physiquement ici. Dans le cas où un deuxième photon serait émis par l'atome, il faudrait alors considérer l'état global initial du Système atome + 2 photons – vis-à-vis de la mesure éventuelle des impulsions des 2 photons émis – qui serait le suivant,

$$a\,|\alpha\rangle\, c_{\alpha 1}\,|k_\alpha\rangle\, c_{\alpha 2}\,|k_\alpha\rangle \;+\; b\,|\beta\rangle\, c_{\beta 1}\,|k_\beta\rangle\, c_{\beta 2}\,|k_\beta\rangle$$

Une mesure macroscopique en physique classique revient justement à un grand nombre (dans l'espace et le temps) d'interactions microscopiques et de mesures (quantiques) via par exemple la lecture « à l'oeil » d'un cadran gradué muni d'une aiguille. Dans l'exemple typique ci-dessus, où l'atome ferait partie du système physique soumis à la mesure macroscopique, les nombreuses mesures s'appliqueraient aux photons « visibles » et seraient associées à l'état initial du Système atome + N photons (avec N >> 1) :

$$a\,|\alpha\rangle\, c_{\alpha 1}\,|k_\alpha\rangle\, c_{\alpha 2}\,|k_\alpha\rangle\, c_{\alpha 3}\,|k_\alpha\rangle \ldots c_{\alpha N}\,|k_\alpha\rangle \;+\; b\,|\beta\rangle\, c_{\beta 1}\,|k_\beta\rangle\, c_{\beta 2}\,|k_\beta\rangle\, c_{\beta 3}\,|k_\beta\rangle \ldots c_{\beta N}\,|k_\beta\rangle$$

Faisons l'hypothèse simplificatrice, tout en respectant la normalisation d'état, que par exemple les $|c_{\alpha i}| \sim 1$ alors que les $|c_{\beta i}| << 1$ [i = 1,…,N] (des valeurs autres conduiraient simplement à une convergence de probabilité plus lente et possiblement vers l'autre état final). Ainsi, l'amplitude de probabilité d'obtenir le résultat k_β pour tous les photons tend vers zéro :

$$A_\beta = c_{\beta 1}\, c_{\beta 2}\, c_{\beta 3}\, c_{\beta 4}\, c_{\beta 5}\, c_{\beta 6} \ldots \rightarrow 0$$

et on observe bien que dans cette limite (de système 'augmenté') les photons visibles peuvent être dans l'état $|k_\alpha\rangle$, ce qui est intuitif (une certitude de signal d'information croissante sur l'ensemble incluant les dernières émissions de photons) et signifie que l'atome est lui dans l'état, maintenant *décohérent*,

$$|\alpha\rangle$$

associé à la valeur propre unique et classique, α. L'on retrouve alors, dans cette limite du formalisme quantique, le déterminisme de la mesure macroscopique (pour l'ensemble des atomes du système macroscopique) en physique classique.

b – Pragmatisme des laboratoires

Une possibilité est qu'il existe un *mécanisme*, non encore inclus dans la version standard de la Mécanique quantique (*c.f.* II.1), qui force l'annulation de l'amplitude ci-dessus,

$$A_\beta = c_{\beta 1}\, c_{\beta 2}\, c_{\beta 3}\, c_{\beta 4}\, c_{\beta 5} \ldots c_{\beta N} = 0$$

au-delà d'un seuil de valeur de A_β, suffisamment petit devant 1, donc après un certain nombre N d'interactions de l'atome enrichissant le vecteur d'état initial. Cette annulation réduit alors l'état de l'atome à

$$|\alpha\rangle$$

Cette version de la MQ évite donc la notion de superposition. L'existence d'interactions du système pourrait en effet être inévitable, intrinsèque à la théorie, en tout cas de manière effective et pragmatique au sein du laboratoire encadrant la mesure quantique. L'annulation de A_β met un terme à la régression infinie d'états de particules supplémentaires impliquées dans les interactions successives, appelée chaîne de J.Von Neumann (introduite par ce

dernier afin de décrire les interactions du système avec l'appareil de mesure), au sens où les nouveaux états s'ajoutant n'enrichissent plus un état intriqué. L'annulation de A_β, ou réduction de l'état de l'atome (existence d'une valeur déterminée pour une observable), peut[3] avoir lieu en amont et donc indépendamment d'un observateur, de sorte que cette approche peut se classer, d'un point de vue philosophique, dans le réalisme. Et la valeur physique unique fait partie d'une vérité accessible (*c.f.* 1er tableau) puisque mesurable [depuis le monde perçu et via notre faculté de pensée].

