L'ARGUMENT EINSTEIN PODOLSKY ROSEN (EPR) : PARADOXE, ALTERNATIVE ET DÉMONSTRATION

P.Roussel, Institut de Physique nucléaire
Université Paris XI, CNRS, IN2P3
F-91406 Orsay Cedex

Résumé

En physique quantique, l'absence d'observation d'états de superposition ne devrait être une surprise pour personne, que les objets soient microscopiques ou macroscopiques. Cela n'en était pas une pour Schrödinger. L'expérience de pensée "du chat" parmi bien d'autres arguments le montre clairement. On ne doit pas aujourd'hui lui faire dire le contraire. L'article EPR (A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, écrit en 1935), qui est à l'origine de l'intervention de Schrödinger et du développement d'une problématique qui se prolonge jusqu'aujourd'hui, est analysé. Avec Schrödinger, Bohr, Wigner et jusqu'à aujourd'hui, la réponse à EPR a été le recours renouvelé à l'observateur finalement caractérisé par sa conscience. Deux éléments nouveaux sont apparus : d'une part un développement expérimental et théorique impressionnant avec l'optique quantique et les manipulations d'atomes, d'autre part la proposition du concept de *décohérence* susceptible d'expliquer le passage du micro- au macroscopique et par là d'apporter un élément de compréhension de la *mesure* quantique. On montre que les questions abordées par EPR restent plus que jamais posées mais que les expériences aujourd'hui accessibles permettent d'y travailler concrètement, ramenant dans le domaine de la physique ce qui était évacué vers l'interprétation ou neutralisé par l'introduction de termes aussi incontestables qu'inefficaces comme "non-localité" ou "non-séparabilité". Einstein ne pourrait que s'en réjouir.

Table des matières

1 Introduction.

La présentation des réalisations contemporaines remarquables de l'optique quantique associée à la physique atomique s'accompagne fréquemment de l'invocation du "chat de Schrödinger". L'expérience de pensée du chat y est utilisée pour illustrer le problème de la mesure en mécanique quantique (MQ) et le rattacher d'une part à ce qui est appelé la transition du micro- au macroscopique et d'autre part à la "décohérence", un concept introduit pour rendre compte, au moins partiellement, de façon plus scientifique justement, de ce qui se passe -on ne peut pas être plus précis pour le moment- au moment de la mesure, de la réduction du paquet d'onde.

Il se trouve que l'expérience de pensée du chat -au demeurant un élément mineur de l'argumentation de Schrödinger- est utilisée à contresens (peut-être depuis longtemps) mais que la mise en perspective de tout ce débat a un point de départ -au moins un point de passage fort et obligé - l'article EPR publié peu de temps avant celui de Schrödinger et dont les conséquences et les enjeux se poursuivent jusqu'à aujourd'hui. On se doit de dégager ce qu'il faut appeler l'alternative EPR et au-delà la démonstration EPR, ce qui est bien autre chose qu'un paradoxe.

On examinera si les développements expérimentaux et théoriques récents et l'introduction du concept de décohérence sont susceptibles de répondre aux interrogations de cette alternative et d'éclairer le processus de mesure quantique autrement que par le recours à la conscience de l'observateur utilisé jusqu'ici.

2 Le chat de Schrödinger, un agent retourné.

2.1 Une affirmation répétée concernant les états de superposition.

Dans des articles de vulgarisation ou dans des articles plus directement scientifiques on a vu Schrödinger maintes fois invoqué au travers du "paradoxe" de son chat, pour s'étonner de l'absence d'observation d'états de superposition dans le monde macroscopique, au contraire dit-on du monde microscopique, et pour s'interroger alors sur la transition d'un monde à l'autre. L'appellation "état-chat" est même devenue courante pour des états de superposition concernant des objets mésoscopiques. On se rappellera les multiples "représentations" graphiques, construites pour choquer, de ce que justement on ne voit pas : un chat à moitié mort à moitié vivant. Mais examinons les textes et commençons avec W.H. Zurek (1991) [1] :

> *Given almost any initial condition the universe described by $|\Psi>$ evolves into a state that simultaneously contains many alternatives never seen to coexist in our world....*
>
> *Thus at the root of our unease with quantum mechanics is the clash between the principle of superposition -the consequence of the linearity of [the Schrödinger] equation- and the everyday classical reality in which this principle appears to be violated....*
>
> *Delineating the border between the quantum realm ruled by the Schrödinger equation and the classical realm ruled by the Newton's laws is one of the unresolved problem of physics* (cette dernière phrase dans la légende de la figure 1, p. 37).

Citons maintenant plusieurs membres d'une équipe de recherche de l'ENS Paris dont l'apport dans le domaine de l'optique quantique et la manipulation d'atomes est essentielle. D'abord, M. Brune et al (1996) [2] :

> *The transition between the microscopic and macroscopic worlds is a fundamental issue in quantum measurement theory.... [A quantum superposition state of the "meter + atom" system] is however never observed. Schrödinger has vividly illustrated this problem by replacing the meter by a "cat" and considering the dramatic superposition of dead and alive animal states. Although such a striking image can only be a metaphor, quantum superpositions involving "meter states" are often called "Schrödinger cats".*

Ensuite, J.M. Raimond et al (1997) [3] :

The absence of macroscopic quantum superpositions is a central issue in our understanding of quantum measurement theory...

Schrödinger has vividly illustrated this problem by replacing the meter by a cat whose life is dependent upon the fate of a radioactive atom. This situation leads to the paradoxical superposition of "dead" and "alive" cat states.

Enfin S. Haroche et al(1997) [4] :

Un chat [peut-il être] simultanément *vivant et mort ? Ces questions burlesques ont été posées... par Albert Einstein et Erwin Schrödinger qui cherchaient à appliquer directement à notre monde les concepts de la mécanique quantique...*

et en légende de la photo "représentant" un chat à moitié mort, à moitié vivant :

Ce montage photographique représente-t-il une situation réelle ?

Les principes de la physique quantique n'interdisent pas à un objet macroscopique d'être dans deux états à la fois. De telles situations ne sont pourtant jamais observées. C'est le paradoxe du chat de Schrödinger, du nom du physicien autrichien qui, en 1935, imagina un scénario où un chat devrait être à la fois vivant et mort.

Tout récemment encore [5] avec un des auteurs précédents :

The superposition principle is at the heart of the most intriguing features of the microscopic world...... It is impossible to get a classical intuitive representation of these superpositions. Their oddity becomes evident when one transpose them to the macroscopic scale, as in the famous "Schrödinger cat" metaphor (Schrödinger, 1935), describing a cat suspended between life and death.

Et revenons à W.H. Zurek, en 1997 [6] :

In other words, the apparatus itself [if quantum mechanics is universal] is described by fuzzy quantum wave function, rather than by a definite classical state. The famous Schrödinger cat attains its suspension between life and death in this manner.

J.A. Wheeler est un des physiciens qui sont beaucoup intervenus dans les débats sur les fondements de la MQ. Il s'exprime ici très récemment encore avec M. Tegmark (2001) [7] :

Schrödinger fit remarquer que si des objets microscopiques tels que des atomes, peuvent se trouver dans des superpositions, il pourrait en être de même pour des objets macroscopiques, puisque ceux-cis sont constitués d'atomes... Comme l'atome radioactif va se trouver dans une superposition d'un état désintégré et d'un état non désintégré, il produit un chat à la fois vivant et mort, en superposition des deux.

Terminons avec le bulletin de la société américaine de physique [8] qui marque, précisément en ce mois de mars (2002) l'anniversaire de la parution de l'article de Schrödinger :

Schrödinger used the analogy to demonstrate the limitations of quantum mechanics : quantum particles such as atoms can be in two or more different quantum states at the same time, but surely, he argued, a classical object made of a large number of atoms, such as a cat, should not be in two different states.

Deux questions se posent alors : que dit effectivement la mécanique quantique (éventuellement, que disait-elle) de ces états de superposition ? Que disait Schrödinger avec le "paradoxe du chat" ?

2.2 Une réalité en contradiction avec cette affirmation.

2.2.1 Ce que dit la mécanique quantique (et ce qu'elle disait).

Rappelons d'abord les postulats [9] et complétons par le schéma illustrant le processus (!) de la mesure.

1er Postulat : A un instant t_o fixé, l'état d'un système physique est défini par la donnée d'un ket $\mid\psi(t_o)\,\rangle$ appartenant à l'espace des états $\mathcal{E}$.
2ème Postulat : Toute grandeur physique mesurable $\mathcal{A}$ est décrite par un opérateur A agissant dans $\mathcal{E}$; cet opérateur est une observable.
3ème Postulat : La mesure d'une grandeur physique $\mathcal{A}$ ne peut donner comme résultat qu'une des valeurs propres de l'observable A correspondante.
4ème Postulat (cas d'un spectre discret non dégénéré) : Lorsqu'on mesure la grandeur physique $\mathcal{A}$ sur un système dans l'état ψ normé, la probabilité $\mathcal{P}(a_n)$ d'obtenir comme résultat la valeur propre non dégénérée a_n de l'observable A correspondante est : $\mathcal{P}(a_n)=\mid\langle\, u_n \mid \psi\,\rangle\mid^2$ où $\mid u_n\,\rangle$ est le vecteur propre normé de A associé à la valeur propre a_n.
5ème Postulat : Si la mesure de la grandeur physique $\mathcal{A}$ sur le système dans l'état ψ donne le résultat a_n, l'état du système immédiatement après la mesure est la projection normée, $\frac{P_n\psi}{\sqrt{\langle\,\psi\,\mid P_n\mid\,\psi\,\rangle}}$ de ψ sur le sous-espace propre associé à a_n.

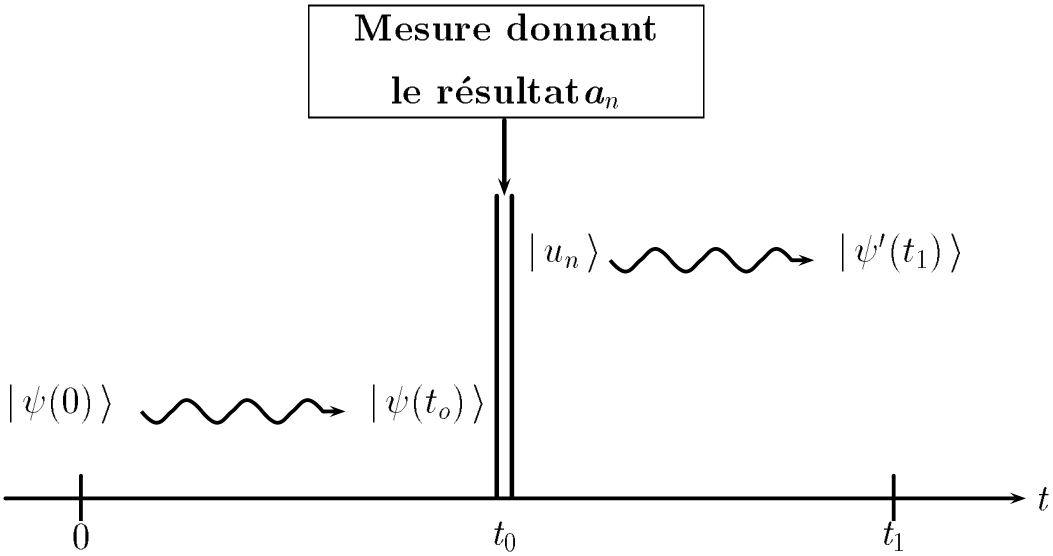


FIGURE 1

Lors d'une mesure à l'instant t_0 de l'observable A donnant le résultat a_n, le vecteur d'état du système subit une brusque modification, et devient $|u_n\rangle$. Il évolue ensuite à partir de ce nouvel état initial.

Le premier postulat est clair, à des questions de norme près : dans un espace vectoriel, le principe de superposition s'applique (si $|a\rangle$ et$|b\rangle$ sont des états de $\mathcal{E}$, alors $(|a\rangle + |b\rangle)$ l'est aussi) et rien n'indique une limitation concernant la taille du système. On notera cependant ici le caractère abstrait de ce qu'il faut bien appeler une représentation du système physique : son état *est défini par la donnée* (d'un ket) ; il n'*est* pas une onde ou une fonction d'onde. On reviendra plus loin avec Schrödinger sur cette question du statut de ψ.

On n'observe ni un ket ni un espace vectoriel mais on effectue des mesures sur un système physique. Le deuxième postulat dit comment associer mesures physiques et espace vectoriel, et le troisième dit très précisément ce que peut être le résultat d'une mesure : s'il existe une variable, une observable, à deux valeurs (chat vivant/chat mort), le résultat ne peut être que l'une de ces valeurs, chacune avec une probabilité évaluée selon le quatrième postulat.

