

# Bohr, Einstein et l'argument EPR

Christian Wüthrich

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

**BA7 Introduction à la philosophie de la physique: mécanique quantique**

Remerciements pour la traduction et des commentaires: Augustin Baas

# Bohr: le principe de correspondance



Bohr, Niels (1949). Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In P.A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Open Court, pp. 199-241.

## Principe (de correspondance (PC))

*La physique classique et la physique quantique doivent donner les mêmes prédictions pour des «grands systèmes». Plus précisément, la physique classique et la physique quantique doivent être en accord à la limite dite **classique**, i.e. quand les nombres quantiques caractérisant le système sont grands.*

## Bohr: le principe de correspondance

- mécanique matricielle: PC est utilisé pour construire la théorie; mécanique ondulatoire: Ehrenfest a montré que les lois de Newton s'appliquent en moyenne (les prédictions de la position et de la quantité de mouvement vérifient les lois de Newton)
- PC contraint la construction d'une TQ par des recettes de quantification, qui confèrent un statut particulier aux grandeurs classiques et identifient parmi eux des paires incompatibles (en utilisant les variables canoniques conjuguées de la mécanique hamiltonienne classique et leur structure des crochets de Poisson)

## Côme 1927: complémentarité

Congrès international de physique, Côme (Italie), septembre 1927

*"...it is decisive to recognize that, however far the phenomena transcend the scope of classical physical explanation, the account of all evidence must be expressed in classical terms...*

*"This crucial point... implies the impossibility of any sharp separation between the behaviour of atomic objects and the interaction with the measuring instruments which serve to define the conditions under which the phenomena appear. In fact, the individuality of the typical quantum effects finds its proper expression in the circumstance that any attempt of subdividing the phenomena will demand a change in the experimental arrangement introducing new possibilities of interaction between objects and measuring instruments which in principle cannot be controlled.*

*“Consequently, evidence obtained under different experimental conditions cannot be comprehended within a single picture, but must be regarded as **complementary** in the sense that only the totality of the phenomena exhausts the possible information about the objects.*

*“Under these circumstances an essential element of ambiguity is involved in ascribing conventional physical attributes to atomic objects, as is at once evident in the dilemma regarding the corpuscular and wave properties of electrons and photons, where we have to do with contrasting pictures, each referring to an essential aspect of empirical evidence.” (op. cit., 209f)*

## Principe (de Complémentarité)

*Un objet quantique peut avoir, en apparence, des propriétés contradictoires, accessibles dans différents contextes expérimentaux. Par exemple, en fonction du montage expérimental, un objet quantique unique peut soit avoir un comportement de type corpusculaire, soit de type ondulatoire, mais les deux types de comportement ne peuvent pas être observés dans la même expérience (à distinguer du montage expérimental). Les comportements de type corpusculaire et ondulatoire, pour lesquels un objet quantique a une propension ou une disposition réelle, sont mutuellement exclusifs, dans le sens qu'ils ne peuvent être observés simultanément.*

## Commentaires:

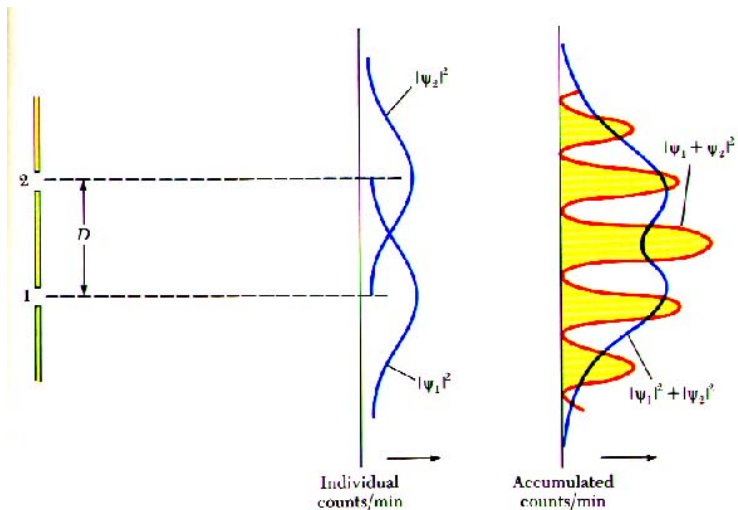
- La complémentarité ne restreint pas seulement ce que l'on est en mesure de connaître au sujet des propriétés d'un système physique, mais elle impose des limitations à la manifestation de ces propriétés dans le monde physique.
- Toutes les propriétés d'un système quantique viennent en paires complémentaires, correspondant aux propriétés incompatibles telles qu'on les trouvent dans le principe d'incertitude.
- Principe de complémentarité  $\neq$  principe d'incertitude