2] Le réel voilé (sans modification des lois quantiques)

Pour B.d'Espagnat, il existe un réel fondamental ne nécessitant pas d'être rapporté à l'Homme, et, donc indépendant de notre appareil sensitif corporel (dont l'appareillage expérimental est le prolongement). Cet auteur se situe ainsi au coeur du réalisme et se rapproche en particulier de la vision du potentiel limité de la raison selon E.Kant en ce que, pour le premier, seules certaines structures générales du réel sont au mieux accessibles à la connaissance humaine. D'où l'appellation de réel voilé pour cette vision ontologique de la Mécanique quantique. Un vecteur d'état superposé ne retranscrit ici au mieux qu'une vision partielle du réel, évitant ainsi tout paradoxe à son égard au prix d'une forme d'ignorance inéluctable.

3] Les variables cachées (ajout d'un potentiel)

Parmi les théories (voir par exemple Wiener & Siegel, Hiley, Holland ou Landé) à 'variables cachées' – dites aussi supplémentaires au sens non présentes dans la description standard de la MQ (*c.f.* II.1) – celle de De Broglie-Bohm est sans doute la plus célèbre. Celle-ci confère un rôle central à l'environnement d'un système physique. Il faut alors définir un état quantique global du Système + Environnement, c'est-à-dire un état de type produit tensoriel décrivant le système lui-même ainsi que chacun des nombreux éléments constituant son environnement direct. Toutes ces composantes introduisent de *nouvelles variables* quantiques les caractérisant que sont notamment leurs positions. Les vitesses associées (v), dites vitesses quantiques, sont définies à partir du courant de probabilité (J) impliquant les fonctions d'onde (Ψ) non normalisées (vitesses de phase), la normalisation se faisant sur l'état global :

$$J \stackrel{\text{def}}{=} -\left|\Psi\right|^2 \frac{dR}{dt} \stackrel{\text{def}}{=} \rho\, v$$

t dénotant le temps et ρ la densité de probabilité de présence, dans le cas à 1 dimension d'espace de coordonnée R. On retrouve ici la vitesse locale de la version hydrodynamique de l'Équation de E.Schrödinger introduite par E.Madelung (en 1927). L'effet de l'environnement (masse générique m) sur le Système intervient dans l'Équation de Schrödinger via l'énergie potentielle additionnelle suivante (sommée sur toutes les composantes),

3 Si c'est la prise de conscience de l'observateur (possiblement via l'effet des courants électriques le long des neurones) qui brise la chaîne de Von Neumann, alors il s'agit de « l'interprétation de Wigner » (la réduction du vecteur d'état est également liée à la conscience humaine et la faculté d'introspection chez London & Bauer).

$$V = \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\Delta |\Psi(R,t)|}{|\Psi(R,t)|}$$

où Δ est l'opérateur laplacien. Ce « potentiel quantique » permet de retrouver les prédictions probabilistes de la description standard de la MQ. Ces probabilités ne font que traduire notre niveau de méconnaissance de l'état du Système *pré-existant* à la procédure de mesure, celui-ci étant fixé au sein de l'état global unique du Système + Environnement via les interactions Système ↔ Environnement (superposition effective et non intrinsèque). Le résultat de la mesure lui ne fait que révéler, mettre en évidence la valeur propre unique associée à cet état propre d'observable antérieur du Système : cette théorie quantique recouvre le déterminisme classique. Ainsi, le système possède des propriétés bien déterminées (position, impulsion, etc) indépendamment de l'observateur, ce qui peut placer cette théorie dans le courant réaliste, avec accession à la vérité (*c.f.* 1er tableau) – par la simple mesure expérimentale.