Avec la mécanique quantique, les rapports du réel à l'abstrait ne sont pas tellement clairs, on verra toute l'attention que Schrödinger a portée à cette question, mais tout de même, ce ne sont pas les observables qui sont soumises au principe de superposition, ce sont les "vecteurs d'état". Avec le cinquième postulat on revient au système physique par l'intermédiaire de son vecteur d'état : le chat est ou bien mort ou bien vivant et il le reste. Au total, on voit mal qu'on puisse s'étonner de ne pas "observer" de chat à moitié mort à moitié vivant. On pourrait (?) s'étonner de ne pas être capable de préparer un chat dans un état de superposition, si cela est le cas, mais l'observation ne donnera jamais que l'un ou l'autre. C'est ce qui est attendu et c'est ce qui est observé.

Avant d'examiner l'intervention de Schrödinger lui-même, il est utile d'insister dans cette présentation de la mécanique quantique (celle d'aujourd'hui) sur la description du processus de la mesure (mais est-ce un processus ? c'est aussi une question). Depuis la naissance de la mécanique quantique, c'est une question au cœur des discussions c'est aussi un élément qui peut justifier cette interrogation (évoquée par exemple par Zurek) concernant le passage du microscopique au macroscopique.

La figure 1, ci-dessus en haut de la page 6 (reproduite de la référence [9] page 221), présente parfaitement la question. Le vecteur d'état (la fonction d'onde) évolue de façon déterministe (équation de Schrödinger) depuis la préparation initiale en $t = 0$ jusqu'à **la mesure** en $t = t_o$. Il subit alors un changement brusque probabiliste vers l'un des vecteurs propres $|\, u_n \rangle$ de A, celui qui est associé à la valeur propre a_n trouvée. Il reprend ensuite une évolution déterministe depuis $t = t_o$ jusqu'à (par exemple) $t = t_1$ où une nouvelle mesure est éventuellement pratiquée etc...

Ce que la mécanique quantique ne définit justement pas clairement, ce sont les conditions qui font que l'une ou l'autre des évolutions (déterministe/probabiliste) doit être choisie. **Une** réponse, c'est que la "mesure", avec l'occurrence de l'aspect probabiliste, fait nécessairement intervenir un instrument macroscopique, d'où la remarque de W. Zurek ci-dessus sur le passage du microscopique au macroscopique.

On doit remarquer que cette imprécision de la mécanique quantique n'a, il est vrai, que rarement ou jamais de conséquence pratique : dans tous les cas concrets on **sait** appliquer les postulats.

Cette même figure 1 permet aussi d'introduire une distinction essentielle en mécanique quantique entre "état pur" ou vecteur d'état et mélange statistique...de vecteurs d'état. Le premier est un système physique "complètement connu" ; comme ensemble, il est constitué d'éléments identiques. Par exemple, $|\, \psi(0) \rangle$, $|\, \psi(t_o) \rangle$, $|\, u_n \rangle$ et $|\, \psi'(t_1) \rangle$ sont des états purs. Le mélange statistique lui est incomplètement connu ; comme ensemble, il est constitué d'éléments différents, chacun avec une probabilité donnée. La mesure sur un ensemble constitué de kets identiques $|\, \psi(t_o) \rangle$ fait passer d'un cas pur à un mélange, celui des cas purs $|\, u_n \rangle$, chacun avec la probabilité correspondante donnée par le quatrième postulat (revoir la figure 1, page 6 ; voir plus loin la citation de London et Bauer page 20).

Avec le principe de superposition, on va dire que

$|\, a \rangle$, $|\, b \rangle$, $1/\sqrt{2}(|\, a \rangle + |\, b \rangle)$, sont des cas purs. Ce dernier est bien à distinguer du mélange en proportions égales de $|\, a \rangle$ et de $|\, b \rangle$.

2.2.2 Ce que disait Schrödinger avec le "paradoxe du chat".

On est surpris de ne trouver aucun article sur le "paradoxe du chat", ni sur "le chat", mais un long exposé en trois livraisons [10], avec en tout 15 chapitres, et intitulés :

LA SITUATION ACTUELLE DANS LA MÉCANIQUE QUANTIQUE. (I) (II) (III)

(I)

1) La physique des modèles.

2) La statistique des variables des modèles en MQ.

3) Exemples de prédictions de probabilités.

4) Peut-on fonder la théorie sur des ensembles idéaux ?

5) Les variables sont-elles réellement brouillées ? [verwaschen] [blurred]

(II)

6) La volte-face délibérée du point de vue épistémologique.

7) La fonction Ψ comme catalogue des valeurs possibles.

8) Théorie de la mesure (I).

9) La fonction Ψ comme description d'état.

10) Théorie de la mesure (II).

(III)

11) Résolution de l'enchevêtrement/intrication [Verschränkung] [entanglement]. Résultat dépendant de l'intention de l'expérimentateur.

12) Un exemple.

13) Continuation de l'exemple : toutes les mesures sont sans équivoque enchevêtrées.

14) La dépendance temporelle de l'enchevêtrement. Considération du rôle spécial du temps.

15) Loi naturelle ou moyen de calcul.

C'est dans le chapitre 5 (Les variables sont-elles réellement brouillées ?) que le fameux chat apparaît. Auparavant, Schrödinger a présenté la physique classique et l'usage qu'elle fait des modèles. Il a présenté les spécificités de la mécanique quantique et en particulier le rôle original qu'y jouent les probabilités. Après avoir montré que la statistique ne peut pas résulter d'une dispersion déjà présente dans les échantillons, il s'interroge dans ce chapitre 5 sur la possibilité qu'aurait ψ de se présenter comme un modèle de la réalité où les variables seraient réellement "brouillées", comme un nuage d'électricité autour d'un atome.

Un noyau radioactif est alors utilisé de deux façons -la deuxième pour le chat. Dans une première expérience de pensée, la source est entourée dans tout l'espace par un écran luminescent :

The emerging particle is described, if one wants to explain intuitively, as a spherical wave that continuously emanates in all directions from the nucleus and that impinges continuously on a surrounding luminescent screen over its full expanse. **. . . The screen however does not show a more or less constant uniform surface glow, but rather lights up at one instant at one spot. . .**

Dans le même esprit, il remplace l'écran par un détecteur à gaz :

If . . . one uses perhaps a gas that is ionised by the α-particules, one finds the ion pairs arranged along rectilinear columns, that project backwards on to the bit of radioactive matter from which the α-radiation comes.

Chacun de ces exemples donne déjà la réponse : les variables ne sont pas brouillées car à chaque fois, on trouve la variable avec **l'une de ses valeurs possibles**. Pour Schrödinger, et ce n'est pas surprenant, la mécanique quantique est la même que pour nous aujourd'hui.

Enfin arrive l'expérience du chat, un tiers du chapitre, 1% de l'article !

On can even set up quite ridiculous cases. A cat is penned up in a steel chamber, along with the following diabolical 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 one 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 chatters 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 first atomic decay would have poisoned it. The ψ-function of the entire system would express this by having in it the living and the 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 transferred into macroscopic indeterminacy, which is *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* [fin du chapitre 5].

Pas plus qu'avec l'expression contemporaine de la mécanique quantique, il n'y a pas de surprise chez Schrödinger de la non-observation d'un chat à moitié vivant et mort, pas de paradoxe non plus. On n'attend pas plus d'observation brouillée de chat vivant et de chat mort que, par exemple, d'observation brouillée de la localisation d'une particule décrite par une fonction d'onde étendue.

Il est utile de montrer que le problème n'est pas là puisqu'on répète le contraire, mais deux questions se posent alors :

1) pourquoi cette erreur répétée ? -et on proposera plus tard une réponse possible-

2) quelle est la véritable raison d'être de ce long article de Schrödinger ? Pour répondre à cette question, on va examiner plus en détail le contenu de cet article et rappeler dans quel contexte il arrive.

On est conduit par Schrödinger lui-même à un premier retour en arrière (quelques mois) vers ce qui sera notre base de départ. Dans le chapitre 12 de son article, "Un exemple", Schrödinger indique en effet avec humour, dans une note en bas de page :

> *C'est la publication de ce travail [11]* [ce qui est devenu pour nous l'article EPR, Einstein, Podolsky, Rosen, tellement cité (peut-être beaucoup moins lu !)] *qui a motivé la présente -est-ce que je dirai conférence ou confession générale- ?*

3 La cause de tout : l'article EPR, Einstein, Podolsky, Rosen.

3.1 Une mise en perspective.

Avant d'examiner le contenu de l'article EPR [11] et les réponses de Schrödinger, on va remonter encore un peu plus en arrière afin d'éclairer par deux citations les points de vue d'une part d'Einstein, et d'autre part ce qu'on appelle le point de vue ou l'école de Copenhague. Einstein d'abord, en 1926, dans une lettre à Max Born rapportée par Michel Paty [12] page 335 :

> *La mécanique quantique force le respect. Mais une voix intérieure me dit que ce n'est pas encore le nec plus ultra. La théorie nous apporte beaucoup de choses, mais elle nous rapproche à peine du secret du Vieux. De toute façon, je suis convaincu que lui, au moins, ne joue pas aux dés.*

Sur le fond, trois éléments sont présentés, qu'on retrouvera (plus loin dans cet article) en 1949 et dont on pourra évaluer les évolutions. Il y a le respect pour les succès de la MQ, l'insatisfaction globale, et celle particulière concernant l'aspect probabiliste des résultats.

Cela s'oppose à la déclaration on ne peut plus dogmatique de M. Born et W. Heisenberg au Conseil Solvay à Bruxelles en 1927, rapportée également par M. Paty [12], pages 328-329 :

> *Nous tenons la mécanique des quanta pour une théorie complète dont les hypothèses fondamentales physiques et mathématiques ne sont plus susceptibles de modifications.*

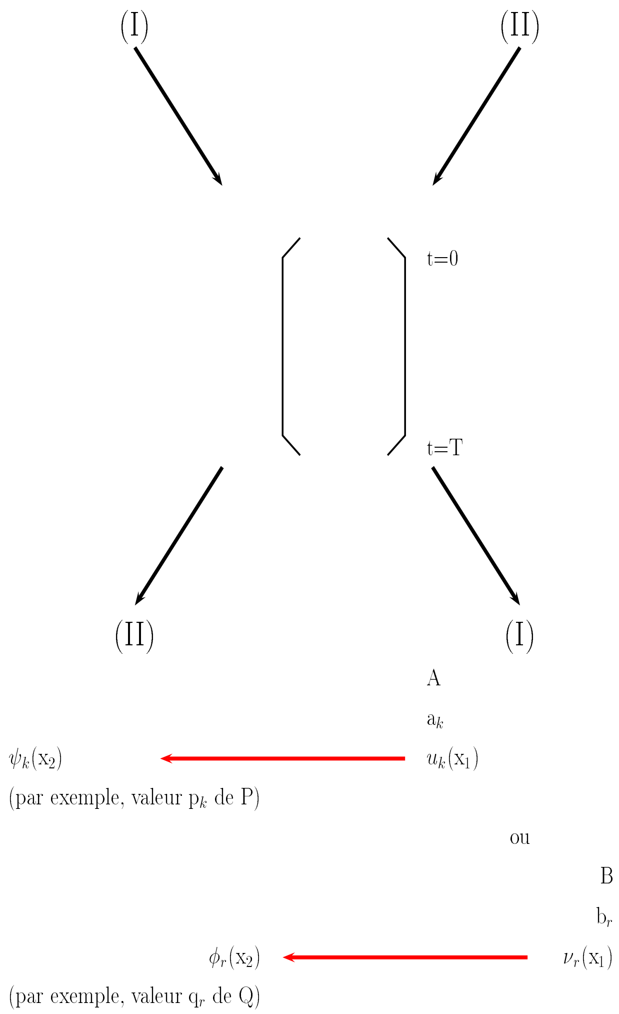
En 1935, Einstein a gardé le même état d'esprit qu'en 1926, avec l'article EPR dont le titre même montre l'esprit interrogateur :

> *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?*

On examine maintenant le contenu de cet article.

3.2 Le cœur fonctionnel de l'article EPR : la réalité d'un paradoxe.

Ce qu'on peut appeler le cœur fonctionnel de l'article EPR est important pour la MQ, pour sa compréhension comme pour son histoire. D'un côté, ce cœur fonctionnel explicite un processus particulier de mesure, il met en évidence ce qui plus tard sera traduit par l'introduction de -un mot mouveau- la non-localité, il est à l'origine de la notion de "paires EPR" ; d'autre part, il a servi à Einstein depuis 1933 (selon ce qu'en a rapporté L. Rosenfeld cité dans [12] pages 341 et 342) jusqu'en 1949 (on y reviendra plus loin) à mettre en question la MQ. En voici le schéma :



...let us suppose that we have two systems, I and II, which we permit to interact from the time t=0 *to* t=T*, after which time we suppose that there is no longer any interaction between the two parts.*

We suppose further that the states of the two systems before t=0 *were known [des états purs]. We can then calculate with the help of the Schrödinger's equation the state of the combined system I+II at any subsequent time ; in particular, for any* t>T*. Let us designate the corresponding wave function by* Ψ*.*

We cannot however, calculate the state in which either one of the two systems is left after the interaction. This, according to quantum mechanics, can be done only with the help of further measurements, by the process known as the reduction of the wave packet.

