

Le problème de la mesure quantique

Christian Wüthrich

<http://www.wuthrich.net/>

BA7 Introduction à la philosophie de la physique: mécanique quantique

Remerciements pour la traduction et des commentaires: Augustin Baas

Plus de Bohriana



Jan Faye, 'Copenhagen interpretation of quantum mechanics', *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.



Niels Bohr, 'On the notions of causality and complementarity', *dialectica* 2 (1948): 312-319.

- Reprenons et reconsidérons certains des aspects de ce que l'on a dit sur Bohr: la correspondance, la complémentarité et l'effondrement.
- Cela nous aidera à établir le problème de la mesure.
- **Interprétation de Copenhague** \neq la complémentarité selon Bohr (bien que les deux soient étroitement reliées)
- Interprétation de Copenhague: interprétation standard, établie par Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac, von Neumann, avec une dénomination proposée par Heisenberg en 1955
- Pendant très longtemps elle fut la perspective dominante, mais à présent ce n'est plus le cas au sein de celles et ceux qui travaillent sur les fondations (elle reste probablement dominante chez les physiciens).

À nouveau le principe de correspondance

- À l'origine, le **principe de correspondance** était une règle selon laquelle une transition entre états stationnaires des électrons dans un atome est permise ssi il y a une composante harmonique dans le mouvement classique.
- Puis elle statua que les fréquences de radiation dues aux transitions entre des états stationnaires avec un grand nombre quantique coïncident approximativement avec les fréquences de l'électrodynamique classique.
- Plus généralement, c'est l'**exigence méthodologique** que la MQ (ou une théorie de l'atome) doit donner des prédictions pour les grands nombres quantiques qui sont relativement proches de celles de la physique classique.
- spin de l'électron \Rightarrow pas d'analogie classique \Rightarrow limitation du principe de correspondance

La complémentarité à nouveau

- deux types d'ensembles complémentaires de description: onde-particule et position-quantité de mouvement (ou toute paire d'observables non-commutatifs)
- Le point crucial est que deux descriptions sont convoquées (une dans chaque expérience, dépendant du montage expérimental), qui portent sur des propriétés du système considéré distinctes mais incompatibles classiquement.
- Cependant, la complémentarité onde-particule est tacitement abandonnée car par exemple dans l'expérience des fentes doubles où la figure d'interférence (\Rightarrow onde) se manifeste dans des points (\Rightarrow corpuscule), i.e. on n'a pas besoin de montages expérimentaux différents pour mettre en évidence la dualité.
- Par la suite, Bohr caractérise des observables non-commutatifs, tels que la position et la quantité de mouvement, que comme **complémentaires** (cf. aussi l'article *dialectica*).

Thèse (La thèse de Bohr sur l'indéfinibilité)

The "truth conditions of sentences ascribing a certain kinematic or dynamic value to an atomic object are dependent on the apparatus involved, in such a way that these truth conditions have to include reference to the experimental setup as well as the actual outcome of the experiment." (Faye, Sec. 4)

- ⇒ Faye: pas d'effondrement de la fonction d'onde pour Bohr (car une condition nécessaire de l'effondrement serait de lui donner une «représentation picturale», ce que Bohr dénie vigoureusement)
- Mais: peut-être pas littéralement d'effondrement, mais assurément un effondrement est requis dans la «représentation» (et peut être plus), afin de ne pas exposer les descriptions de la MQ à la critique d'être incomplètes!
- Aussi de nos jours, Bohr est souvent considéré comme un **réaliste des entités**, opposé au **réalisme des théories** (plutôt qu'un simple positiviste).
- ⇒ Le réalisme au sujet de ψ ⇒ On a besoin de l'effondrement

La conception mature de Bohr

- La pratique scientifique présuppose une pratique de la description, pratique qui est pré-scientifique, utilise des catégories communes, et est inscrite dans le langage ordinaire.
- Les concepts de la physique classique sont plutôt des caractérisations exactes de ces catégories communes.
- ⇒ Les concepts classiques sont nécessaires dans toute description d'une expérience physique ou dans un compte-rendu d'une observation.
- La MQ requiert une révision radicale de ces concepts.
- Dans une expérience quantique, l'utilisation des concepts classique ne fait pas références à des propriétés indépendantes de l'objet, indépendamment du montage expérimentale.
- Il y a une interaction non-contrôlée entre l'objet et les appareils.