4] Interprétation modale (ajout de vecteur d'état)

L'Équation de Schrödinger guide l'évolution temporelle des états possiblement superposés d'un système physique, appelés ici « états dynamiques ». Un autre état, dénommé ici « état des valeurs » et ne pouvant être que pur par construction, pourrait lui correspondre à la valeur propre unique mesurable ; l'état des valeurs représente les propriétés physiques du système considéré. On ne peut atteindre cet état déjà attribué à un système qu'au moment de la mesure de ses observables, ce qui classe possiblement cette interprétation dite modale dans le réalisme, avec accessibilité à la vérité (*c.f.* 1er tableau) via une simple mesure en laboratoire. Le formalisme modal permet, comme il se doit, de reconstruire les règles des probabilités de Born afin de ne pas générer de conflit avec l'ensemble des jeux de données expérimentales connus – probabilités reflétant ici juste notre *ignorance* partielle. On doit cette solution astucieuse au problème de la superposition, ne lui conférant qu'un statut formel d'implémentation temporelle, en particulier à B. van Fraassen ; d'autres versions de l'interprétation modale (Kochen, Dieks et Healey) relient les états dynamiques et les états des valeurs grâce à la décomposition bi-orthonormale (décomposition de Schmidt).

5] Modification de l'Équation de Schrödinger (ajout d'un terme)

En plus de décrire la dynamique temporelle, l'Équation de Schrödinger pourrait incorporer, induire la *réduction* du vecteur d'état (voir par exemple Pearle, ou encore Ghirardi, Rimini et Weber (GRW), pour des modèles sans variables supplémentaires prises au sens de la Section 4 précédente). Cette réduction pourrait se produire à des moments récurrents (entre lesquels une superposition indéfinie physiquement subsisterait) mais aléatoires suite aux conditions expérimentales microscopiques non reproductibles. Il pourrait donc exister un terme additionnel dans l'Équation de Schrödinger de nature fluctuante, stochastique. Dans ce contexte, l'observation ne jouerait alors plus de rôle particulier autre que de capter, mettre en évidence des propriétés physiques déjà bien définies via l'Équation de

Schrödinger, à certains instants seulement. La présente approche peut donc être qualifiée de réaliste, dans une version du réalisme avec vérité connaissable (*c.f.* 1er tableau). Plus concrètement, par exemple dans le modèle de GRW, des « localisations spontanées » ont lieu dans l'espace, des sauts brusques récurrents avec une précision imparfaite[4] (certaine largeur de la fonction d'onde piquée en un point) mais ne permettant pas de superposition au niveau macroscopique (décohérence spatiale assurée du même coup). Les probabilités de localisation obtenues dans ce modèle sont normalisées sur tout l'espace [plus précisément sur les positions possibles r_j indicées par l'entier j] avec une amplitude plus élevée dans les régions où le système ponctuel a déjà une plus forte probabilité de présence, ce qui a pour effet de le localiser à terme en un point – lui ajoutant successivement des résonances (pics) sur sa fonction d'onde restant normalisée au cours du temps. L'implémentation de ce modèle dans l'Équation de Schrödinger se réalise via le nouveau terme ci-dessous,

$$i\hbar \frac{d\rho(t)}{dt} = \lambda \sum_j [F_j \rho(t) F_j - \rho(t)] + [H, \rho(t)]$$

où t désigne le temps, λ une probabilité par unité de temps, H l'Hamiltonien, $F_j(r)$ l'opérateur localisant (par exemple une courbe gaussienne en r centrée en r_j) la fonction d'onde $\langle r | \psi(t) \rangle$ et $\rho(t)$ l'opérateur densité :

$$\rho(t) = |\psi(t)\rangle\langle\psi(t)|$$

Cette équation correspond à l'Équation de Schrödinger (dans sa version impliquant l'opérateur densité $\rho(t)$ plutôt que l'état associé $|\psi(t)\rangle$) à laquelle a été ajouté le terme qui succède juste au symbole d'égalité. Ce terme représente une évolution temporelle possible de $\rho(t)$ vers $F_j|\psi(t)\rangle\langle\psi(t)|F_j$. Notons qu'il existe des extensions continues du modèle GRW, au prix de nouveaux termes encore, et même relativistes (ainsi qu'en théorie quantique des champs). De plus, la réalisation de la localisation spontanée de GRW pourrait trouver son origine dans la gravité (Diosi) via une localisation stochastique de la masse – dont l'intensité serait proportionnelle à la constante universelle de gravitation (G) de I.Newton. Cette voie rejoint celle de R.Penrose qui écrivait : « le seuil quantique de la gravité qui produit une auto-réduction du vecteur d'état joue un rôle vis-à-vis de la conscience » – possibilité plus générique donc d'une réduction du paquet d'onde par des effets de Relativité Générale (voir aussi Bricmont). Enfin, une possibilité expérimentale de (in)valider le modèle GRW serait la détection du faible effet de chauffage [atomes excités rayonnant] spontané prévu par les localisations spontanées mêlées à la dynamique temporelle (amenant même des questions sur la conservation de l'énergie lorsque combinées à des réductions d'états d'impulsions).