Let us consider the essentials of this process.

Précisons maintenant que ce qui suit repose entièrement sur le type de fonction d'onde du système composé qui, après interaction, n'est **plus** factorisable :

$$\Psi(x_1, x_2) \neq \phi(x_1).\phi(x_2).$$

Suppose now that the quantity A [some physical quantity pertaining to system I] is measured and it is found that it has the value a_k. It is then conclude that after the measurement the first system is left in the state given by the wave function $u_k(x_1)$, and that the second system is left in the state given by the wave function $\psi_k(x_2)$. This is the process of reduction of the wave packet.

The set of functions $u_n(x_1)$ is determined by the choice of the physical quantity A. If, instead of this, we had chosen another quantity, say B,...

... and [if now] B is measured and is found to have the value b_r we concluded that after the measurement the first system is left in the state given by $\nu_r(x_1)$ and the second system is left in the state given by $\phi_r(x_2)$.

We see therefore that, as a consequence of two different measurements performed upon the first system, the second system may be left in states with two different wave functions.

Avant de décrire la structure logique de l'article EPR, il est intéressant de mettre le paragraphe ci-dessus en rapport avec ce que dira Einstein, 14 ans plus tard, dans sa réponse à Marguenau [13], page 681. Il dit alors rapporter le point de vue de Niels Bohr (on verra un peu plus loin qu'en 1935, Bohr ne dit pas la même chose) mais dans ses propres termes (ceux d'Einstein).

If the partial systems A and B form a total system which is described by its Ψ-function $\Psi(AB)$, there is no reason why any mutually independent existence (state of reality) should be ascribed to the partial systems A and B viewed separately, not even if the partial systems are spatially separated from each other at the particular time under consideration. *The assertion that, in this latter case, the real situation of B could not be (directly) influenced by any measurement taken on A is therefore, within the framework of quantum theory, unfounded and (as the paradox shows) unacceptable.*

Les deux préoccupations (1935 et 1949) coïncident, on peut voir là la naissance de "l'inséparabilité quantique" par sa mise en évidence mais aussi en question par Einstein. Mais revenons en 1935.

3.3 La structure logique de l'article EPR : alternative et finalement démonstration.

Réalité objective	$\neq$	image scientifique de cette réalité

Deux questions pour juger une théorie :

La théorie est-elle correcte ?

Donne-t-elle une description complète ?

Pour la MQ, deux variables dont les opérateurs ne commutent pas ne peuvent avoir toutes les deux simultanément une réalité physique.

L'expérience des deux systèmes $\Longrightarrow$

Une contradiction qui tourne à une alternative dont les deux termes se rejoignent :

1) L'origine de la détermination des valeurs des variables est dans le passé commun des deux systèmes et la MQ n'est (simplement) pas complète.

2) On prend en compte la non-simultanéité des déterminations...

C'est à dire la complémentarité de Bohr

Cela fait dépendre pour (II) la réalité de P ou de Q d'une mesure sur (I) avec lequel il n'intéragit pas.

No reasonable definition of reality could be expected to permit this.

La mécanique quantique est encore incomplète puisqu'elle introduit une dépendance qu'elle nie au départ

Avant d'utiliser l'expérience de pensée aux deux systèmes vue précédemment, EPR posent ce qu'on pourrait appeler leur pilier épistémologique :

> *Any serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.*

Et comme on le verra, c'est sur ce pilier que porteront d'abord les réponses. EPR précisent ensuite comment la théorie doit être correcte et complète. Ils utilisent alors l'expérience des deux systèmes et appliquent le résultat décrit précédemment au cas où les opérateurs correspondant aux deux variables A et B ne commutent pas, par exemple x et p_x. Deux expériences, dont il faut qu'elles soient répétées depuis la préparation d'un état initial identique, et donc "complètement connu", sont conduites l'une pour la mesure de A, l'autre pour celle de B (et les deux appareils utilisés seront différents).

Des résultats de ces mesures sur I, on **déduit** les valeurs pour II de deux variables dont les opérateurs ne commutent pas, en contradiction en quelque sorte avec l'affirmation de la mécanique quantique que cela n'est pas possible. Mais cette contradiction mute immédiatement en une alternative avec ses deux termes :

i) On prend au sérieux et rigoureusement l'affirmation que les deux systèmes I et II n'intéragissent plus après t=T, et alors le caractère différé des mesures de A et B n'a pas d'importance, car les valeurs p_k de P et q_r de Q n'ont pu être déterminées que dans le passé commun de I et de II, avant t=T. Elles restent ensuite *simultanément* déterminées, fixées.

ii) On prend au contraire en compte la non-simultanéité des expériences qui déterminent, ou bien p_k, ou bien q_r, et anticipant l'intervention de Bohr, on invoque cette fois la *complémentarité*, mais alors :

> *This makes the reality of P or Q [sur le système II] depend upon the process of measurement carried out on the first system which does not disturb the second system in any way. No reasonable definition of reality could be expected to permit this.*

Dans les deux cas, la mécanique quantique est incomplète ou inachevée voire incohérente : l'alternative devient démonstration. Avec i), la MQ est incomplète et même incohérente puisque la détermination simultanée des deux variables P et Q n'est pas prévue et même niée. Avec ii) elle met en évidence une dépendance qu'elle nie au départ. On peut penser que la rédaction de 1935 privilégie l'élément i) de l'alternative, il n'en sera plus de même en 1949. Les progrès ultérieurs de la physique ont renforcé ce mouvement, on y reviendra bien sûr plus loin.

3.4 Une première réponse qui manque son but : celle de Bohr.

Avant la publication de Schrödinger qui nous concerne, une première réponse est publiée rapidement par Niels Bohr, dans la même revue et avec le même titre [14]. Son intérêt est pourtant limité car son argumentation est fondée presque exclusivement sur la complémentarité :

> *... a viewpoint termed "complementarity" is explained from which quantum mechanical description of physical phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness* ([14] résumé, page 696).

Mais si la complémentarité permet de répondre au terme i) de l'alternative de l'argument EPR, elle déclenche par contre le recours au terme ii) et ne permet pas du tout d'y répondre.

On ne sera pas surpris de la déclaration plutôt dogmatique de Bohr :

> *Such an argumentation [celle d'EPR] however, would hardly seem suited to affect the soundness of quantum-mechanical description, which is based on a coherent mathematical formalism covering automatically any procedure of measurement like that indicated* ([14], page 696).

Une anecdote concernant cet article **doit** être évoquée, car elle circule en étant indûment attribuée à Schrödinger, les indications précises ci-dessous rendent à Bohr ce qui lui appartient. Cet article donc n'est pas d'une très grande clarté et lors de sa reproduction dans un livre consacré à la mesure [15], deux pages ont été inversées qui par malchance gardent un semblant de sens, si bien que du temps s'est écoulé avant que l'inversion soit découverte. Les pages de l'article original de Physical Review 698, 699, 700, 701, sont devenues 147, 149, 148, 150 dans le livre sur la mesure.

3.5 La réponse forte de Schrödinger aux sollicitations fortes de EPR.

C'est avec la deuxième livraison de son article que Schrödinger commence à répondre à EPR. Si on doutait de la force de l'argumentation EPR, on serait surpris de celle de la réplique de Schrödinger. Le chapitre 6, *La volte face délibérée du point de vue épistémologique,* contredit en effet directement les prémisses épistémologiques d'EPR (le pilier !) qui semblaient pourtant aller de soi.

> *From this very hard dilemma [ce ne sont pas des variables déterminées mais inconnues, les variables ne sont pas brouillées] the reigning doctrine rescues itself, or us, by having recourse to epistemology. We are told that no distinction is to be made between the state of a natural object and what I know about it . . . Actually -so they say- there is intrinsically only awareness, observation, measurement.*
>
> *For we must now explicitely NOT relate our thinking any longer to any other kind of reality or to a model* [page 157 ; les pages indiquées sont celles de la référence [15]].

On appréciera l'humour de Schrödinger qui expose la doctrine mais la manipule avec des pincettes ! Mais la volte-face est en effet considérable, on s'en apercevra mieux par les conséquences qui s'ensuivent mais qui déjà se profilent et concernent le statut de la fonction d'onde, le rôle de la mesure, de l'observation de l'observateur : tous ces problèmes dont en fait, la MQ ne s'est pas encore dépêtrée aujourd'hui.

Cela apparaît mieux encore avec le chapitre 7. Avec son titre, "*La fonction Ψ comme catalogue des valeurs possibles.*" Schrödinger définit ainsi le statut de la fonction d'onde[1]. Mais cela entraîne la question suivante car un catalogue n'existe **que pour** un observateur qui le consultera un jour ou l'autre. Et surtout :

> *[The abrupt change by measurement] is precisely* the *point that demands the break with naive realism. For* this *reason one can* not *put the ψ-function directly in place of the model or of the physical thing. And indeed not because one might never dare impute abrupt unforeseen changes to a physical thing or to a model, but because in the realism point of view observation is a natural process like any other and cannot* per se *bring about and interruption of the orderly flow of natural events* [page 158].

Ce qui fait apparaître une distinction entre la physique proprement dite et la mesure, cette dernière débordant du cadre de la physique. C'est bien cette volte face et elle seule (l'invocation

[1]Le choix du caractère abstrait de la fonction d'onde n'est pourtant pas sans conduire à des difficultés. Citons par exemple Bohr [14] page 697 : "*the diffraction by the slit of the plane wave giving the symbolic representation of its state will imply. . .*". Comment une onde symbolique peut-elle être diffractée par une fente réelle ? ou bien la représentation symbolique de la fente (macroscopique) est-elle la fente elle même ?

de la complémentarité par Bohr est inefficace) qui permet de désamorcer la question EPR avec le terme ii) de l'alternative : il n'y a plus d'interaction après l'interaction car on n'est plus dans la physique, ce qui évolue, ce sont les connaissances :

> *If two separated bodies, each by itself known maximally, enter a situation in which they influence each other, and separate again, then there occurs regularly that which I have just called* entanglement *of our knowledge of the two bodies.*[page 161].

C'est là qu'est pour la première fois introduit le mot (Verschränkung, entanglement, enchevêtrement/intri
Ce mot est aujourd'hui largement utilisé, on parle de "systèmes intriqués", mais ce dont parle Schrödinger, ce n'est pas des systèmes mais bien de la connaissance que l'on a d'eux. La différence n'est pas minime, c'est tout simplement la volte-face épistémologique sans laquelle on retombe sous le coup de EPR, on le verra à la fin de cet article.

Schrödinger envisage, comme il se doit, l'utilisation de dispositifs d'enregistrement automatiques, ce qui met encore mieux en évidence le fond du problème :

> *Now how do things stand after automatically completed measurements ? We posess, afterwards same as before, a maximal expectation-catalog for the total system. The recorded measurement result is of course not included therein. As to the instrument the catalog is far from complete, telling us nothing at all about where the recording pen left its trace (remember that poisoned cat !). What this amounts to is that our knowledge has evaporated into conditional statements :* if *the mark is at line 1,* then *things are this and so for the measured object,* if *it is at line 2* then *such and such,* if *at line 3,* then *a third... etc* [page 161].

On retrouve là aussi, intrication des connaissances et pas des systèmes. On remarquera la référence au chat et c'est la seule dans tout l'article. Elle est légitime et on notera que là non plus, il n'est pas question d'observation d'états de superposition, mais bien de corrélations conditionnelles : si le chat est vivant l'atome n'est pas désintégré, s'il est mort oui.

Mais il faut bien revenir à la physique et à l'objet :

> *From this amalgamation the object can again be separated out only by the living subject actually taking cognizance of the result of the measurement. Some time or other this must happen if that which has gone on is actually to be called a measurement -however dear to our hearts it was to prepare the process throughout as objectively as possible...* not until this inspection*, which determines the disjunction does anything discontinuous or leaping take place. One is inclined to call this a* mental *action, for this object is already out of touch, is no longer physically affected : what befalls it is already past* [page 162].

L'essentiel est accompli : le recours nécessaire à la conscience.