- “The quantum mechanical description of the object differs from the classical description of the measuring apparatus, and this requires that the object and the measuring device should be separated in the description.” (Faye, Sec. 4)
- ψ ne doit pas être interprétée «littéralement», mais comme l'expression d'une amplitude de probabilité des résultats de mesures (comme Bohr l'avait suggéré).
- Complémentarité: les manifestations d'un phénomène peuvent dépendre des mesures mutuellement exclusives
- L'information acquise grâce à des expériences complémentaires épuise la connaissance objective possible que nous pouvons avoir des objets quantiques.

Copenhague aujourd'hui

- 1 indéterminisme
- 2 réduction de la fonction d'onde, effondrement dynamique
- 3 principe de correspondance de Bohr
- 4 interprétation statistique de Born de la fonction d'onde
- 5 complémentarité de Bohr

Article *dialectica* de Bohr



Niels Bohr, 'On the notions of causality and complementarity', *dialectica* 2 (1948): 312-319.

Considérons quelques citations de l'article *dialectica* de Bohr pour mettre en évidence une tension dans la façon de penser de Copenhague. Bohr commence par expliquer comment la dualité onde-particule montre de quelle façon la manière classique de penser ne fonctionne plus en physique atomique. Puis il continue:

"... it must above all be recognized that, however far quantum effects transcend the scope of classical physical analysis, the account of the experimental arrangement and the record of the observations must always be expressed in common language supplemented with the terminology of classical physics. This is a simple logical demand, since the word 'experiment' can in essence only be used in referring to a situation where we can tell others what we have done and what we have learned.

"The very fact that quantum phenomena cannot be analysed on classical lines thus implies the impossibility of separating a behaviour of atomic objects from the interaction of these objects with the measuring instruments which serve to specify the conditions under which the phenomena appear." (313)

Alors il entreprend d'expliquer la complémentarité des observables non-commutatifs, comme on l'a déjà vu. Un peu après il écrit:

"[I]t is, of course, to a certain degree a matter of convenience to what extent the classical aspects of the phenomena are included in the proper quantum-mechanical treatment where a distinction in principle is made between measuring instruments, the description of which must always be based on space-time pictures, and objects under investigation, about which observable predictions can in general only be derived by the non-visualizable formalism." (315)

Finalement il affirme que:

"[T]he observational problem in atomic physics is free of any special intricacy, since in actual experiments all evidence pertains to observations obtained under reproducible conditions and is expressed by unambiguous statements referring to the registration of the point at which an atomic particle arrives on a photographic plate or to a corresponding record of some other amplification device." (317)

⇒ Ainsi il est évident que Bohr ne pensait qu'il y avait un problème de la mesure...

Fuchs et Peres: pas de besoin d'une «interprétation»



C. Fuchs and A. Peres, "Quantum theory needs no 'interpretation' ", *Physics Today*, March 2000, 70-1.

- Ils affirment «une cohérence interne d'une "interprétation sans interprétation" de la mécanique quantique». (70)
- Il n'est pas forcé qu'une réalité plus profonde et indépendante puisse être déduite d'une description concise des résultats expérimentaux.
- Trait commun à toutes les interprétations: désir d'identifier une telle réalité profonde et indépendante (que ce soit par des variables cachées, des mondes multiples, un effondrement spontané, etc.)
- Toutes ces interprétations n'augmentent pas le pouvoir prédictif de la théorie et doivent être rejetées comme non-nécessaires.
- La seule interprétation toujours nécessaire: la MQ ne fournit seulement qu'un «algorithme pour calculer des **probabilités** pour les événements macroscopiques (les "clics" d'un détecteur), qui sont les conséquences de nos interventions expérimentales.» (70)



*"What do you mean, 'a quantum fluctuation?'
Didn't we discuss cause and effect?"*

- Fuchs & Peres affirment la règle de Born, le lien vecteur propre - valeur propre, et la complétude de la fonction d'onde
- interprétation des probabilités: «formulation quantitative de la manière de prendre des décisions rationnelles quand on a affaire à de l'incertitude» (70)
- Ils ne nient pas la **possibilité** d'une réalité indépendante, au moins à un niveau macroscopique.
- Mais aucune «réalité microscopique» ne peut être décrite par la MQ ou «par n'importe quelle théorie raisonnable». (70)