6] Familles cohérentes (ajout d'opérateurs)

Considérons un état initial au temps t_0 associé à l'opérateur densité

4 Mais inférieure à l'incertitude expérimentale de la nouvelle 'mesure' (devenue simple prise de donnée) afin de pouvoir retrouver un résultat unique – comme dans toute expérience.

$$\rho(t_0) = |\psi(t_0)\rangle\langle\psi(t_0)|$$

La probabilité $P(\mathcal{E}_1\mathcal{E}_2\mathcal{E}_3\ldots)$ que cet état appartienne au sous-espace de Hilbert $\mathcal{E}_1$ au temps t_1 puis au sous-espace $\mathcal{E}_2$ au temps t_2 etc peut être obtenue par la combinaison d'amplitudes de transitions et constitue finalement la formule de Wigner :

$$P(\mathcal{E}_1\mathcal{E}_2\mathcal{E}_3\ldots) = \mathrm{Tr}\{\ldots P_3(t_3)\, P_2(t_2)\, P_1(t_1)\, \rho(t_0)\, P_1(t_1)\, P_2(t_2)\, P_3(t_3)\ldots\}$$

où $P_i(t_i)$ est le projecteur orthogonal [de type $\sum_{k=1}^{D} |u_k\rangle\langle u_k|$ à un instant donné] dans $\mathcal{E}_i$ – de dimension D – au temps t_i (dépendance temporelle dans l'opérateur selon le point de vue de Heisenberg). La somme des probabilités, plutôt que des amplitudes, peut être bien normée,

$$\sum_{\{\mathcal{E}\}} P(\mathcal{E}_1\mathcal{E}_2\mathcal{E}_3\ldots) = 1$$

si l'on ne considère en effet que les « histoires cohérentes » c'est-à-dire les états consécutifs n'étant pas des combinaisons linéaires d'états appartenant à des sous-espaces $\mathcal{E}_i$ différents. L'ensemble des histoires cohérentes forme, par définition (Griffiths puis Omnès et Gell-Mann), une famille cohérente (définie donc par un ensemble de temps et d'un 'découpage' spécifique plus ou moins précis de l'espace pour chacun de ces temps). Les états successivement projetés constituant ces histoires, ayant la vertu de ne pas être des superpositions, pourraient représenter les véritables états du système à considérer au cours du temps et les projecteurs associés (hermitiens) des observables 'physiques' – aux valeurs propres 1 pour chacun de ces états à un temps donné et 0 pour tout état de l'espace complémentaire en question. À remarquer néanmoins que lors de la transition entre deux espaces consécutifs, seule une partie du vecteur d'état projeté subsiste, mais sans que cela n'apparaisse tout-à-fait explicitement et formellement dans l'expression de $P(\mathcal{E}_1\mathcal{E}_2\mathcal{E}_3\ldots)$. Quant aux séries de mesures (aux amplitudes de probabilité génériques bien normalisées) possibles 'en parallèle' des projections, entre des mêmes temps initial t_0 et final t_N, celles-ci sont dictées par le formalisme usuel de la MQ, de manière compatible avec les résultats expérimentaux obtenus sur les positions, impulsions… représentant elles une catégorie d'observables habituelles. Ces séries de mesures doivent avoir une certaine correspondance avec les projections successives – correspondance notamment fixée par le choix de la classe de famille cohérente adéquate. En conclusion, les véritables états quantiques d'un système au cours d'une période donnée, période de réalisation générale de mesures successives (période comprenant donc notamment les phases antérieures aux mesures), sont systématiquement définis de manière univoque (sans superposition), ce qui justifie ici une approche réaliste. Il s'agit plus précisément de la version du réalisme avec vérité inconnaissable puisque les états 'pré-mesure' sont possiblement des combinaisons linéaires d'états propres des observables mesurables (habituelles).