Il est utile cependant de décrire la fin de l'article de Schrödinger : les chapitres 11 à 15 parus dans la troisième livraison et d'abord : *11) Résolution de l'enchevêtrement/intrication. Résultat dépendant de l'intention de l'expérimentateur.*

Jusqu'à ce chapitre, l'intrication traitée par Schrödinger était celle des informations concernant un système microscopique et un instrument de mesure après que ceux-ci soient entrés en interaction et aient terminé cette interaction. Cette fois, il repasse au cas général de deux systèmes sans rien préciser de leur nature, il se rapproche ainsi des systèmes I et II de EPR qui vont être explicitement évoqués dans le chapitre suivant *12) Un exemple*. Ici, dans *11)*, il insiste sur les conséquences logiques de la doctrine en examinant selon le schéma décrit ci-dessous sur les possibilités d'établir le catalogue d'un système à partir de mesures sur l'autre. Un plan de mesures sur B peut conduire à un catalogue maximal sur B et qui le devient en même temps sur A grâce aux conditions "si ceci sur B alors cela sur A" ; conditions qui sont entièrement résolues et donc éliminées dès lors que les résultats des mesures (sur B) sont connues. Mais des plans de mesure différents peuvent être conduits sur B, à la volonté de l'expérimentateur. Ces plans différents sur B conduisent à des catalogues sur A différents. Si l'un des plans est effectivement conduit et mène à un catalogue maximal/complet, et si l'autre est aussi conduit et mène lui aussi à un catalogue maximal, on s'attendrait à ce que ces catalogues sur A obtenus sans toucher à A et tous les deux maximals soient donc identiques. Il n'en est rien et il peut même arriver qu'ils n'aient rien en commun.

C'est déjà précisément l'argument EPR même si celui-ci ne sera présenté explicitement par Schrödinger qu'au chapitre suivant : *12) Un exemple*; n'y revenons pas, nous, puisque nous avons déjà examiné l'article EPR.

Avec le chapitre *13) Continuation de l'exemple : toutes les mesures sont sans équivoque enchevêtrées*, Schrödinger rappelle d'abord que selon beaucoup de ses amis, la question "Quelle réponse *aurait* été donné *si* l'expérimentateur avait ..." n'a rien à voir avec une vraie mesure et n'a donc pas lieu d'être posée selon le nouveau point de vue épistémologique. Il semble, une fois de plus, que Schrödinger ne se satisfasse pas complètement de ce point de vue. Il s'étonne de nouveau de l'intrication généralisée et s'interroge sur le mécanisme inattendu qui couple toutes les variables des catalogues quand les deux systèmes ont interagi :

> *For* every *measurement on the "small" [system], the numerical result can be procured by a suitably arranged measurement on the large one, and each measurement on the large stipulates the result that a particular measurement on the small would give or has given (...only the virgin measurement on each system counts)* [page 165].

On doit noter l'insistance pour Schrödinger sur le "catalogue des valeurs" plutôt que l'état du système (voir encore dans la conclusion ci-dessous).

Avec le chapitre *14) La dépendance temporelle de l'enchevêtrement. Considération du rôle spécial du temps*, Schrödinger note que les valeurs des variables varient en général avec le temps mais que tout le formalisme de la MQ concerne la valeur de ces variables à un instant parfaitement défini, quels que soient la durée des mesures et le temps que peut attendre l'observateur pour en prendre connaissance. Schrödinger s'interroge pourtant sur le fait que la valeur numérique du temps suppose une observation et donc d'une certaine façon l'intervention d'une horloge.

L'article se termine avec le chapitre *15) Loi naturelle ou moyen de calcul* :

Après avoir évoqué la difficulté de rendre la MQ compatible avec la relativité, de traiter le champ électromagnétique... Schrödinger revient sur l'essentiel de son intervention, et qui est aussi l'essentiel de EPR, dans un résumé remarquable :

> *The remarkable theory of measurement, the apparent jumping around of the ψ-function, and finally the "antinomies of entanglement", all derive from the simple manner in which the calculation methods of quantum mechanics allow two separated systems conceptually to be combined together into a single one ; for which the methods seem plainly predestined. When two systems interact, their ψ-functions, as we have seen, do not come into interaction but rather they immediately cease to exist and a single one, for the combined system, takes their place. It consists, to mention this briefly, at first simply of the* product *of the two individual functions ; which, since the one function depends on quite different variables from the other, is a function of all these variables, or "acts in a space of much higher dimension number" than the individual functions. As soon as the systems begin to influence each other, the combined function ceases to be a product and moreover does not again divide up, after they have again become separated, into factors that can be assigned individually to the systems. Thus one disposes provisionally (until the entanglement is resolved by an actual observation) of only a* common *description of the two in that space of higher dimension. This is the reason that knowledge of the individual systems can decline to the scantiest, even to zero, while that of the combined system remains continually maximal. Best possible knowledge of the whole does* not *include best possible knowledge of its parts -and that is what keeps coming back to haunt us* [page 167].

et Schrödinger conclut finalement :

> *The simple procedure provided for this by the non relativistic theory is perhaps after all only a convenient calculational trick, but one that today, as we have seen, has attained influence of unprecedented scope over our basic attitude toward nature* [page 167].

Schrödinger est ici très loin de la satisfaction dogmatique de l'école de Copenhague, mais, contraint et forcé il semble accepter ici, au contraire d'Einstein, la volte-face épistémologique de l'abandon du réalisme. Il ne s'en satisfera jamais.

4 Pendant soixante-quinze ans : observation et conscience.

Clairement revendiqué, honteusement accepté ou, sans contrepartie, dédaigneusement ignoré, le recours à la conscience comme clef de voûte de la MQ par son rôle dans la mesure est une constante qu'on va retrouver jusqu'à nos jours. En voici quelques exemples, le premier antérieur à EPR : ce n'est pas Schrödinger qui a inventé ce recours!

1) Au congrès Solvay de 1927, dans la session "Electrons and photons", l'exposé "Quantum mechanics" de Born et Heisenberg présente le point de vue de Göttingen-Copenhague et commence en insistant :

> *The new mechanics is based on the idea that atomic physics is essentially different from classical physics on account of the existence of discontinuities* [16](page 146).

On pourrait penser en termes de discontinuités physiques, mais dans la discussion qui suit (page 149) Heisenberg s'oppose à Dirac et explicite le rôle de "l'observation" :

> *Quantum theory, he [Dirac] said, describes a state by a time-dependent wave function ψ which can be expanded at a given time* t *in a series containing wave functions ψ_n with coefficients c_n. The wave functions ψ_n are such that they do not interfere at an instant* t $>$t$_1$*. Now Nature makes a choice sometimes later and decides in favour of the state ψ_n with the probability $|c_n|^2$. This choice cannot be renounced and determines the future evolution of the state. Heisenberg opposed this point of view by asserting there was no sense in talking about Nature making a choice, and that it was our observation that gives us the reduction to the eigenfunction. What Dirac called a "choice of Nature", Heisenberg preferred to call "observation", showing his predilection for the language he and Bohr had developed together.*

2) On continue, après 1935 cette fois, en 1939, par un livre remarquable à bien des égards : il est un des livres sur la MQ écrit en français et traduit et reconnu par la communauté anglophone. La préface comme le livre sont d'une grande clarté et s'y trouvent développés les éléments formels utiles au traitement de la mesure, cas pur et mélange statistique, opérateurs et matrices statistiques, trace partielle. Il traite comme EPR puis Schrödinger du cas de deux systèmes I et II etc... Cet ouvrage est préfacé par Paul Langevin, connu pour ses positions plutôt du côté du réalisme et du matérialisme, admirateur de A. Einstein, mais pour qui le recours à la conscience semble être devenu un fait d'expérience.

> *L'acte d'observation se trouve analysé ici de manière particulièrement aiguë et les caractères essentiels de la nouvelle physique y ressortent avec une entière clarté à travers les deux étapes du changement de la fonction d'onde par couplage du système observé avec l'appareil de mesure et par l'intervention de l'observateur qui prend conscience du résultat et fixe ainsi la nouvelle fonction d'onde consécutive à la mesure en intégrant celle-ci à l'information antérieurement acquise* [17] Préface de Paul Langevin, page 5.

Les auteurs, F. London et E. Bauer, détaillent évidemment plus et distinguent :

> *a) Les transformations réversibles que l'on peut appeler aussi "causales".* [dirait-on aujourd'hui déterministes ? qui correspondent à l'évolution de la fonction d'onde selon l'équation de Schrödinger]*. Elles transforment un cas pur en un cas pur* pages 38-39.

et

*b) Les transformations irréversibles que l'on pourrait appeler aussi "acausales". Celles-ci ne se réalisent qu'à l'occasion d'un contact du système en question (I) avec un autre système (II). Le système total embrassant les deux systèmes (I+II) subit encore une transformation réversible tant que l'ensemble I+II est isolé. Mais si nous fixons notre attention [*trace partielle*] sur le système I, ce dernier subira une transformation irréversible : s'il était dans un état pur avant le contact, il sera en général transformé en un mélange* [page 39].

*Celle-ci [*la mesure*] est achevée seulement lorsqu'on a* observé *la position de l'aiguille... [*ce*] qui donne à l'observateur le droit de choisir entre les différentes composantes du mélange prévus par la théorie, de rejeter celles qui ne sont pas observées et d'attribuer dorénavent à l'objet une nouvelle fonction d'onde, celle du cas pur qu'il a trouvé* [page 41] revoir la présentation de la MQ dans le présent article aux pages 5 à 7.

On notera comment la transformation irréversible est obtenue en "fixant notre attention" !

3) On retrouve presque la même expression chez L. de Broglie avec ce texte écrit en 1950-51 mais publié 30 ans plus tard :

Les transformations irréversibles correspondant à des processus non soumis au déterminisme se produisent au moment des interactions de mesure précédemment analysées. L'interaction du système étudié 1 avec l'appareil de mesure 2 correspond à une évolution déterminée et réversible de l'état global du système 1+2 jusqu'à ce que la constatation macroscopique de l'état individuel du système 2 par l'observateur vienne interrompre cette évolution en attribuant au système 1 un nouvel état par un processus qui n'est ni réversible ni [même] causal [dans l'interprétation actuelle] [18].

4) Avec Wigner (en 1961 mais réédité en 62, 67 et 83), on est dans l'affirmation triomphante :

When the province of physical theory was extended to encompass microscopic phenomena, through the creation of quantum mechanics, the concept of consciousness came to the fore again : it was not possible to formulate the laws of quantum mechanics in a fully consistent way without reference to the consciousness. All that quantum mechanics purport to provide are probability connections between subsequent impressions (also called "apperceptions") of the consciousness, and even though the dividing line between the observer, whose consciousness is being affected, and the observed physical object can be shifted towards the one or the other to a considerable degree, it cannot be eliminated [19] et [15] page 169.

It follows that the being with a consciousness must have a different role in quantum mechanics than the inanimate measuring device... [19] et [15] page 177.

5) Pour Wheeler, reprenant à son compte les arguments de Bohr, on semble d'abord dans la réalité objective (l'amplification irréversible), mais on retrouve un rôle final pour l'observateur avec le recours à l'observation :

In today's words Bohr's point -and the central point of quantum theory- can be put into a single simple sentence. 'No elementary phenomenon is a phenomenon until it is a registred (observed) phenomenon". [et plus loin :]

For a proper way of speaking we recall once more that it makes no sense to talk of the phenomenon until it has been brought to a close by an irreversible act of amplification : "No elementary phenomenon is a phenomenon until it is a registred (observed) phenomenon". [20] et [15] pages 184 et 192.

Et puis Wheeler, dans ces mêmes textes, au début des années 80, rapproche finalement et humoristiquement la MQ de l'art et même de la foi :

How can one contemplate indeterminism, complementarity and "phenomenon" without being reminded of the words of Gertrude Stein about modern art ? " It looks strange and it looks strange and it looks very strange ; and then suddenly it does not look strange at all and you can't understand what made it look strange in the first place [20] et [15] page 185.

6) On arrive maintenant avec Zurek dans la période contemporaine. Dans l'introduction de l'article qui justement présente la décohérence, Zurek est assez ambigu et évasif (on reprend et on complète la citation du début d'article) :

Given almost any initial condition the universe described by $|\Psi\rangle$ evolves into a state that simultaneously contains many alternatives never seen to coexist in our world. Moreover, while the ultimate evidence for the choice of one such option resides in our elusive "consciousness", there is every indication that the choice occurs long before consciousness ever gets involved [1] page 36.

D'un côté Zurek semble donc devoir reconnaître le rôle ultime de la conscience, mais ignorant toutes les questions que cela a soulevées depuis si longtemps, il tente de l'autre de se débarrasser de cet encombrant recours par le simple appel à du bon sens.

7) Dans son traité de MQ (1993) Asher Peres reprend l'expérience (devenue paradoxe) du chat de Schrödinger en même temps qu'il (re)pose la question du statut de la fonction d'onde -il tranche en fait contre son statut de réalité-. Il retrouve alors curieusement l'expression de Schrödinger mais élude par contre sa conclusion concernant la nécessité de la volte-face épistémologique et donc du rôle de l'observateur (l'action mentale).