- Pour soutenir cette conclusion, ils citent le théorème de Bell.
- Mais (comme ils le reconnaissent), le théorème évacue les théories à VC locales, pas les théories à VC tout court.
- Ils semblent croire qu'une théorie à VC non-locales, comme celle de Bohm, donneraient lieu à des «paradoxes logiques d'auto-référence bizarres» (70).
- Si la MQ s'applique à l'univers entier, et si la «"fonction d'onde de l'univers" doit donner une description complète de tout, y compris nous-mêmes, alors nous retrouvons les mêmes paradoxes qui n'ont aucun sens» (70).
- Mais ils réaffirment que le monde est quantique («En principe rien ne nous empêche de quantifier un collègue par exemple.» (71)).
- Est-ce que cela signifie qu'ils pensent que la MQ est in fine incomplète?

Incomplétude?

- L'histoire de Cathy (expérimentateur) et Erwin (théoricien) renforce cette suspicion (ou une suspicion d'un positivisme relativiste extrême): la fonction d'onde n'est que une «formule mathématique pour évaluer les probabilités et dépend de la connaissance de celui qui fait le calcul» (71)
- ⇒ Ce n'est pas un fait objectif quelle fonction d'onde soit la description correcte d'un système.
- **Question:** est-ce qu'il y des faits, par exemple à propos de l'état Cathy lorsque, d'après Erwin, elle est dans une superposition d'états 50/50, ayant soit un gâteau, soit un fruit dans son estomac?
- S'il en est ainsi: la MQ est incomplète car elle ne nous dit rien sur ces faits.
- Si non: comment peut-on avoir des résultats de mesure déterminés?
- Fuchs & Peres semblent penser que c'est le cas: «Elle sait [mieux que Erwin].» (71)

- De plus, ils affirment que «attribuer une réalité aux états quantiques entraîne une quantité de “paradoxes quantiques”», et devrait donc être évité, et que l' «effondrement est quelque chose qui a lieu dans notre description du système, pas dans le système lui-même.» (71)
- Toutes ces affirmations signifient **SOIT** qu'ils croient que la MQ est incomplète (bien qu'ils le nient), et dans ce cas nous avons besoin d'une théorie à VC, **SOIT** qu'il n'y a simplement pas de réalité derrière la description de la MQ, et dans ce cas Cathy est en effet dans une superposition d'états, **SOIT** que la réalité est fragmentée, et alors il y a des choses qui en principe ne sont pas des faits pour Erwin, mais des faits pour Cathy...
- Quelque soit la position retenue, elle constitue une **interprétation de la MQ**, ce qu'ils nient explicitement.
- Cela n'est pas surprenant, puisque **le problème de la mesure oblige de choisir une interprétation...**

Le mystère de la mesure



Feynman, R. P., 'Simulating physics with computers', *International Journal of Theoretical Physics* 21 (1982): 467-88.

"[We] always have had (secret, secret, close the doors!) we always have had a great deal of difficulty in understanding the world view that quantum mechanics represents. At least I do, because I'm an old enough man that I haven't got to the point that this stuff is obvious to me. Okay, I still get nervous with it... you know how it always is, every new idea, it takes a generation or two until it becomes obvious that there is no real problem. It has not yet become obvious to me that there's no real problem. I cannot define the real problem, therefore I suspect there's no real problem, but I'm not sure there's no real problem." (471)