## Exemple: l'expérience des doubles fentes

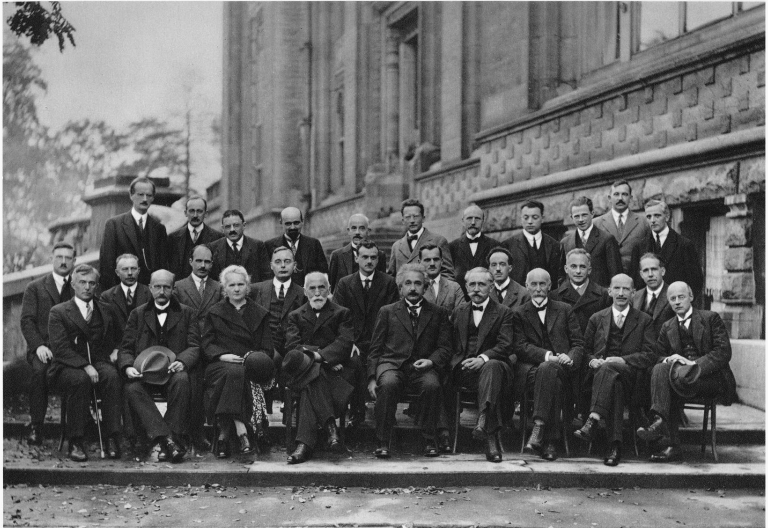
Un exemple de complémentarité: un quanta (un photon ou un électron) dans un montage de double-fentes, présente un comportement de **type corpusculaire** alors qu'un grand nombre de quanta présente un comportement de **type ondulatoire**, ce qui s'observe soit en envoyant tous ces photons au même instant (une autre expérience), soit en faisant la moyenne des résultats d'expérience à un photon (encore une autre expérience, dont le résultat est le même que la précédente).



## Exemple: l'expérience des doubles fentes



## Conférence de Solvay, Bruxelles, octobre 1927



## Les fameux débats entre Einstein et Bohr



Walter Isaacson (2007). *Einstein: His Life and Universe*. Simon and Schuster

Einstein essaya de prouver que la MQ ne pouvait pas donner une description complète de la réalité, en recourant à des expériences de pensée avec divers appareillages.

*“For example, one of Einstein’s thought experiments involved a beam of electrons that is sent through a slit in a screen, and then the position of the electrons are recorded as they hit a photographic plate. Various other elements, such as a shutter to open and close the slit instantaneously, were posited by Einstein in his ingenious efforts to show that position and momentum could in theory be known with precision.*

*“ ‘Einstein would bring along to breakfast a proposal of this kind,’ Heisenberg recalled...*

*"The group would usually make their way to the Congress hall together, working on ways to refute Einstein's problem. 'By dinner-time we could usually prove that his thought experiment did not contradict uncertainty relations,' Heisenberg recalled, and Einstein would concede defeat. 'But the next morning he would bring along to breakfast a new thought experiment, generally more complicated than the previous one.' By dinnertime that would be disproved as well. "Back and forth they went, each lob from Einstein volleyed back by Bohr, who was able to show how the uncertainty principle, in each instance, did indeed limit the amount of knowable information about a moving electron. 'And so it went for several days,' said Heisenberg. 'In the end, we—that is, Bohr, Pauli, and I—knew that we could now be sure of our ground.' "* (p. 346)

Du point de vue de Bohr, tous les efforts d'Einstein échouèrent à prouver que la MQ était incomplète ou insuffisante:

*"In my opinion, there could be no other way to deem a logically consistent mathematical formalism as inadequate than by demonstrating the departure of its consequences from experience or by proving that its predictions did not exhaust the possibilities of observation, and Einstein's argumentation could be directed to neither of these ends." (Op. cit., p. 229)*

## Opposition d'Einstein à la MQ



Arthur Fine (1986, 1996). *The Shaky Game: Einstein Realism and the Quantum Theory*. U of Chicago Press, p. 31.

D'après Arthur Fine, Einstein contesta la MQ sur 4 points:

- Concernant les contraintes extérieures imposées par d'autres théories:
  - 1 comment réconcilier la MQ avec les exigences de la relativité restreinte
  - 2 comment obtenir de façon satisfaisant les approximations classiques à partir de la MQ
- Concernant les problèmes essentiels de l'interprétation de la théorie elle-même:
  - 3 corrélations à distance et actions à distance
  - 4 problème des statistiques et de la description des systèmes individuels

# Einstein-Podolsky-Rosen 1935

Boris Podolsky (1896-1966), Nathan Rosen (1909-1995)



A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?. *Phys. Rev.* 47: 777-781.