Clearly, the "cat paradox" arises because of the naive assumption that the time evolution of the state vector ψ represents a physical process which is actually happening in the real world. In fact, there is no evidence whatsoever that every physical system has at every instant a well defined ψ (or a density matrix ρ) and that the time dependence of $\psi(t)$, or of $\rho(t)$, represents the actual evolution of a physical process. In a strict interpretation of quantum theory, these mathematical symbols represent statistical information *enabling us to compute the* probabilities *of occurrence of specific events* [21] page 373.

et un peu plus loin :

There have been many attempts to save the objectivity of the wave function by arguments such as : "Nobody has ever seen *a cat in state (12,1) [état de superposition], but this is only because the mere* observation *of the cat causes ψ to jump into either [vivant ou mort]* *states" (this jump is called a* collapse *of the wave function). There is nothing formally inconsistent in this scenario, but it is nevertheless incredible, as it implies a powerful and mysterious interaction between the brain of the observer and the entire body of the cat.* **A measurement, after all, is not a supernatural event. It is a physical process, involving ordinary matter, and whatever happens ought to be analysed by means of the ordinary physical laws.** [page 374].

8) Et puis aujourd'hui (oct-nov 2002) avec B. d'Espagnat [22]

Les sciences ont beau ne porter que sur l'expérience humaine, jusqu'à l'avènement de la MQ leurs principes constitutifs pouvaient s'énoncer dans un langage objectiviste, c'est-à-dire comme s'ils portaient sur l'être-en-soi. Aujourd'hui, c'est la physique elle-même qui -via la MQ- nous fait toucher du doigt la difficulté qu'il y a à ériger ses découvertes en descriptions fidèles d'une réalité de base indépendante de nous-mêmes... **Quant aux concepts quantiques, leur nature est d'être attachés non pas à des entités, mais bien à des opérations -humaines- de préparation et d'observation.** [[22] page 75.]

5 Les développements récents.

Des éléments nouveaux sont à considérer aujourd'hui. D'abord, la démonstration expérimentale, au moins la présomption forte, que les paramètres cachés **dans le passé commun** (le premier terme de l'alternative EPR) ne peuvent expliquer le fonctionnement de la "mesure" quantique. On verra par exemple les expériences d'A. Aspect et al [23]. On ne discutera pas de ces questions ici : d'une part, ce n'est pas du tout l'objet de cet article, d'autre part il est peut-être possible de se convaincre et c'était probablement le cas d'Einstein en 1949 (voir plus loin) que là ne peut pas être la solution.

Les deux éléments les plus directement liés au sujet sont d'une part les développpements expérimentaux et théoriques qui s'articulent autour de l'optique quantique, les manipulations d'atomes et de champs cohérents dans une cavité. D'autre part, un concept a été introduit, la décohérence, dont les objectifs sont de traduire plus formellement, on verra plus loin comment, les intuitions de l'école de Copenhague (*"This analysis is fully consistent with the Copenhagen description of a measurement"* écrit par exemple J.M. Raimond [5] page 566).

Nous présenterons d'abord la spécificité des "états cohérents" : la possibilité de passer avec eux continûment du microscopique au macroscopique. On présentera ensuite une expérience type associant manipulations d'atomes et états cohérents. Cette expérience schématique permettra de présenter les processus à l'œuvre au cours d'une "mesure" et d'expliciter le concept de décohérence. On s'appuiera pour cela sur le travail accompli dans ce domaine au Laboratoire Kastler-Brossel de l'ENS et dont on a déjà beaucoup cité les articles. Ces articles doivent être lus indépendamment de leur intérêt pour les questions discutées ici. Bien entendu, on ne rapportera, et schématiquement, que ce qui concerne notre propos, le problème de la mesure quantique et les corrélations EPR.

5.1 États cohérents ou semi-classiques : une possibilité d'états mésoscopiques.

Si on se propose d'explorer le passage du microscopique au macroscopique, il est intéressant de disposer d'un objet qui puisse lui-même exister dans les deux champs et effectuer la transition de l'un à l'autre. Les états cohérents ou semi-classiques sont de bons candidats pour cette fonction.

En électrodynamique classique, le champ existant dans une cavité peut être décrit comme résultant de l'addition d'oscillateurs harmoniques dont les fréquences sont les fréquences "naturelles" de la cavité. Avec l'électrodynamique quantique, ce sont ces oscillateurs, les modes du champ, qui sont quantifiés.

Pour chaque mode de fréquence angulaire ω, on définit les opérateurs de création a^+ et d'annihilation a. L'opérateur nombre (de photons de ce mode) s'écrit alors $N = a^+a$.

Deux types d'état très différents sont alors à considérer

- Les états $|n>$ qui sont les états propres de l'opérateur nombre :

$$N|n>= a^+a|n>= n|n>$$

- Les états cohérents [24] ou semi-classiques ou d'incertitude minimale, qui sont les états propres de l'opérateur d'annihilation :

$$a|\alpha>= \alpha|\alpha>$$

Les états $|\alpha>$ sont une combinaison linéaire des états $|n>$:

$$|\alpha>= exp(-1/2|\alpha|^2)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\alpha^n}{(n!)^{1/2}}|n>$$

En conséquence, ils ne correspondent pas à un nombre donné de photons. Une mesure de n donnera différents résultats avec les probabilités :

$$P(n) = \frac{|\alpha|^{2n}exp(-|\alpha|^2)}{n!}$$

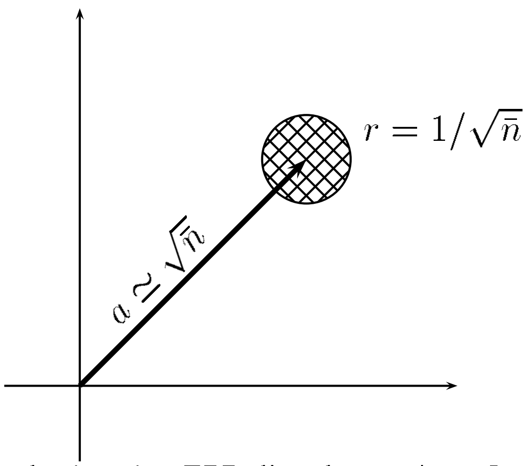
Les états $|n>$ sont stationnaires ; même si n est grand, l'état stationnaire $|n>$ ne peut approcher une onde classique.

les états $|\alpha>$ ne sont pas stationnaires et leur amplitude complexe varie avec le temps :

$$|\,\alpha(t)\,\rangle = |\,\alpha e^{-i\omega t}\,\rangle$$

C'est ce qui permet à un état $|\alpha\rangle$ de s'approcher d'une onde classique autant que la mécanique quantique le permet, et elle le permet d'autant mieux que $|\alpha|$ est grand. Ceci est illustré sur le schéma ci-dessous où l'onde est représentée par son vecteur de Fresnel qui donne son amplitude et sa phase. Le cercle hachuré de rayon r représente l'incertitude sur l'une et l'autre. Le rayon r est d'autant plus petit que $|\alpha|$ est grand.

On voit bien alors la possibilité d'atteindre un état mésoscopique voisin de l'un ou de l'autre des champs microscopique ou macroscopique selon que $|\alpha|$ est petit ou grand.

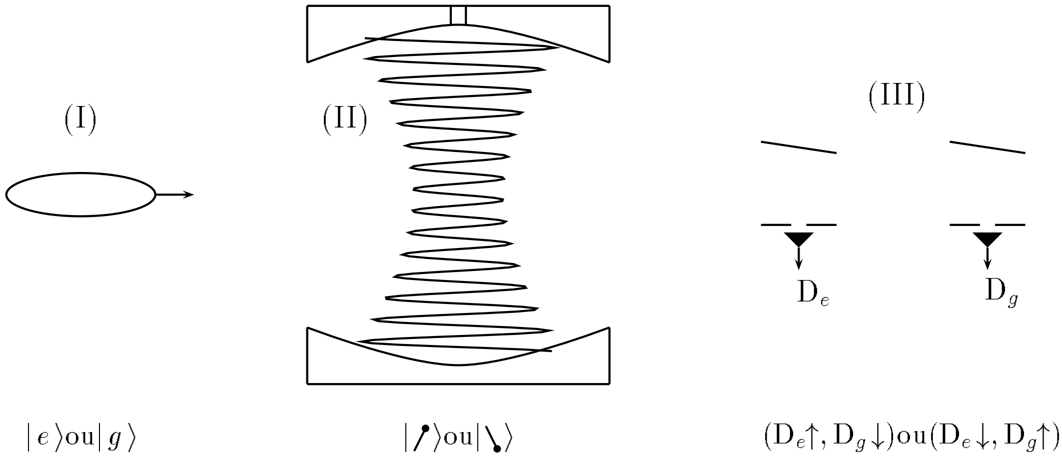


Dans la situation EPR, l'un des systèmes I ou II pourra voir ainsi son caractère macro- ou micro- varier.

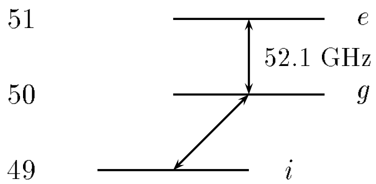
5.2 Expérience : les éléments de base.

L'expérience type (voir schéma ci-dessous) fait interagir un atome de Rydberg circulaire (le système I) et un état cohérent présent dans une cavité (le système II). L'atome doté d'une grande vitesse traverse la cavité et c'est le mouvement de cet atome qui "allume" puis "éteint" l'interaction en introduisant puis retirant l'atome de la cavité et donc de l'interaction avec le champ.

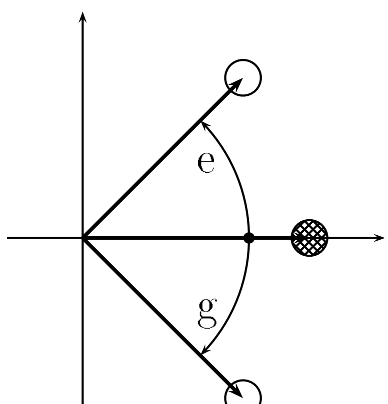
L'atome est ensuite lui-même soumis à une mesure par corrélation avec un détecteur d'état par ionisation (système III).



L'atome de Rydberg circulaire peut être préparé dans trois états i, g, e, correspondant respectivement aux trois valeurs du nombre quantique principal n= 49, 50, 51. On ne s'intéressera ici qu'aux états e et g. Cet atome, de rayon 1000 fois plus grand que dans son état fondamental et d'autant plus grand que n est grand, a une interaction dipolaire avec le champ cohérent de la cavité dont la fréquence est très voisine de la transition e $\Longleftrightarrow$ g à 52,1 GHz.



Par effet d'indice de réfraction, celui qui serait obtenu par l'introduction d'un matériau transparent dans la cavité, le passage de l'atome dans la cavité conduit à une rotation du vecteur de Fresnel du champ cohérent, dans un sens si l'atome est dans l'état e, dans le sens opposé s'il est dans l'état g.



L'atome est ensuite ionisé, au passage dans le premier détecteur (marqué D_e) s'il est dans l'état e, au passage dans le second (marqué D_g, où le champ est plus fort) s'il est dans l'état g.

Dans une première expérience schématique, les atomes (le système I) sont préparés dans l'état e ou dans l'état g. Dans la situation ainsi décrite, les états des trois systèmes (I,II,III) se trouvent corrélés sans surprise ni résultat aléatoire :

ou bien on envoie $|\,e\,\rangle$ et il s'ensuit que le champ est porté dans l'état $|\nearrow\rangle$ et le détecteur D_e déclenche (on notera $\mathrm{D}_e\uparrow$),

ou bien on envoie $|\,g\,\rangle$, le champ est porté dans l'état $|\searrow\rangle$, le détecteur D_g déclenche (on notera $\mathrm{D}_g\uparrow$).

Pas de doute non plus que c'est la nature initiale de l'atome $|\,e\,\rangle$ ou $|\,g\,\rangle$ qui a déterminé, d'abord le basculement du champ, puis le déclenchement du détecteur approprié au cours du trajet de cet atome.

On peut représenter ces deux expériences par les deux schémas :

$$|\,e\,\rangle \Longrightarrow |\,e\,\rangle|\nearrow\rangle \Longrightarrow |\nearrow\rangle(\mathrm{D}_e\uparrow, \mathrm{D}_g\downarrow) \tag{1}$$

$$|\,g\,\rangle \Longrightarrow |\,g\,\rangle|\searrow\rangle \Longrightarrow |\searrow\rangle(\mathrm{D}_e\downarrow, \mathrm{D}_g\uparrow) \tag{2}$$

On a fait disparaître à droite la représentation de l'atome puisqu'*après* déclenchement de l'un ou l'autre des détecteurs l'atome est ionisé et on ne s'intéresse plus à son état.

On doit garder à l'esprit, à la lecture de ces schémas et de ceux qui suivent, la succession des événements dans le temps et dans l'espace. L'atome se déplace à vitesse finie, le champ est confiné dans la cavité et les détecteurs situés à quelques centimètres de celle-ci.