Le chat de Schrödinger

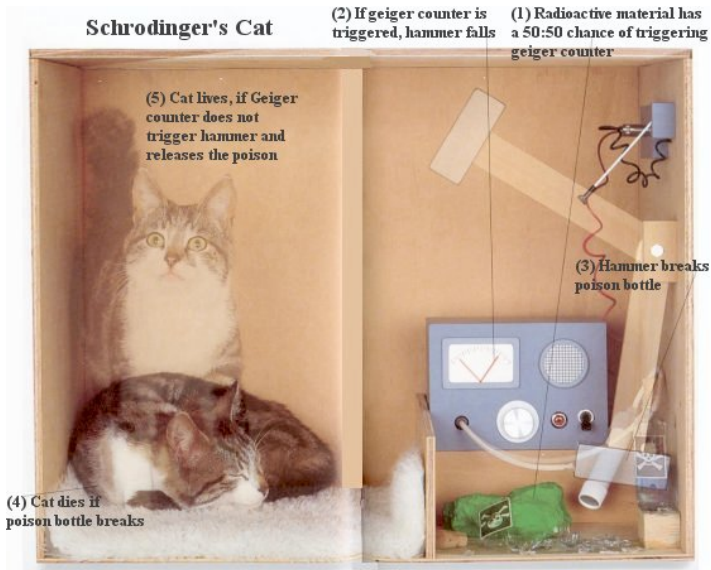


Schrödinger, E., 'Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik' ('The present situation in quantum mechanics'), *Naturwissenschaften* 23 (1935): 807-812; 823-828; 844-849.

"One can even set up quite ridiculous cases. A cat is penned up in a steel chamber, along with the following device (which must be secured against direct interference by the cat): in a Geiger counter there is a tiny bit of radioactive substance, so small, that perhaps in the course of the hour one of the atoms decays, but also, with equal probability, perhaps none; if it happens, the counter tube discharges and through a relay releases a hammer which shatters a small flask of hydrocyanic acid. If one has left this entire system to itself for an hour, one would say that the cat still lives if meanwhile no atom has decayed. The psi-function of the entire system would express this by having in it the living and dead cat (pardon the expression) mixed or smeared out in equal parts.

"It is typical of these cases that an indeterminacy originally restricted to the atomic domain becomes transformed into macroscopic indeterminacy, which can then be resolved by direct observation. That prevents us from so naively accepting as valid a 'blurred model' for representing reality. In itself it would not embody anything unclear or contradictory. There is a difference between a shaky or out-of-focus photograph and a snapshot of clouds and fog banks."

Schrodinger's Cat





Barrett, J., *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Sec. 2.5, particularly pp. 43f.

- Après exactement une heure, le chat est dans l'état de superposition:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{vivant}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{mort}\rangle, \quad (1)$$

mais avoir un objet macroscopique comme un chat dans un état de superposition semble bizarre...

- Ainsi, nous pourrions insister sur les résultats de mesure déterminés (et la dynamique linéaire), mais cela voudrait dire que l'état quantique (la fonction d'onde) du chat n'est pas complète (c'est un fait que le chat est soit mort soit vivant).
- Orthodoxie de Copenhague: Le fait d'observer provoque l'effondrement de la superposition d'un des deux termes, faisant que le chat est définitivement soit mort soit vivant.
- D'une certaine manière c'est le fait d'ouvrir la boîte qui cause l'effondrement.
- OK, mais ça va devenir encore plus bizarre...

Eugene Wigner (1902-1995) et son ami



- Physicien et mathématicien hongrois, fui aux E.U.
 - Nobel en 1963 «for his contributions to the theory of the atomic nucleus and the elementary particles, particularly through the discovery and application of fundamental symmetry principles»
 - Qu'est-ce qui cause l'effondrement de la fonction d'onde?
 - Réponse: la conscience de l'observateur
- ⇒ «Idéalisme» de Wigner
- Illustration: le paradoxe de l'ami de Wigner

L'ami de Wigner



Barrett, J., *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Sec. 2.6. (référence précieuse à ce sujet).

- Supposez que l'on met l'ami de Wigner dans la boîte avec le chat. Mesure: demandez à l'ami si le chat est mort ou vivant.
- Si nous considérons son ami comme une partie du montage expérimental, la MQ prédit que avant de demander à l'ami de Wigner si le chat est mort ou vivant, il est dans une superposition de croire définitivement que le chat est mort et de croire définitivement que la chat est vivant.

⇒ Une conséquence absurde du point de vue de Bohr

- La solution de Wigner: il y a une division naturelle entre ce qui constitue un mesure et le reste – la présence d'un **observateur conscient** –, et évidemment l'ami est conscient.