7] Univers multiple (nouvelles applications des lois quantiques)

Le postulat de réduction du paquet d'onde est évité si l'on (sup)pose que chacune des valeurs, associées à tous les vecteurs d'état d'une combinaison linéaire, est effectivement obtenue lors d'une mesure (Everett, Graham, Saunders, Wallace et approche adoptée par

DeWitt pour qui : « le formalisme mathématique de la théorie quantique est capable de fournir sa propre interprétation »). La superposition quantique est alors véritablement réalisée (!). Il faut alors faire l'une des deux hypothèses fortes suivantes.

(i) Soit l'observateur possède lui-même plusieurs 'composantes' (comme une *conscience* et plusieurs *inconscient*s), chacune révélant l'un des résultats quantitatifs mais ne pouvant le communiquer aux autres composantes – donnant bien l'impression d'un résultat unique dans toute expérience. Et la probabilité d'obtenir un certain résultat est ici interprétée comme la probabilité de se situer dans une certaine composante. Ainsi, la répétition d'une même mesure d'observable sur un système préparé de manière identique génère toujours plusieurs résultats selon la loi de probabilité de Born [déterminisme pour une composante donnée mais non pour l'observateur], mais des résultats variés s'interprétant maintenant via des changements de composantes pour l'observateur. Dans une composante, l'acte de mesure ne fait que révéler un résultat (valeur propre) associé à un vecteur (propre) d'état pré-existant vis-à-vis de la procédure de mesure – puisque tous les vecteurs propres revêtent ici une réalité après et donc également avant la mesure (par continuité usuelle des états). Par conséquent, on peut se trouver dans une vision réaliste avec vérité indépendante accessible. Il s'agit-là de l'interprétation dite des « multivers », dans un monde restant unique.

(ii) Soit ces diverses composantes sont en fait des univers différents et la description ci-dessus est transposée en conséquence. Il s'agit alors de l'« interprétation des mondes multiples ». Ce scénario représente une réalisation de mondes parallèles permettant de contourner partiellement le « principe anthropique fort » (= réglage des constantes fondamentales de la nature dans l'objectif d'une apparition de la vie) : chaque univers parallèle peut correspondre à une valeur possible (associée à un état d'une combinaison linéaire dont le nombre de termes peut augmenter avec les assemblages d'atomes et autres interactions implémentées dans l'équation de Schrödinger) des nombreuses observables (les résultats des mesures humaines correspondant à des sous-classes de l'ensemble complet d'univers) et la probabilité est grande que dans au moins quelques univers la vie apparaisse bien. Nous sommes par définition dans l'un de ceux-ci. Néanmoins ici les constantes fondamentales elles permettent l'émergence d'organismes vivants dans au moins un univers ; un contournement plus radical du principe anthropique fort serait que les valeurs de ces constantes fondamentales soient distribuées au hasard parmi un grand nombre d'univers parallèles de telle sorte que la probabilité d'apparition de la vie dans l'un d'eux soit élevée. Notons enfin que dans le contexte de la recherche en cosmologie, surgit aussi parfois [questions de la matière/énergie noire, des transitions de phase, de l'inflation,...] l'idée de la présence de plusieurs univers (aux conditions physiques différentes) mais correspondant plutôt à différents domaines d'un monde unique.

Les deux interprétations ci-dessus doivent, d'une manière ou d'une autre, avoir un caractère collectif au vu de l'universalité des expériences/expérimentations scientifiques reproductibles. Cette universalité est par exemple explicitement respectée dans la version de multivers appelée solipsisme [philosophie selon laquelle la seule réalité est le sujet pensant lui-même, donc lié à ses observations] convivial (Zwirn).

IV) Les interprétations idéalistes et compatibles

1] Interprétation statistique (sans modification des lois quantiques)

Le module du coefficient en facteur d'un vecteur d'état, au sein d'une combinaison linéaire d'états, peut être décrit exclusivement comme la racine carrée de la probabilité normalisée [= nombre de cas / nombre total de mesures] de mesurer la valeur propre associée (d'une observable donnée), soit, une fois multipliée par le nombre de mesures effectuées dans un laboratoire (sur un *type* de système préparé dans des conditions identiques), le nombre de fois où cette valeur doit être obtenue comme résultat. Ainsi, le sens donné à une superposition quantique peut être de nature purement statistique et caractériser un ensemble de systèmes étudiés, au lieu d'un système unique. Le paradoxe de la superposition d'états disparaît donc de par son application conceptuelle à un ensemble de systèmes. A.Einstein, qui était un partisan de cette vision « ensembliste », écrit dans une lettre à E.Schrödinger : « la fonction Ψ ne décrit pas l'état d'un système unique mais (statistiquement) un ensemble de systèmes ». Vision qui ne spécifie aucunement la nature de la réalité d'*un* système antérieurement à la mesure (empirique) et peut donc tout aussi bien se classer dans le réalisme que dans les diverses variantes de l'idéalisme.