5.3 Expérience : on introduit un état de superposition.

Pour faire intervenir maintenant des états quantiques corrélés, il faut introduire un état de superposition sur le système (I). Pour cela, les atomes d'abord préparés dans l'état e sont ensuite portés dans un état de superposition e+g, par **un dispositif non représenté, avant de pénétrer dans la cavité**. Après le passage dans la cavité, on est donc passé d'un état de superposition à un état de superposition d'états corrélés, des paires EPR pourrait-on dire. Mais il n'y a pas encore eu mesure proprement dite, il n'y a pas eu irréversibilité (ni intervention de conscience !) car en principe, on peut aussi bien décider de mesurer l'atome pour avoir l'état du champ qu'à l'inverse, mesurer le champ pour avoir l'état de l'atome. C'est le premier cas qu'on va (d'abord) considérer : la mesure sera accomplie sur l'atome par les détecteurs D_e ou D_g.

Avant de pénétrer dans les détecteurs, on a maintenant le schéma, unique cette fois (une seule préparation, un seul résultat jusque-là) :

$$|\,e\,\rangle \Longrightarrow |\,e\,\rangle + |\,g\,\rangle \Longrightarrow |\,e\,\rangle|\nearrow\rangle + |\,g\,\rangle|\searrow\rangle \tag{3}$$

Le champ dans la cavité est mésoscopique, mais dans les expressions ci-dessus, il a été traité comme microscopique : les superpositions sur les états de l'atome sont corrélées aux superpositions du champ (intrication, entanglement, Verschränkung). Avec l'étape suivante, on interrompt cette chaîne de corrélations pour passer au processus de mesure proprement dite associée à l'intervention des instruments macroscopiques que sont les détecteurs à ionisation D_e et D_g. On applique les postulats et l'aspect probabiliste apparaît en même temps que le cas pur devient un mélange :

$$|\,e\,\rangle|\nearrow\rangle + |\,g\,\rangle|\searrow\rangle \Longrightarrow \begin{cases} |\nearrow\rangle(D_e\!\uparrow, D_g\!\downarrow) & (e) \\ \text{ou} & \\ |\searrow\rangle(D_e\!\downarrow, D_g\!\uparrow) & (g) \end{cases} \tag{4}$$

On a chacune de ces possibilités (e ou g) avec la même probabilité et avec la même préparation d'atome initiale $|\,e\,\rangle$.

Supposons maintenant que nous n'ayons pas interrompu la chaîne des corrélations à l'entrée du détecteur ou encore que celui-ci ait été traité comme microscopique. On aurait alors à la place du passage de (3) à (4), le passage à

$$|\,e\,\rangle \Longrightarrow |\,e\,\rangle + |\,g\,\rangle \Longrightarrow |\,e\,\rangle|\nearrow\rangle + |\,g\,\rangle|\searrow\rangle \Longrightarrow |\nearrow\rangle(D_e\!\uparrow, D_g\!\downarrow) + |\searrow\rangle(D_e\!\downarrow, D_g\!\uparrow) \tag{5}$$

Si le passage de l'état de superposition des détecteurs dans (5) au tirage de l'un ou l'autre de ces états dans (4) n'est rendu légitime que par le caractère macroscopique du détecteur, il faut insister sur la part d'arbitraire de cette distinction entre micro- et macroscopique (nous restons au cœur du problème de la mesure). C'est pour tenter de réduire cette part d'arbitraire que le concept de décohérence a été introduit.

5.4 Le principe de la décohérence.

C'est le passage de l'expression (3) à l'expression (4) d'une part ou à l'expression (5) d'autre part que la décohérence va détailler et tenter de régler.

Deux modifications mineures formelles sont introduites :

i) Pour simplifier l'expression, on va supposer que l'ensemble des détecteurs D_e et D_g est réduit à un seul détecteur D_g qui, soit déclenche indiquant que l'atome "était" dans l'état g et que le champ "est" désormais dans l'état bas, soit qu'il n'a pas déclenché, que l'atome "était" dans l'état e et que le champ "est" désormais dans l'état haut.

ii) Le mélange e et g est effectué avec les poids explicites α et β (au lieu de 1 et 1) afin de mieux garder la trace de l'origine des différents termes dans les développements qui suivent.

Immédiatement après (3), mais en introduisant la représentation du détecteur *avant* son interaction, l'état inital est un état (partiellement) factorisé :

$$|\,\phi_i\,\rangle = (\alpha|\,e, \nearrow\rangle + \beta|\,g, \searrow\rangle)|\,\mathrm{D}_g\!\downarrow\rangle$$

Après l'interaction, il n'est plus factorisé (il s'agit d'une simple réécriture de (5)) :

$$|\,\phi_c\,\rangle = \alpha|\nearrow\rangle|\,\mathrm{D}_g\!\downarrow\rangle + \beta|\searrow\rangle|\,\mathrm{D}_g\!\uparrow\rangle$$

On passe alors à la représentation en matrice densité ρ_c de $|\,\phi_c\,\rangle$ qui a la vertu de permettre de décrire aussi bien les cas purs que les mélanges statistiques et qui est donc l'instrument adapté au passage de (5) à (4), c'est-à-dire à la description de la mesure.

$$\rho_c = |\,\phi_c\,\rangle\langle\,\phi_c\,| =$$

$$|\alpha|^2|\nearrow\rangle\langle\nearrow||\,\mathrm{D}_g\!\downarrow\rangle\langle\,\mathrm{D}_g\!\downarrow\,| + |\beta|^2|\searrow\rangle\langle\searrow||\,\mathrm{D}_g\!\uparrow\rangle\langle\,\mathrm{D}_g\!\uparrow\,|$$

$$+\alpha\beta^*|\nearrow\rangle\langle\searrow||\,\mathrm{D}_g\!\downarrow\rangle\langle\,\mathrm{D}_g\!\uparrow\,| + \alpha^*\beta|\searrow\rangle\langle\nearrow||\,\mathrm{D}_g\!\uparrow\rangle\langle\,\mathrm{D}_g\!\downarrow\,|$$

On n'a pas encore introduit de mesure mais seulement une corrélation supplémentaire des systèmes I et II déjà corrélés avec le système III des détecteurs : il s'agit d'une réécriture dans le formalisme de la matrice densité de l'expression (5) qui représente un cas pur.

Dans les quatre éléments de la matrice densité, les éléments diagonaux (première ligne), dont les poids sont $|\alpha|^2$ et $|\beta|^2$, sont simples à interpréter car le détecteur et le champ sont dans des états correspondants. Les éléments non diagonaux, dits d'interférence, ne le sont pas puisque les états du champ et ceux du détecteur sont croisés. Ce sont justement ces termes qui, par le couplage avec l'environnement (un système IV, macroscopique lui), vont être conduits très rapidement à zéro : c'est le principe de la décohérence, son intervention spécifique.

Avec ses termes d'interférence, la matrice densité était celle d'un cas pur, maintenant, sans eux, elle est celle d'un mélange qui correspond dans la pratique **ou bien** à l'observation du détecteur dans l'état $\mathrm{D}_g\!\downarrow$ **ou bien** dans l'état $\mathrm{D}_g\!\uparrow$, c'est à dire au passage à l'expression (4). En terme d'observations, la répétition de l'expérience voit ces résultats ($\mathrm{D}_g\!\downarrow$ ou $\mathrm{D}_g\!\uparrow$) trouvés avec les probabilités correspondantes $|\alpha|^2$ et $|\beta|^2$.

Ce que sont les termes diagonaux et ceux d'interférence dépend du choix de la base (une base construite avec des combinaisons linéaires orthogonales de $\mathrm{D}_g\!\downarrow$ et $\mathrm{D}_g\!\uparrow$ donnerait un tout autre résultat), mais ce choix n'est qu'apparemment arbitraire : la base qui doit être choisie est celle où les détecteurs concrets (et le champ) sont dans les états effectivement observés, ici $\mathrm{D}_g\!\downarrow$ et $\mathrm{D}_g\!\uparrow$. On peut dire que c'est là que se manifeste un rapport étroit avec la "complémentarité" de Bohr : les expériences différentes pour mesurer des variables différentes et par exemple complémentaires vont conduire à des descriptions théoriques différentes et finalement à des résultats différents. Cela ne constitue cependant pas un fondement de cette complémentarité.

Peut-être n'est-il pas complètement légitime de parler d'un *processus* de décohérence, cela place d'emblée celle-ci dans le domaine de la physique et pas dans celui de la représentation abstraite, cependant la décohérence a une durée. On verra plus bas que cette durée est d'autant plus courte que les états diagonaux considérés sont plus éloignés et donc aussi qu'ils sont plus macroscopiques.

On a supposé là que le formalisme de la décohérence ...était cohérent et efficace sans du tout en examiner le fonctionnement. C'est au mieux ce qu'il peut être et on verra plus bas quelles en sont les conséquences. On risquera un seul commentaire sur ce concept : on ne peut passer d'un cas pur, une fonction d'onde, à un mélange, que si l'environnement est lui-même déjà un mélange. La décohérence si elle fonctionne ne peut donc expliquer en quelque sorte que la contagion du mélange mais pas la naissance initiale de ce mélange. On ne s'interesse ici à la décohérence que par rapport à l'alternative EPR ; on supposera qu'elle fonctionne pleinement comme elle le prétend.

5.5 La décohérence en compétition.

À la sortie de la cavité, on l'a dit plus haut, le système corrélé atome-champ

$$|\,\phi_i\,\rangle = |\,e,\nearrow\rangle + |\,g,\searrow\rangle$$

est susceptible de subir aussi bien une mesure sur l'état e ou g de l'atome (qui détermine l'état correspondant du champ) qu'une mesure de l'état $\nearrow$ ou $\searrow$ du champ (qui détermine celui de l'atome.) Dans le premier cas, on suppose que le champ n'est soumis à aucune interaction avec l'environnement, dans le second, c'est l'atome qui doit rester épargné. C'est le premier cas qu'on a traité jusqu'à maintenant. La décohérence était à l'œuvre seulement pour les détecteurs D.

Le champ cohérent est en fait soumis lui aussi à l'environnement par la "fuite" des photons d'une part et par l'absorption des photons par les défauts des miroirs. Si bien qu'on peut dire que les interactions des deux sous-systèmes (l'atome et le champ) avec leur environnement, les deux décohérences, sont en compétition et ce sont leurs temps caractéristiques qu'il faut comparer en tenant compte du décalage temporel dû au transit de l'atome depuis la sortie de la cavité jusqu'aux détecteurs D (quelques centimètres parcourus à 400m/s).

Examinons les différents temps qui interviennent :

T_r le temps de vie du champ cohérent dans la cavité. Il dépend de la qualité de la cavité et varie de $\approx 150\mu$s à 1 ms (sans ou avec anneau réfléchissant).

T_d temps de décohérence pour le passage de l'état de superposition des deux états du champ à l'un ou l'autre de ces états. On évalue la "distance" D des deux états du champ à :

$$D = 2\sqrt{n} sin\phi$$

où n est le nombre moyen de photons et ϕ l'angle entre les deux composantes. On a alors :

$$T_d = 2T_r/D^2$$

Le temps de décohérence est d'autant plus petit que D est grand.

Avec n $\approx$ 3,3, $T_r \approx 160\mu$s, T_d peut descendre à 0,25 T_r rendant possible l'observation d'une manifestation de cette décohérence.

T_T le temps de transit de l'atome est typiquement $\approx$ 100 μs

Le temps de décohérence t_D pour les détecteurs macroscopiques D est très petit, trop pour être accessible à la mesure.

Avec un système mésoscopique on peut comme attendu porter les temps de décohérence dans le champ des valeurs mesurables et permettre donc l'observation et l'épreuve quantitative de cette décohérence. Ces temps de décohérence sont donc largement supérieurs à ceux des détecteurs macroscopiques D, mais ils restent inférieurs au temps de transit T_T et c'est donc la décohérence du champ qui a lieu bien avant que l'atome n'atteigne les détecteurs -au contraire de ce qui a été supposé jusqu'ici.

Cependant, quels que soient tous ces temps, aucune mesure simple ne permet de distinguer si l'atome a été mesuré avant le champ ou l'inverse : même la corrélation des observations de l'état du champ (s'il était observable) et de celui de l'atome par l'état des détecteurs D reste la même. Il faut une expérience plus complexe.