- Pas populaire car il pose de nombreuses énigmes: est-ce que le chat a une conscience?
- Plus sérieusement, la point de vue de Wigner requiert une division du monde en deux domaines, un occupé par les êtres conscient qui ne sont pas sujets aux lois de la physique mais peuvent d'une façon miraculeuse interrompre l'évolution déterministe ordinaire des systèmes physiques, et un autre occupé par les systèmes physiques eux-mêmes, qui évoluent de façon déterministe, jusqu'à ce que un être conscient regarde ce qui se passe.
- Problème: Copenhague requiert une telle division entre système et le monde classique des rapports d'observation...

La formulation d'Albert du problème de la mesure



Albert, Ch. 4.

- Supposez que tout évolue en accord avec l'équation de Schrödinger.
- Supposez que nous ayons un **appareil mesurant la dureté**: un appareil avec un cadran avec trois positions («prêt», «dur», «mou»).
- Réglez l'appareil tel que il affiche «prêt» et envoyez alors des électrons vers l'appareil, qui mesurera leur dureté. Ces mesures sont enregistrées selon la position finale sur l'écran («dur» ou «mou»).
- Ces hypothèses impliquent que ça doit se passer de la façon suivante:

$$\begin{aligned}
 |\text{prêt}\rangle_m |\text{dur}\rangle_e &\longrightarrow |\ll\text{dur}\gg\rangle_m |\text{dur}\rangle_e \\
 |\text{prêt}\rangle_m |\text{mou}\rangle_e &\longrightarrow |\ll\text{mou}\gg\rangle_m |\text{mou}\rangle_e
 \end{aligned} \tag{2}$$

où les indices m et e désignent les états de l'appareil de mesure et de l'électron respectivement.

⇒ d'après (1) et (2) et la linéarité de l'équation de Schrödinger, il suit qu'un **état noir** évolue certainement vers

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle_m|\text{dur}\rangle_e + \frac{1}{\sqrt{2}}|\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle_m|\text{mou}\rangle_e \quad (3)$$

- (Vérifiez par vous-même que c'est bien le cas.)
- Mais si on suppose que **les mesures ont des résultats déterminés**, alors d'après le postulat de l'effondrement (Postulat E) et la règle de Born (Postulat D) pour les probabilités, on a

$$\text{soit } |\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle_m|\text{dur}\rangle_e \quad (\text{avec une probabilité de } 0.5) \quad (4)$$

$$\text{soit } |\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle_m|\text{mou}\rangle_e \quad (\text{avec une probabilité de } 0.5)$$

- Mais cela diffère (mesurablement) de (3)!
- (4) a des résultats déterminés mais viole l'équation de Schrödinger, alors que (3) est un état dans lequel **rien** ne permet de dire ce qui est affiché sur l'écran...

Une formulation « plus serrée »

- On introduit **Martha** qui est un observateur compétent, i.e. l'équation de Schrödinger entraîne que Martha (= système physique, dont l'état est indiqué par l'indice o) se comporte de la façon suivante:

$$|\text{prêt}\rangle_o |\text{prêt}\rangle_m \longrightarrow | \ll \text{prêt} \gg \rangle_o |\text{prêt}\rangle_m$$

$$|\text{prêt}\rangle_o |\ll \text{dur} \gg \rangle_m \longrightarrow | \ll \text{dur} \gg \rangle_o |\ll \text{dur} \gg \rangle_m$$

$$|\text{prêt}\rangle_o |\ll \text{mou} \gg \rangle_m \longrightarrow | \ll \text{mou} \gg \rangle_o |\ll \text{mou} \gg \rangle_m$$

où $|\text{prêt}\rangle_o$ est l'état physique de Martha quand elle prête et déterminée à lire la position du réglage, $| \ll \text{xyz} \gg \rangle_o$ est son état physique dans lequel elle croit que le réglage est «xyz».

- D'après la compétence de l'observateur et la linéarité de l'équation de Schrödinger, il suit que lorsque Martha a lu la position du réglage pour l'état (3), l'état final sera, avec certitude:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle_o|\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle_m|\text{dur}\rangle_e + \frac{1}{\sqrt{2}}|\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle_o|\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle_m|\text{mou}\rangle_e \quad (5)$$

- Mais à nouveau, la condition de résultats de mesure déterminés (principalement les Postulats D et E) entraîne que lorsque Martha a terminé, alors

soit $|\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle_o|\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle_m|\text{dur}\rangle_e$ (avec une probabilité de 0.5), (6)

soit $|\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle_o|\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle_m|\text{mou}\rangle_e$ (avec une probabilité de 0.5).