2] Point de vue informationnel pur (sans modification des lois quantiques)

Le vecteur d'état peut être vu comme contenant, donnant une information accessible sur le système et non un élément de réalité caractérisant ses propriétés [impulsion, spin…] (comme le 'Quantum Bayesianism (QBism)' de Fuchs, Schack, Mermin). La superposition quantique est bien possible mais n'induit alors plus de conflit logique. L'aspect probabiliste de la théorie ne fait plus que quantifier et paramétrer une ignorance, sans révéler un comportement aléatoire (ou autre) intrinsèque au système. La réduction du vecteur d'état n'est plus qu'un affûtage de la connaissance. Néanmoins, le vecteur d'état, quoique 'mental', continue à concerner un système physique unique. Ce point de vue laisse ouverte la question ontologique sur la réalité de l'objet, sans trancher entre le réalisme et l'idéalisme. Faut-il abandonner tout espoir que les sciences physiques nous apprennent quelque chose sur l'essence du monde réel ? Dans ces écrits des premières heures, W.Heisenberg adoptait une approche assez proche du point de vue purement informationnel, avant, plus tard, de nuancer ses propos.

3] Interprétation des corrélations (sans modification des lois quantiques)

La Mécanique quantique est considérée ici comme une description théorique de nature stochastique (caractère aléatoire) fournissant en effet des probabilités associées à des résultats de mesure, mais il n'y a pas de réalité (existence) du système avant sa mesure, y compris lors d'une série de mesures intermédiaires – aux résultats *corrélés* formellement par les états successivement projetés du système étudié [état final d'une mesure = état initial de la suivante]. Par exemple, si un photon est capté après son passage dans une fibre optique,

son parcours ne recouvre pas de réalité physique (ou bien représente une question superflue dans une version moins drastique de cette interprétation ressemblant alors davantage à un modèle effectif). Il n'est alors plus utile de se questionner physiquement sur le concept de superposition d'états ni donc sur le postulat de réduction de fonction d'onde ('saut discontinu'), notions qui deviennent de simples artefacts du formalisme. Dans le sens où n'existe que ce qui est observé dans le monde empirique, cette interprétation, dite des *corrélations*, correspond à la vision hautement idéaliste de J.G.Fichte se passant tout simplement du « noumène ».

V) Sur la non-localité

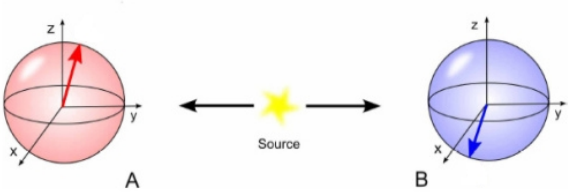
1] Théorème EPR

a – Expérience de pensée

Considérons deux particules de spin 1/2 constituant un système global dans un l'état singulet de spin (de type produit tensoriel avec les deux états par ordre de particule)

$$|\psi_s\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|+\rangle|-\rangle - |-\rangle|+\rangle \right)$$

dit état intriqué. $|+\rangle$ ($|-\rangle$) Représente un état propre de valeur propre $+\hbar/2$ ($-\hbar/2$) de l'observable projection du spin le long d'un axe (Oz). Ces deux particules sont émises dans des directions opposées puis, une distance finie [non nulle] entre elles ayant été atteinte, l'on mesure leur spin respectif grâce à des appareillages de type Stern & Gerlach mesurant les projections du spin selon un axe faisant un angle *a* avec (Oz) pour l'une et un angle *b* pour l'autre. De par l'intrication, et négligeant l'effet d'évolution temporelle par simplicité (sans impact sur la discussion), la mesure par exemple de la valeur $+\hbar/2$ le long de (Oz) pour l'une des deux particules [projection de l'état singulet] donne immédiatement avec certitude l'information à l'expérimentateur que l'état de l'autre particule – se trouvant pourtant à une distance non nulle de lui – est l'état propre $|-\rangle$ de valeur propre $-\hbar/2$ (résultat assuré à 100% d'une possible mesure). Il existe de même des corrélations entre les probabilités de mesure des projections de spin pour les deux particules dans des directions caractérisées par les angles *a* et *b* respectivement. Ces conclusions, souvent présentées comme un paradoxe (EPR), violent, de manière plus précise, la loi relativiste (classique) d'une transmission d'information ne pouvant être instantanée, bien qu'ici aucun système physique ne se soit propagé à une vitesse (infinie) supérieure à celle de la lumière dans le vide.