5.6 La décohérence en expérience.

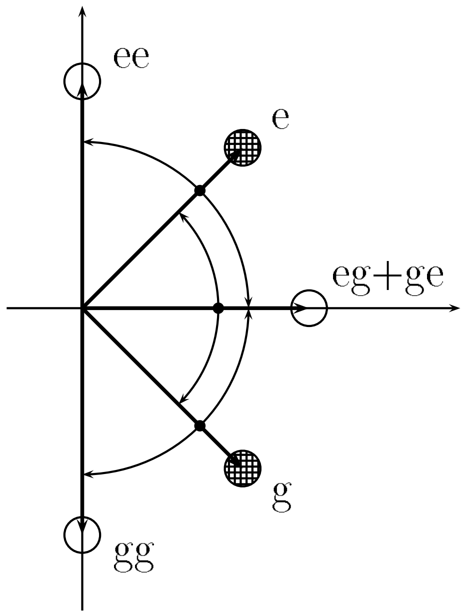
Pour mettre à l'épreuve ce temps de décohérence après le passage de l'atome dans la cavité, on va envoyer un second atome, préparé comme le premier. Selon le temps qui sépare les deux passages, ce second atome va trouver ou bien le champ dans son état de superposition, ou bien l'un ou l'autre des états.

La détection des deux atomes de chaque couple peut être trouvée selon quatre configurations : ee, eg, ge, et gg, et c'est la différence des deux probabilités conditionnelles :

$$\eta = \frac{P_{ee}}{P_{ee} + P_{eg}} - \frac{P_{ge}}{P_{ge} + P_{gg}}$$

qui constitue le paramètre pertinent à soumettre à des mesures.

Afin d'assurer l'existence des interférences entre les différentes "trajectoires" le mélange quantique des états (celui qui fait passer de e à e+g) doit être présent **non seulement à l'entrée de la cavité comme supposé jusqu'ici, mais également à la sortie**. En fait, deux systèmes identiques alimentés par une même source micro-onde effectuent ces fonctions.



Comme indiqué dans le schéma ci-contre, c'est parce qu'il y a deux chemins possibles eg et ge qui interfèrent pour revenir finalement à l'état initial du champ (déphasage zéro) que ce paramètre est sensible à la présence des états superposés. Le paramètre η prend la valeur 0,5 si le champ dans la cavité est resté dans un état de superposition (un cas pur) quand le deuxième atome y arrive ; par contre il s'annule si le champ est un mélange.

Mais qu'est-ce qui peut provoquer le pasage de l'un à l'autre ? C'est la mesure (en quelque sorte) de l'état de ce champ par son environnement ; la décohérence provoquée ici par la fuite des photons hors de la cavité peut prendre cette fois un temps observable grâce à l'état mésoscopique du champ.

En jouant sur la séparation des deux états du champ (déphasage plus ou moins grand) et sur le taux de fuite (déterminé par le nombre moyen de photons présents) on rend cette décohérence plus ou moins rapide. Le deuxième atome trouve un état de superposition du champ ou bien l'un ou l'autre de ces états du champ. La valeur moyenne de η explorée en fonction du rapport des temps de décohérence à l'écart de temps entre les deux atomes passe de 0,5 à 0 selon une loi que l'expérience semble bien vérifier [2][5]. On peut considérer que le concept de décohérence et son traitement théorique quantitatif sont bien établis expérimentalement.

On va devoir plus bas établir son rapport à l'alternative EPR mais insistons cependant sur le déroulement global de l'expérience qui consiste en la répétition d'expériences identiques. Pour chacune de ces expériences, l'envoi successif de deux atomes séparés par un intervalle de temps donné, le résultat observé est la séquence de déclenchement des détecteurs e et g trouvée parmi les quatre possibilités ee eg ge gg. Le paramètre η n'est obtenu qu'après la répétition de nombreuses expériences individuelles. Rien ne peut être dit de ce qu'était l'état du champ dans chacune des expériences individuelles. On n'observe la décohérence progressive qu'autant qu'on observe la décroissance progressive d'un noyau radioactif. Dans les deux cas, **c'est la probabilité qui évolue progressivement**. Dans les deux cas le système est dans une alternative d'états (initial/avec particule émise ; ou de superposition/simple).

6 Les développements récents et l'alternative EPR.

6.1 La question du temps.

Pour la MQ en général et pour la décohérence, on a indiqué plus haut que le temps n'apparaissait qu'en termes de séquences de différences de temps séparant la réalisation d'événements successifs. Le positionnement absolu de cette séquence est non seulement inconnu -c'est assez évident- mais non maîtrisable. Si l'observation et l'intervention ultime de la conscience jouent un rôle dans la mesure, leur positionnement, au moins précis, dans les séquences temporelles semble délicat à établir. Il faut pourtant qu'elles terminent ces séquences. Examinons comment ce temps "macroscopique" est abordé par les différents intervenants.

Pour EPR, il y a d'une part un temps au-delà duquel l'interaction entre les deux systèmes est terminée, d'autre part un laps de temps ultérieur où un dispositif de mesure ou un autre est mis en place, et enfin un temps de mesure avec le dispositif choisi. C'est précisément la constatation d'une dépendance du résultat du choix du dispositif *après* que l'interaction ait été déclarée terminée qui fait problème. Pour EPR, "dépendre de" est identique à "interagir avec". Si on est amené à parler d'interaction après l'interaction, c'est que l'interaction n'est pas terminée quand on prétend qu'elle l'est. Rappelons que l'autre terme de l'alternative EPR -la dépendance est issue du passé commun- n'est pas défendable aujourd'hui, on verra plus loin qu'on peut douter qu'elle l'ait encore été pour Einstein en 1949.

Si Bohr n'a pas traité ce terme de l'alternative EPR, il a cependant évoqué la question du temps :

The experimental arrangements hitherto discussed present a special simplicity on account of the secondary role which the idea of time plays in the description of the phenomena in question. It is true that we have freely made use of such words as "before" and "after" implying time relationships ; but in each case allowance must be made for a certain inaccuracy, which is of no importance, however, so long as the time intervals concerned are sufficiently large compared with the phenomenon under investigation [14] page 700.

Pour Schrödinger en complément de ce que nous avons déjà rapporté, d'un côté, une position très claire :

Since they [Q.M. predictions] are supposed to relate measurement results, they would be entirely without content if the relevant variables were not measurable for *a definite point of time, whether the measurement itself lasts a long or a short while.*

When we learn *the result is of course quite immaterial* [10] page 166..

et de l'autre une déclaration qui devient plus embarrassée quand on entre dans le détail (on reprend et poursuit la citation du chapitre 10, page 162) :

... what befalls it is already past. But it would not be quite right to say that the ψ-function of the object which changes otherwise *according to a partial differential equation, independent of the observer, should* now *change leap fashion because of a mental act. For it had disappeared ; it was no more. Whatever is not, no more can it change. It is born anew, is reconstituted, is separated out from the entangled knowledge that one has, through an act of perception, which as a matter of fact is not a physical effect on the measured object. From the form in which the ψ-function was last known, to the new in which it reappears, runs no continuous road -it ran indeed through annihilation. Contrasting the two forms, the things look like a leap. In truth something of importance happens in between, namely the influence of the two bodies on each other, during which the object possessed no private expectation-catalog nor had any claim thereto, because it was not independent* [10] page 162.

On observe là un mélange peu convaincant entre le recours à l'action mentale déjà apparu et un rappel opportun de la physique mais qui ne survit pas pour autant.

6.2 Ce que la décohérence introduit dans le débat.

C'est dans le formalisme de la matrice densité, que la décohérence prédit le passage d'un cas pur à un mélange par l'extinction progressive des termes non-diagonaux/d'interférence. Grâce à ses termes diagonaux, la décohérence prédit aussi le comportement statistique des valeurs observées dans l'examen d'un ensemble. Mais **elle ne dit rien sur l'émergence pour une expérience particulière de l'un ou l'autre des cas possibles, et seulement l'un**. On peut même dire que le formalisme de la matrice densité est bien adapté pour faire disparaître cette carence. En ce sens elle ne répond pas non plus au questionnement d'Einstein concernant l'aspect probabiliste de la MQ.

Mais comment la décohérence répond-elle à l'alternative EPR ? et comment permet-elle d'éviter le recours à la conscience devenu aujourd'hui encombrant ?

Présenté dans les termes objectifs du réalisme il est vrai, la décohérence introduit une constante de temps entre la mise en rapport du dispositif de mesure et du système mesuré, et la séparation irréversible (et plus tard observable) de l'une des réalisations de couples de variables intriquées (on notera cependant une certaine imprécision quant au temps zéro, il s'agit le plus souvent de corrélations, de séquences temporelles). Sans y obliger, la décohérence pousse ainsi vers la description de la "mesure" comme un phénomène physique concret, objectif. Ce que justement la "volte-face épistémologique" avait voulu éviter avec son recours à la conscience. Avec la décohérence, il semblerait alors que ce recours à la conscience soit devenu plus nécessaire. Mais ce recours déjà en principe indéfendable apparaît aujourd'hui de moins en moins acceptable dans la communauté des physiciens.

On comprend peut-être alors -on comprend sans justifier !- le contresens sur le chat de Schrödinger et le questionnement sur le passage du micro- au macroscopique :

> *This result illustrates the basic feature of the quantum to classical transition. Mesoscopic superpositions made of a few quanta are expected to decohere in a finite time interval [shorter than T_r], while macroscopic ones ($n \gg 1$) decohere instantaneously and cannot be observed in practice* [2] page 4887.

Si le problème avait été celui là -la non-observation directe des états de superposition- alors il serait résolu et l'interprétation de Copenhague émergerait immaculée. Il n'en est rien.

En parallèle avec cet usage de la décohérence et bien antérieurement, on a parlé de non-localité, de non-séparabilité (des expressions forgées pour cet usage), mais si ces expressions peuvent être utiles comme raccourci de description, elles doivent appeler les questions sur le pourquoi et le comment de ces propriétés, elles ne peuvent les remplacer. On ne peut accepter un comportement des physiciens vis-à-vis de la microphysique comparable à celui des médecins de Molière vis-à-vis de l'opium (Le Malade imaginaire, Intermède 3) :

BACHELIERUS	*LE BACHELIER*
Mihi a docto doctore	*Par le docte docteur il m'est*
Demandatur causam et rationem quare	*Demandé la cause et la raison pour lesquelles*
Opium facit dormire.	*L'opium fait dormir.*
A quoi respondeo,	*A quoi je réponds :*
Quia est in eo	*Parce qu'il est en lui*
Vertus dormitiva,	*Une vertu dormitive,*
Cujus est natura	*Dont la nature est*
Sensus assoupire	*d'assoupir les sens.*
CHORUS	*LE CHŒUR*
Bene, bene, bene, bene respondere	*Bien, bien, bien, bien répondu :*
Dignus, dignus est intrare	*Digne, il est digne d'entrer*
In nostro docto corpore	*Dans notre docte corporation.*
Bene, bene, bene, bene respondere	*Bien, bien, bien, bien répondu :*

Alors, une vertu non-locale ? Dont la nature est d'étendre la portée ?

Rappelons-en le contenu dans les termes d'Einstein (EPR) :

> *On this point of view since either one or the other, but not both simultaneously, of the quantities P and Q can be predicted, they are not simultaneously real. This makes the reality of P or Q [sur le système II] depend upon the process of measurement carried out on the first system which does not disturb the second system in any way. No reasonable definition of reality could be expected to permit this.*

C'est la contradiction entre "depend upon" et "does not disturb" qu'il faut lever : il y a dépendance et interaction dans des termes spécifiques qu'il faut préciser. Il faut aussi préciser l'articulation de cette dépendance ou de cette interaction avec la relativité restreinte sans se contenter de dire "*There is never contradiction between nonlocality and relativistic causality*" [5] page 566.

6.3 Retour à Einstein et retour d'Einstein.

Examinons ce que sont devenus en 1949 les trois éléments qui en 1926 caractérisaient pour Albert Einstein la MQ selon sa lettre à M. Born (citée plus haut) : le respect pour les succès de la MQ, l'insatisfaction globale, et l'insatisfaction plus nette concernant l'aspect probabiliste des résultats. Il commence par ce dernier qui reste il faut le dire le fer de lance :

> *I am, in fact, [au contraire "of almost all contemporary theoritical physicists"] firmly convinced that the essentially statistical character of contemporary quantum theory is solely to be ascribed to the fact that this [theory] operates with an incomplete description of physical systems* [13] page 666.

Notons qu'aucun recours, direct ou non, à d'éventuels paramètres cachés n'est ici évoqué. Il poursuit par le respect aux succès de la MQ qu'il précise avec la plus grande clarté :

> *This theory [statistical quantum theory] is until now the only one which unites the corpuscular and ondulatory dual character of matter in a logically satisfactory fashion ; and the (testable) relations which are contained in it, are, within the natural limits fixed by the indeterminacy relation,* complete. *The formal relations which are given in this theory -i.e. its entire mathematical formalism- will probably have to be contained, in the form of logical inferences, in evey useful future theory* [13] pages 666-667.