- Mais à nouveau: (5) et (6) sont empiriquement différents, seul (6) est empiriquement correct; (5) est “unspeakably strange”: “it’s a state in which there is no matter of fact about whether or not Martha thinks the pointer is pointing in any particular direction.” (79)
 - Et (5) est **vraiment étrange**: “This is a state wherein... it isn’t right to say that Martha believes that the pointer is pointing to ‘hard,’ and it isn’t right to say that Martha believes that the pointer is pointing to ‘soft,’ and it isn’t right to say that she has **both** of those beliefs (whatever **that** might mean), and it isn’t right to say that she has neither of those beliefs.” (79fn)
- ⇒ Le postulat de la dynamique (Postulat C) et le postulat de l’effondrement (Postulat E) sont en complète contradiction.

Le premier problème de Maudlin: le problème des résultats



Maudlin, *Topoi* 14 (1995): 7-15.

Théorème (Le problème de la mesure 1 (MP1))

“The following three claims are mutually inconsistent.

- 1.A *“The wave-function of a system is **complete**, i.e. the wave-function specifies (directly or indirectly) all of the physical properties of a system.*
- 1.B *“The wave-function always evolves in accord with a **linear** dynamical equation (e.g. the Schrödinger equation).*
- 1.C *“Measurements of, e.g., the spin of an electron always (or at least usually) have **determinate outcomes**, i.e., at the end of the measurement the measuring device is either in a state which indicates spin up (and not down) or spin down (and not up).” (7)*

«Preuve». Suit pour l'essentiel le même chemin que dans le chapitre 4 de Albert, par exemple si 1.A est vrai et alors la fonction d'onde doit spécifier tout fait physique sur l'appareil de mesure, et 1.B est vrai, alors 1.C doit être faux, etc. □

Nommez les solutions à MP1

- 1 Les théories à VC nient 1.A, puisqu'elles postulent plus de réalité que ce qui est représenté dans $|\psi\rangle$.
 - Exemples: théorie de Bohm, interprétation modale de van Fraassen (1991)
 - moins tendancieuses: théories à variables **aditionelles** (VA)
- 2 Les théories de l'effondrement abandonnent 1.B, puisqu'elles affirment que la dynamique est, au moins parfois, non-linéaire.
 - Exemples: Copenhague, théorie de la localisation spontanée de Ghirardi, Rimini, Weber (1986) (GRW); théorie de la localisation spontanée continue de Perle (1990), Gisin (1989)
 - moins tendancieuses: théories **non-linéaires**
- 3 Les théories du multivers rejettent 1.C, puisque elles maintiennent que les appareils de mesure indiquent tous les résultats.
 - Exemples: théories des mondes multiples, interprétation de l'état relatif de Everett (1957)
 - logiquement possible: théorie du «nullivers»

Une nouvelle physique

- Une solution à MP1 doit donc nécessairement soit être une théorie VA, une théorie non-linéaire, ou une théorie multivers (ou une combinaison).

⇒ Chaque option suppose de postuler de la **nouvelle physique**:

- 1 Les théories VA doivent spécifier les variables additionnelles et les lois dynamiques qui les régissent.
- 2 Les théories non-linéaires doivent fournir les équations de la dynamique non-linéaire et spécifier quand exactement précisément les appliquer (ce que **ne fait pas** l'interprétation de Copenhague).
- 3 Les théories multivers doivent expliquer pourquoi il semble y avoir des résultats déterminés, autrement dit, elles doivent expliquer pourquoi le chat de Schrödinger semble soit complètement mort soit complètement vivant.

Le second problème de Maudlin: le problème des statistiques

- Strictement dit, les trois affirmations dans MP1 ne sont pas logiquement en contradiction:
- Nous pourrions dire que pour tout état de superposition le résultat du détecteur est «UP».
- Un peu moins brut: le résultat du détecteur est déterminé par le terme avec le plus grand coefficient (dans tous les cas), les états de superposition 50-50 ont une mesure nulle.
- Mais toute solution brutale de ce type à MP1 semble aller à l'encontre d'un nouveau problème...