b – Non-séparabilité et causalité

La MQ semble donc ne pas être « locale ». Même la « localité » non-relativiste [l'influence physique décroît avec la distance ; notion purement spatiale elle] n'est pas respectée dans ce cas de figure. Cette non-localité quantique provient d'une « non-séparabilité » : des systèmes quantiques distincts ayant interagi peuvent ne plus posséder certaines propriétés physiques propres, individuelles et faire alors partie d'un système quantique global (avec de nouvelles propriétés) les réunissant. À noter que la non-séparabilité quantique est différente de la non-séparation géographique.

Il existe aussi le principe de « causalité » (phénomène, appelé cause, précédant l'effet) en sciences physiques, qui peut être interrogé en MQ du point de vue du non-déterminisme, comme du point de vue temporel puisque certaines expériences paraissent montrer qu'un 3ème expérimentateur mesurant une polarisation de photon (dans un état superposé) ne peut distinguer entre, le scénario où le photon a d'abord été manipulé par un 1er avant d'être envoyé chez un 2ème, et, le scénario inverse.

c – Le théorème

MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

La conclusion qui précède peut être formulée de manière plus générale selon (Laloë) le Théorème d'Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) qui s'énonce comme suit, et définit le contexte du « réalisme local ».

Si toutes les prédictions de mécanique quantique sont correctes (même pour des systèmes constitués de plusieurs particules éloignées) et si la réalité physique peut être décrite dans un cadre local (ou séparable), alors la mécanique quantique est nécessairement

incomplète : il existe dans la Nature des « éléments de réalité » qui sont laissés de côté par cette théorie.

Nous synthétisons ce théorème dans le tableau ci-dessous, qui sera également utile pour la suite.

2 interprétations de l'expérience EPR	1) Localité & éléments de réalité $\Rightarrow$	$-2 \leq \langle C \rangle \leq +2$ (Bell)
	2) Non-localité de MQ complète $\Rightarrow$	$-2\sqrt{2} \leq \langle C \rangle \leq +2\sqrt{2}$

2] Inégalités de Bell

Appelons $A(a,\lambda)$ et $B(b,\lambda)$ les résultats [valeurs ± 1 en unités de $\hbar / 2$] de la mesure des projections respectives de spin des deux particules de l'expérience EPR (*c.f.* V.1.a). Ces résultats dépendent bien des angles a,b de projection ainsi que possiblement d'éléments de réalité notés λ (pouvant dénoter un ensemble de paramètres) qui implémentent et doivent expliquer les corrélations entre les mesures associées aux deux particules à distance finie l'une de l'autre (*c.f.* V.1.c). Les éléments de réalité peuvent être liés à des variables cachées (*c.f.* III.3). Considérons maintenant la combinaison (Eberhard) de résultats suivante,

$$C = AB - AB' + A'B + A'B' = A\,(B-B') + A'\,(B+B')$$

impliquant quatre directions de mesure dans ces notations compactes :

$$A \equiv A(a,\lambda),\ \ A' \equiv A(a',\lambda'),\ \ B \equiv B(b,\lambda),\ \ B' \equiv B(b',\lambda')$$