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

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

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

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

## Complétude et réalité

D'après EPR, pour qu'une théorie soit **complète**, elle doit satisfaire la condition nécessaire suivante:

### Condition (Complétude)

*"Every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory." (777)*

Une condition suffisante pour une théorie physique de satisfaction d'un critère de **réalité** est la suivante:

### Condition (Réalité)

*"If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e. with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity." (ibid.)*



## L'argument

- un état quantique est supposé être **complètement** caractérisé par la fonction d'onde  $|\psi\rangle$
- lien états propres-valeurs propres: si  $|\psi\rangle$  est une fonction propre d'un opérateur  $\hat{A}$ , i.e. si on a

$$\hat{A}|\psi\rangle = a|\psi\rangle, \quad (1)$$

alors la quantité physique (associée à)  $\hat{A}$  a avec certitude la valeur  $a$ , n'importe quand le système soit dans l'état  $|\psi\rangle$

- Réalité  $\Rightarrow$  si on a (1) pour une particule dans l'état  $|\psi\rangle$ , alors il y a un élément de réalité correspondant à la quantité physique  $\hat{A}$

- Du fait que les opérateurs non commutatifs n'ont pas les mêmes fonctions propres, " [it] follows that either (1) the quantum-mechanical description of reality given by the wave function is not complete or (2) when the operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality." (778)
- (Argument: Complétude  $\Rightarrow$  si les deux étaient réels (et avaient donc des valeurs définies) ces valeurs entreraient dans la description complète, mais ce n'est pas possible que ça soit le cas au même instant (simultanément))
- Bien qu'il soit initialement plausible de penser que  $|\psi\rangle$  décrit complètement l'état (puisque cette dernière contient toute l'information sur les quantités qui peuvent être mesurées sans changement d'état), cette hypothèse, en conjonction avec celle de la Réalité, conduit à une contradiction.

*"We see... that, as a consequence of two different measurements performed upon the first [of two entangled, but spatially separate] system[s], the second system may be left in states with two different wave functions. On the other hand, since at the time of measurement the two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system. This is, of course, merely a statement of what is meant by the absence of an interaction between the two systems. Thus, it is possible to assign two different wave functions... to the same reality (the second system after the interaction with the first)."*  
(779)

- Attention: les deux mesures sont celles de quantités physiques dont les opérateurs ne commutent pas

*"Starting then with the assumption that the wave function does give a complete description of the physical reality, we arrived at the conclusion that two physical quantities, with noncommuting operators, can have simultaneous reality. Thus the negation of (1) [QM-description of reality given by  $|\psi\rangle$  is not complete] leads to the negation of the only other alternative (2) [noncommuting operators cannot have simultaneous reality]. We are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete." (780)*

P.S.

*“Indeed, one would not arrive at our conclusion if one insisted that two or more physical quantities can be regarded as simultaneous elements of reality **only when they can be simultaneously measured or predicted...** No reasonable definition of reality could be expected to permit this.” (780)*

## La réaction de Bohr au EPR (1935)



N. Bohr (1935). *Phys. Rev.* 48: 696.

*“Such an argumentation, 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. The apparent contradiction in fact discloses only an essential inadequacy of the customary viewpoint of natural philosophy for a rational account of physical phenomena of the type with which we are concerned in quantum mechanics.*”

*“Indeed the **finite interaction between object and measuring agencies** conditioned by the very existence of the quantum of action entails—because of the impossibility of controlling the reaction of the object on the measuring instruments, if these are to serve their purpose—the necessity of a final renunciation of the classical ideal of causality and a radical revision of our attitude towards the problem of physical reality. In fact, as we shall see, a criterion of reality like that proposed by the named authors contains—however cautious its formulation may appear—an essential ambiguity when it is applied to the actual problems with which we are here concerned.” (696f)*

*“From our point of view we now see that the wording of the above-mentioned criterion of physical reality proposed by Einstein, Podolsky, and Rosen contains an ambiguity as regards the meaning of the expression ‘without in any way disturbing a system.’ Of course there is in a case like that just considered no question of a mechanical disturbance of the system under investigation during the last critical stage of the measuring procedure. [Fine: what?!? Significant departure from Bohr’s earlier views] But even at this stage there is essentially the question of an influence on the very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behaviour of the system. [Fine: positivism alert!] Since these conditions constitute an inherent element of the description of any phenomenon to which the term “physical reality” can be properly attached, we see that the argumentation of the mentioned authors does not justify their conclusion that quantum-mechanical description is essentially incomplete.*