Théorème (Le problème de la mesure 2 (MP2))

“Formally, the following three claims are mutually inconsistent:

- 2.A *“The wave-function of a system is **complete**, i.e. the wave-function specifies (directly or indirectly) all of the physical properties of a system.*
- 2.B *“The wave-function always evolves in accord with a **deterministic** dynamical equation (e.g. the Schrödinger equation).*
- 2.C *“Measurement situations which are described by identical initial wave-functions sometimes have **different outcomes**, and the probability of each possible outcome is given (at least approximately) by Born’s rule.” (11)*

«Preuve». Si la fonction d'onde évolue de façon déterministe (2.B), alors deux systèmes avec les mêmes conditions initiales auront les mêmes fonctions d'ondes finales. Puisque les fonctions d'onde sont complètes (2.A), cette identité sera totale. En particulier, elles ne peuvent pas contenir des détecteurs affichant des résultats différents, en contradiction avec 2.C. □

- 1 Une **théorie à VA** résout MP2 en niant 2.A: des systèmes avec des fonctions d'onde identiques pourraient toujours être physiquement différents, et donc donner lieu des résultats différents.
 - Mais les variables additionnelles devraient être **tangibles**, i.e. avoir un effet observable sur la valeur affichée par l'appareil de mesure.
- 2 Les **théories non-linéaires** résolvent le problème en supposant une évolution indéterministe (en niant 2.B).
 - Dans l'interprétation standard et dans la théorie GRW, on postule que les effondrements sont irrémédiablement stochastiques.
- 3 Mais les **théories multivers** rencontrent une difficulté: elles ne peuvent pas rendre compte de la règle de Born et donc ne peuvent pas reproduire les mesures actuelles de la MQ.

La difficulté des théories du multivers avec les probabilités

- Comment une théorie du multivers peut-elle faire une différence entre une superposition 50-50 et une superposition 75-25?
- Maudlin: elles ne peuvent pas, et c'est la raison profonde de leur échec.
- Problème: dans le cas 75-25, ça ne peut pas dire que les deux mondes correspondant aux différents résultats ne sont pas également probables, car chacun d'eux existe.
- Réponse typique: d'une certaine façon, ces branches dans lesquelles les fréquences à grand temps (infini?) de grandes séquences de mesure s'accordent avec les prédictions de la règle de Born se voient attribuer une probabilité qui approche 1.
- Maudlin: cela constitue une **pétition de principe** (i.e. cela soulève la question): chacune de ces branches a la même chance (avec une probabilité 1)

“There is, in the Many Worlds picture, simply nothing for the numbers generated by Born’s rule to be probabilities of, and this problem is not ameliorated if those numbers approach 1 or 0. The denial of 2.C... cannot be reconciled with the quantum theory as it is used to make predictions. Without also employing either additional variables or a non-linear, stochastic evolution of the wave-function, the multiverse (or nulliverse) views cannot solve our problems, and if they do invoke either of these, then the postulation of the many worlds is sheer extravagance.” (12)

En se concentrant sur les deux premières options, nous trouvons donc que

“[a]s J. S. Bell succinctly put it, ‘either the wave-function, as given by the Schrödinger equation, is not everything, or it is not right’... Putting together the two problems, we can say that whatever new physics we invent to solve the measurement problem, it must be so constructed that (a) measurements typically have outcomes and (b) probabilities are assigned to those outcomes which at least approximate the probabilities derived by use of Born’s rule. These conditions supply the standard by which one can evaluate new theories.” (12)

Le troisième problème de Maudlin: le problème de l'effet

- Certaines interprétations, comme l'interprétation modale de van Fraassen et l'interprétation de Richard Healey, parviennent à résoudre MP1 et MP2, mais pas MP3:

Théorème (Le problème de la mesure 3 (MP3))

*Le résultat d'une mesure a donc un pouvoir prédictif pour le futur: après une première mesure, nous en savons davantage sur le résultat d'une deuxième mesure qu'avant la première mesure. Toute théorie qui cherche à rendre compte du contenu empirique de la théorie traditionnelle devrait avoir cette propriété. Appelons cela le **problème de l'effet**, en référence à l'effet de la première mesure de la particule (ou au moins de notre connaissance de la particule).*

- La théorie de Bohm, la théorie de GRW et peut-être d'autres, peuvent aussi résoudre ce problème et donc survivre au test...