C étant comprise entre les valeurs -2 et +2, sa moyenne sur un certain nombre de quadruplets de mesures, et donc sur $\lambda^{(')}$, l'est aussi :

$$-2 \leq \langle C \rangle \leq +2$$

Il s'agit d'une inégalité (non originelle) de J.S.Bell, celle sous la forme dite BCHSH (Bell, Clauser, Horne, Shimony et Holt), obtenue sous l'hypothèse de la localité (notamment b, représentant plus génériquement un paramètre de mesure, n'a aucune influence instantanée sur A) – et extensible au cas non-déterministe. Or le même calcul au sein de la version standard de la MQ, basé sur les moyennes d'observables et en l'absence d'éléments de réalité (additionnels), prédit plutôt l'intervalle suivant [reporté également dans le tableau de la Section V.1.c],

$$-2\sqrt{2} \leq \langle C \rangle \leq +2\sqrt{2}$$

Cette d'amplitude (facteur $\sqrt{2}$) de violation de l'inégalité de Bell est maximale d'un point de vue théorique (Théorème de Cirel'son) pour un sytème quantique composé de deux sous-systèmes physiques, quelle que soit la série de mesures envisagées sur ces sous-systèmes et

l'état initial du système global. Le théorème de J.S.Bell comprend d'autres inégalités [inégalités de Wigner, inégalité de Mermin] et il existe même d'autres conflits théoriques discriminatoires [Théorème de Bell et Kochen & Specker sur les variables supplémentaires « contextuelles » (*i.e.* dont la valeur dépend d'autres observables *compatibles* mesurables donc simultanément sur le même système), contradictions GHZ (Greenberger, Horne et Zeilinger) au-delà des spins, impossibilités de Hardy sur l'occurrence de certains événements, inégalité de Cabello] entre les versions de la MQ avec (variante locale) et sans (non-locale) éléments de réalité. Dans la version locale de la MQ, une explication possible des corrélations à distance pourrait par exemple reposer sur des états 'pris' par les particules dès leur émission initiale puis seulement révélés plus tardivement lors des mesures, de sorte que l'information sur l'autre particule ne serait obtenue que de manière déductive en raisonnant sur un passé commun (une certaine mémoire contenue dans λ) – sans qu'il n'y ait besoin d'invoquer un transfert d'information instantané.

3] Expériences d'A.Aspect

Il se fait que des expériences (Kocher & Commins) sur des polarisations de photons – générant des corrélations semblables à celles sur les spins de deux fermions – ont tranché en faveur d'une violation des inégalités de Bell. Cette conclusion fût confirmée (Freedman & Clauser) par d'autres procédés mettant en jeu des analyseurs de Stern & Gerlach non parallèles ($a \neq b$). Dans les années 1980, l'équipe d'A.Aspect confirma ces résultats de manière 'spectaculaire' (déviation par rapport à la prédiction de Bell à 15 écarts standards !) et montra même que la distance entre la source et les détecteurs n'a aucun effet sur les corrélations concernant les mesures des divers polarisations, comme prédit par la MQ standard [sans éléments de réalité]. D'autres expériences ont suivi, excluant toujours les éléments de réalité. La MQ aurait ainsi une forme standard et un caractère non-local (*c.f.* tableau de la Section V.1.c). Bien sûr des scénarios ont encore émergé de l'imagination des physiciens pour tenter d'échapper (« loopholes ») à cette conclusion.

4] Ordre implicite de D.Bohm

D.Bohm a développé une version de la MQ fondée en particulier sur la non-localité : une vision cosmique ultra-holistique dans laquelle chaque composante de l'univers est en fait connectée à toutes les autres (via le potentiel quantique) dans une sorte d'océan d'énergie – c'est un ordre implicite. L'espace et le temps font ici partie d'un ordre lui explicite mais illusoire. À noter que l'espace-temps, non fondamental, émerge aussi à un autre niveau dans le modèle de haute énergie des mousses quantiques (Wheeler) ou bien dans certaines philosophies idéalistes (Whitehead & Russell) et possiblement au sein de la conscience humaine pour le temps (Bergson).

VI) Conclusion

De nos jours, concernant le sens précis du vecteur d'état et sa possible nature superposée, aucune interprétation (philosophique) particulière de la Mécanique quantique, ni aucune extension formelle possible, n'a émergé et obtenu un consensus quasi-unanime au sein de la communauté des physiciens. De nouveaux développements théoriques ou bien de nouvelles données expérimentales seront nécessaires afin de départager les diverses approches *essentielles*, parfois incompatibles entre elles, ou d'en élaborer une inédite. Diverses approches témoignant en tout cas de l'inventivité, de l'ingéniosité, de l'intelligence collective de la communauté élargie des physiciens et philosophes.

***