*“On the contrary, this description, as appears from the preceding discussion, may be characterised as a rational utilisation of all possibilities of unambiguous interpretation of measurements, compatible with the finite and uncontrollable interaction between the objects and the measuring instruments in the field of quantum theory. In fact, it is only the mutual exclusion of any two experimental procedures, permitting the unambiguous definition of complementary physical quantities, which provides room for new physical laws, the coexistence of which might at first sight appear irreconcilable with the basic principles of science. It is just this entirely new situation as regards the description of physical phenomena that the notion of complementarity aims at characterising.” (700)*

## Revisiter le paradoxe EPR

- Une source crée des particules de spin  $1/2$  (par exemple l' $e^-$ ) dans un état singlet

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle), \quad (2)$$

qui sont donc séparés, tel que un  $e^-$  se déplace vers la gauche et l'autre vers la droite.

- Attention: les spins s'annulent, le spin total vaut zéro
- ⇒ Si la particule L est trouvée dans l'état «haut», alors la particule R doit être dans l'état «bas» (et vice versa).
- En physique classique, cela ne serait pas un problème, puisque on devrait juste conclure que la particule R a toujours été dans un état «bas» depuis l'instant de séparation.

- Cependant, d'après (l'interprétation standard de) la MQ, le spin de la particule L n'a pas de valeur définie jusqu'à l'instant de la mesure.
- ⇒ Quand il est mesuré, il doit se produire un effet instantané dans le chemin R, provoquant un effondrement de la fonction d'onde tel que la particule R a elle aussi un spin défini.
- ⇒ soit une **action à distance** effrayante («spooky») soit **transmission** («signalling») **plus rapide que la lumière** (⇒ violation de la relativité restreinte)
- EPR: cela montre qu'il doit y avoir des éléments de réalité cachés (variables cachées, «hidden variables»), que la MQ ne parvient pas à prendre en compte, autrement dit l'état de la MQ est incomplet.

# Localité

## Principe (Localité d'Einstein)

*Si deux systèmes sont isolés l'un de l'autre tel qu'ils ne peuvent plus interagir, alors la mesure du premier ne peut pas avoir d'effet réel sur le second.*

- Bohr: la localité d'Einstein est violée, un système quantique est fait de deux particules (et l'observateur), jusqu'à ce que la mesure soit faite
- ⇒ Le paradoxe EPR ne montre pas que la mécanique quantique est incomplète, mais seulement que la localité d'Einstein est violée.

# Reconstruction par Fine de l'argument EPR



Fine, pp. 32ff.

- (INC) La description quantique d'un système par la fonction d'onde est incomplète.
- (NSV) Les observables représentés par des opérateurs non commutatifs ne peuvent avoir simultanément de réalité.

L'argument repose sur deux démonstrations:

- 1 (INC)  $\vee$  (NSV)
- 2  $\neg$  (INC)  $\rightarrow$   $\neg$  (NSV)

desquelles il est conclu que l'on doit avoir (INC).

## La première partie

- Dans le but d'établir la première affirmation, EPR montre que  $\neg$  (NSV)  $\rightarrow$  (INC)
- Mais cette partie est facile, car, étant donné que aucun état ne peut être état propre d'opérateurs non commutatifs, si une paire d'opérateurs non commutatifs a des valeurs simultanées, alors la fonction d'état doit être incomplète.

## La deuxième partie

- Supposons que  $\neg$  (INC) (i.e. que la théorie est complète) et essayons d'établir l'existence simultanée de valeurs de position et de quantité de mouvement pour les deux particules de déplaçant en sens opposés après avoir interagit (tel que la quantité de mouvement est conservée).
- D'après la mesure de la position d'un des systèmes, nous pouvons prédire la position de l'autre; et de façon similaire pour la quantité de mouvement.
- Si les deux particules sont suffisamment séparées, les mesures sur un système ne vont pas perturber l'autre.
- RÉALITÉ  $\Rightarrow$  au moins une particule doit avoir une position définie ET une quantité de mouvement définie.
- Remarquez que **l'hypothèse de complétude n'est jamais utilisée**: EPR prouve simplement  $\neg$  (NSV), ce qui aurait permis une structure plus simple de l'argument!

## Commentaires de Fine

- L'argument actuel est moins clair.
- “Finally it is by no means clear how, even with the stated criterion of reality, the fact that one can assign either a definite position or a definite momentum to the unmeasured particle establishes that the particle has **both** properties at once.” (34)
- Des années plus tard Einstein formula le paradoxe de façon plus claire comme l'incompatibilité entre la séparabilité des sous-systèmes et la complétude:  
*“the paradox forces us to relinquish one of the following two assertions:*  
*(1) the description by means of the  $\psi$ -function is **complete***  
*(2) the real states of spatially separated objects are independent of each other.” (in Schilpp (1949), 682)*