Un éloge impressionnant qui contredit radicalement l'opinion quelquefois attribuée à Einstein d'un rejet de la MQ. Il passe ensuite au "paradoxe" EPR :

> *By this way of looking at the matter [la manière de Bohr] : "the partial systems A and B form a total system"] it becomes evident that the paradox forces us to relinquish one of the following two assertions :*
>
> (1) the description by means of the ψ-function is *complete*
>
> (2) the real states of spatially separated objects are independent of each other.
>
> *On the other hand, it is possible to adhere to (2), if one regards the ψ-function as the description of a (statistical) ensemble of systems (and therefore relinquishes (1)). Howecer, this view blasts the framework of the "orthodox quantum theory." [13]*page 682.

On retrouve une alternative plutôt qu'un paradoxe, mais chacun des termes conduit bien à une incomplétude de la MQ. Notons que l'abandon de (2) ne donne aucune réponse à l'origine du caractère probabiliste du résultat des mesures, mais on admet la non-séparabilité.

Que ce soit là pour Einstein une question de physique nous paraît attesté par ce commentaire final -insistons qu'il termine toute la discussion concernant la MQ par cela- :

> *I close these expositions, which have grown rather lengthy, concerning the interpretation of quantum theory with the reproduction of a brief conversation which I had with an important theoretical physicist.*
>
> *He : "I am inclined to believe in telepathy."*
>
> *I : " This has probably more to do with physics than with psychology."*
>
> *He : "Yes"*
>
> [13] page 683.

Cela devrait interpeller étrangement les auteurs des commentaires que l'on peut lire aujourd'hui :

> *According to our calculations, we may decide whether to emphasize wave like (interference) or particle like (which path) behavior even after the emission is over* **without physically "manipulating"** *the γ photons [25]*Marlan O. Scully 1982, page 2208.
>
> *Pourtant il* [le photon] *se comporte toujours d'une façon qui dépend du test effectué sur l'autre photon, bien* **qu'il ne puisse être physiquement influencé** *par l'accomplissement de la mesure ou par le résultat ainsi obtenu* [26] Giancarlo Ghirardi 2002, page 22.

On reviendra sur cette question... pour décrire comment l'expérience [EPR] a été réalisée en soulignant ce qui semble faire aujourd'hui son intérêt essentiel : la mise en évidence d'états "enchevêtrés" à longue distance ... avec toutes leurs **diableries** *surprenantes mais avérées* [27] R. Omnès 2000, page 168.

Cette intriquation subsiste même si les deux atomes se sont éloignés l'un de l'autre et se trouvent séparés après la collision par une distance arbitrairement grande. Elle décrit une "non-localité" fondamentale de la physique quantique. Une mesure de l'atome 1 peut avoir un effet immédiat à grande distance sur le résultat de la mesure de l'atome 2 ! Il y a donc entre les deux particules un lien quantique **immatériel et instantané**. *C'est Einstein, avec ses collaborateurs Podolsky et Rosen, qui a discuté le premier en 1935 cet aspect troublant de la théorie quantique* [28] Serge Haroche (2001) page 577.

Mais justement, peut-être Einstein répondrait-il à tous ces physiciens que c'est de physique qu'il s'agit et d'une part que l'immatériel n'a pas sa place et que d'autre part, l'instantané pose problème.

Le nouveau cependant, c'est bien comme le déclarent les intervenants de l'ENS :

*On peut alors aborder à nouveau, mais de façon concrète, l'étude des fondements de la théorie.*Voir par exemple [28] page 572.

Oui, les questions posées il y a cinquante ans subsistent. On peut bien les définir comme fondements de la théorie, ce qu'ils sont aussi, mais ce sont comme le répétait Einstein les marges incertaines, insatisfaisantes, incomplètes, inachevées, de cette théorie. Elles sont devenues accessibles à l'exploration : les distances sont macroscopiques (ici quelques centimètres) et les temps aussi (durées de l'ordre de la milliseconde). Un programme d'exploration existe, mais pourquoi ne pas l'infléchir pour interroger directement cette "vertu non-locale" ?

7 Conclusion.

Nous avons montré que le recours fréquent à l'expérience de pensée dite "du chat de Schrödinger" était utilisé à contresens. Cela restera anecdotique si ce contresens n'est pas utilisé pour fuir les questions posées en 1935 par Einstein, Podolsky et Rosen.

L'essentiel est en effet dans l'argument /l'alternative /la démonstration EPR et dans la réponse d'abord proposée par Schrödinger et reprise pendant 60 ans d'un recours direct ou indirect à un rôle pour la conscience humaine dans cette question de physique, réponse devenue aujourd'hui encombrante.

L'argument EPR et les développements ultérieurs d'Einstein *montrent* que la MQ est tout aussi radicalement correcte qu'incomplète ou inachevée.

La MQ prévoit en effet deux types d'évolution sans être réellement capable de préciser quand l'un ou l'autre doivent être utilisés. Par ailleurs, elle ne s'avère capable de prévoir, même en principe, que le devenir d'un ensemble de systèmes préparés identiquement mais pas celui d'un système individuel particulier.

Enfin, dans le processus de mesure lui-même, qui n'est qu'une réalisation particulière de l'interaction temporaire de deux sous-systèmes initialement séparés, elle prévoit des interactions à distance, corrélations instantanées à distance, baptisées effets "non-locaux", simplement constatés mais ni compris ni explicités.

La "volte-face épistémologique" introduite par Schrödinger et pratiquée depuis avec plus ou moins de clarté ou d'hypocrisie, consiste en l'abandon du réalisme. Elle conduit à donner un statut de catalogue à la fonction d'onde et un rôle spécifique essentiel à l'observateur humain et à sa conscience.

Que peut-on dire de la situation actuelle ?

Notons pour mémoire (le point n'a pas été abordé dans le texte) que l'introduction de variables/paramètres supplémentaires par L. De Broglie, D. Bohm et J.P. Vigier [29] permet de construire une MQ déterministe (l'aspect probabiliste est ainsi expliqué), mais c'est au prix d'un recours accru à une non-localité qui reste tout autant essentielle, arbitraire et inexpliquée.

On se doit de redire avec force que la volte-face épistémologique avec son encombrant recours à la conscience ne peuvent être évités que par un retour au réalisme qui porte alors en pleine lumière la manifestation d'effets à distance parce qu'ils sont alors entièrement de l'ordre de la physique.

L'élaboration du concept de décohérence qui modèlise introduit/traite l'interaction d'un système microscopique avec son environnement peut sembler amorcer un retour au réalisme : il décrit un processus avec une durée déterminée. Sans chercher à mettre en question la valeur de sa description, on peut noter qu'il explique bien le passage d'un cas pur à un mélange (dans certaines conditions, il prédit ainsi une durée de vie incroyablement petite pour un état de superpodition chat mort/ chat vivant !). Il s'avère par contre incapable d'expliquer la venue de l'une ou l'autre des réalisations dont il prédit pourtant bien la probabilité correspondante/attendue. Le problème de la mesure reste alors entier.

Mais quand bien même la décohérence arriverait à la description de la venue d'une seule des réalisations possibles, par exemple au travers de paramètres supplémentaires (cette fois bien cachés !) dans l'environnement, elle aboutirait alors elle aussi à mettre en lumière la même réalité des effets instantanés à distance : la non-localité, qui reste bien aujourd'hui non seulement un élément de réalité physique incontournable mais justement et à cause de cela un **objet d'étude en soi.**

Les développpements expérimentaux et théoriques qui s'articulent autour de l'optique quantique, les manipulations d'atomes et de champ cohérents dans une cavité ont déjà permis d'accéder à des expériences mettant en jeu ces effets ; elles peuvent plus directement prendre ces effets comme **objet d'étude**.

Il reste indispensable de garder un contact direct avec les **textes fondateurs**. Cela évite d'abord de reproduire des erreurs dans leur utilisation, c'est la moindre des choses. Mais surtout, leur rigueur et leur richesse permet d'appréhender plus en profondeur les processus à l'œuvre dans les réalisations expérimentales et théoriques actuelles.

Références

[1] W.H. Zurek. *Decoherence and the transition from quantum to classical.* Physics Today (Oct. 91) 36-37.

[2] M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, A. Maali, C. Wunderlich, J.M. Raimond and S. Haroche. *Observing the Progressive Decoherence of the "Meter" in a Quantum Measurement.* Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 4887.

[3] J.M. Raimond, M. Brune, S. Haroche. *Reversible Decoherence of a mesoscopic superposition of field states.* Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 1964.

[4] S. Haroche, J.M. Raimond, M. Brune. *Le Chat de Schrödinger se prête à l'expérience.* La Recherche **301** (1997) 50.

[5] J.M. Raimond, M. Brune, and S. Haroche. *Colloquium : Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity.* Rev. of Mod. Phys. **73** (2001) 565.

[6] W.H. Zurek. *Probing quantum origins of the classical.* Physics World (Jan. 1997) 24.

[7] M. Tegmark, J.A. Wheeler. *100 ans de mystères quantiques.* Pour la Science **282** (Avril 2001) 85.

[8] *This month in physics history. Circa March 1935 : Schrödinger's paradoxical cat. The American Physical Society.* APS News. Series II, vol 11, No 3 (March 2002) 2.

[9] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë. *Mécanique quantique.* Hermann éditeur, Paris (1977) tome I 214-221.

[10] E. Schrödinger. *Die Gegenwärtige Situation in der Quantummechanik.* Naturwissenschaften **23** (1935) 807-812, 823-828, 844-849.

Traduction anglaise dans : *The present situation in quantum mechanics : a translation of Schrödinger's "cat paradox" paper.* Proc. of the Am. Philosophical Soc. **124** (1980) 323-338.

Ou encore dans : J.A. Wheeler and W.H. Zurek Eds. *"Quantum theory and measurement."* Princeton University Press, 1983.

[11] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen. *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?* Phys. Rev. **47** (25 Mar. 1935) 777.

[12] Lettre d'A. Einstein à M. Born, Dec. 1926, dans : M. Paty. *"Einstein et la complémentarité au sens de Bohr : du retrait dans le tumulte aux arguments d'incomplétude"* Rev Hist. Sci. (1985, XXXVIII/3-4).

[13] Paul Arthur Schilpp Ed. *Albert Einstein : Philosopher-Scientist. The library of living philosophers, vol VII.* Cambridge University Press. 1949.

[14] N. Bohr. *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?* Phys. Rev. **48** (15 Oct. 1935) 696.

[15] J.A. Wheeler and W.H. *"Quantum theory and measurement."* Zurek Eds. Princeton University Press, 1983.

[16] Jagdish Mehra. *The Solvay Conferences on Physics.* D. Reidel Edt. Dordrecht Boston 1975.

[17] F. London, E. Bauer. Préface de P. Langevin. *La théorie de l'observation en mécanique quantique.* Actualités Scientifiques et industrielles **775-III**. Hermann (1939)

[18] Louis de Broglie. *Les incertitudes d'Heisenberg et l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire.* Gauthier-Villars, Paris 1982.

[19] Eugene P. Wigner. *The Scientist Speculates, I. J. Good, ed., pp 284-302,* Heinemann, London (1961).

[20] J.A. Wheeler. *Delayed-choice experiments and the Bohr-Einstein dialog,* in The American Philosophical Society and the Royal Society : Papers read at a meeting, June 5, 1980. *American Philosophical Society, Philadelphia.*

[21] Asher Peres. *Quantum theory, concepts and methods.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (1993).

[22] B. d'Espagnat. *L'anti-réalisme quantique.* Sciences et Avenir : Le bon sens et la science. Hors série oct-nov 2002. pages 71-75.

[23] Alain Aspect, Jean Dalibard, and Gérard Roger. *Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers.* Phys. Rev. Lett. **49**(1982) 1804.

A. Aspect. *"Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de polarisation de photons."* Thèse de Doctorat d'État, Orsay 1983.

[24] R.J. Glauber. *Quantum optics and electronics.* Les Houches Summer School 1964, Eds C. de Witt, A. Blandin and C. Cohen-Tannoudji. Gordon and Breach, New York, 1965.

[25] Marlan O. Scully and Kai Drühl. *Quantum eraser : A proposed photon correlation experiment concerning observation and "delayed choice" in quantum mechanics.* Phys. Rev. bf A25 (1982) 2208.

[26] Giancarlo Ghirardi. *Les états intriqués permettent un changement radical.* Courrier du CERN (Mars 2002) 20.

[27] Roland Omnès. *Comprendre la mécanique quantique.* EDP Siences, 2000. Ch. 15 : La Complémentarité, L'expérience d'Einstein, Podolsky et Rosen page 167.

[28] Serge Haroche. *Qu'est-ce que l'Univers? Une exploration au cœur du monde quantique.* Université de tous les savoirs. Conférence 213 du 31 Juillet 2000. Odile Jacob 2001. Volume 4, , page 570.

[29] Voir par exemple,

D. Bohm. *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables" (I), (II).* Phys. Rev. **85** (1952) 166 et 180.

J.P. Vigier. *Structure des microbjets dans l'interprétation causale de la mécanique des quanta.* Gauthier-Villars, Paris, 1956.