

*PEUT-ON COMPRENDRE  
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?*

Jean BRICMONT

Colloque de Physique  
14 décembre 2011

Troisième cours :

Peut-on penser autrement la mécanique quantique ?

Deuxième cours:

<http://www.uclouvain.be/396951.html>

<http://pangolia.com/blog/?p=944>

(audio)

Refer : Mike Towler, TCM Group, Cavendish Laboratory,  
University of Cambridge

<http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/~mdt26/qmint.html>

## RÉSUMÉ

*Premier mystère* : un rôle apparemment essentiel de la “mesure”, qui, de plus, ne peut pas être comprise de façon naïve comme mesure d’une propriété préexistante.

*Deuxième mystère* : Appliquée à la situation EPR, cette non existence de propriétés préexistantes implique que le monde est non local, en ce sens qu’il existe une forme subtile mais réelle d’action instantanée à distance.

## QUE FAIRE DES DEUX MYSTÈRES ?

Peut-on se débarrasser de la non-localité ? NON !

Le raisonnement EPR-Bell se fonde uniquement sur des données expérimentales (certes découvertes grâce à la mécanique quantique), et est totalement indépendant du formalisme quantique.

Peut-on se débarrasser de l'anthropocentrisme c'est-à-dire du caractère, central, irréductible, fondamental de la *mesure* ? OUI ! (but de ce cours).

Angoisse existentielle : Suis-je un vecteur dans un espace de Hilbert ?

Ai-je une tête à cela ?

Et vous ?

Et l'univers ?

→ L'état quantique n'est pas "tout". En fait, en tant que tel, il n'est RIEN !

Juste un vecteur dans un espace de Hilbert !

TOUTE discussion de la mécanique quantique, même la discussion "ordinaire" suppose une "ontologie", c'est-à-dire quelque chose qui *existe* en dehors de l'état quantique.

Ne serait-ce que les "appareils de mesure" dont on peut "prédire le comportement" et qui sont "classiques" c'est-à-dire échappent au traitement quantique.

Et, dans l'interprétation naïve (mais intenable), on suppose aussi que les "observables" ont des valeurs préexistantes, ce qui est à nouveau, une partie de l'ontologie.

Peut-on faire mieux ?

C'est-à-dire?

Avoir une ontologie qui inclut PLUS que les appareils de mesure et MOINS que les valeurs de TOUTES les “observables”.

Quid de l'idée que certaines “observables”, mais pas toutes, ont une réalité objective ?

En particulier, qui a dit qu'une particule ne pouvait PAS *avoir* une trajectoire (indépendamment des mesures) ?

À peu près tout le monde!

Et qui a donné un argument montrant cela ?

Personne et sûrement pas Bell-Kochen-Specker (tous leurs théorèmes se rapportent au “spin” ou à des variables de ce genre).

La théorie dBB- de Broglie (1927), Bohm (1952), (et Bell), est une :

Théorie de “variables cachées”

Qui ne sont nullement cachées

Théorie qui élimine entièrement le rôle de l’observateur

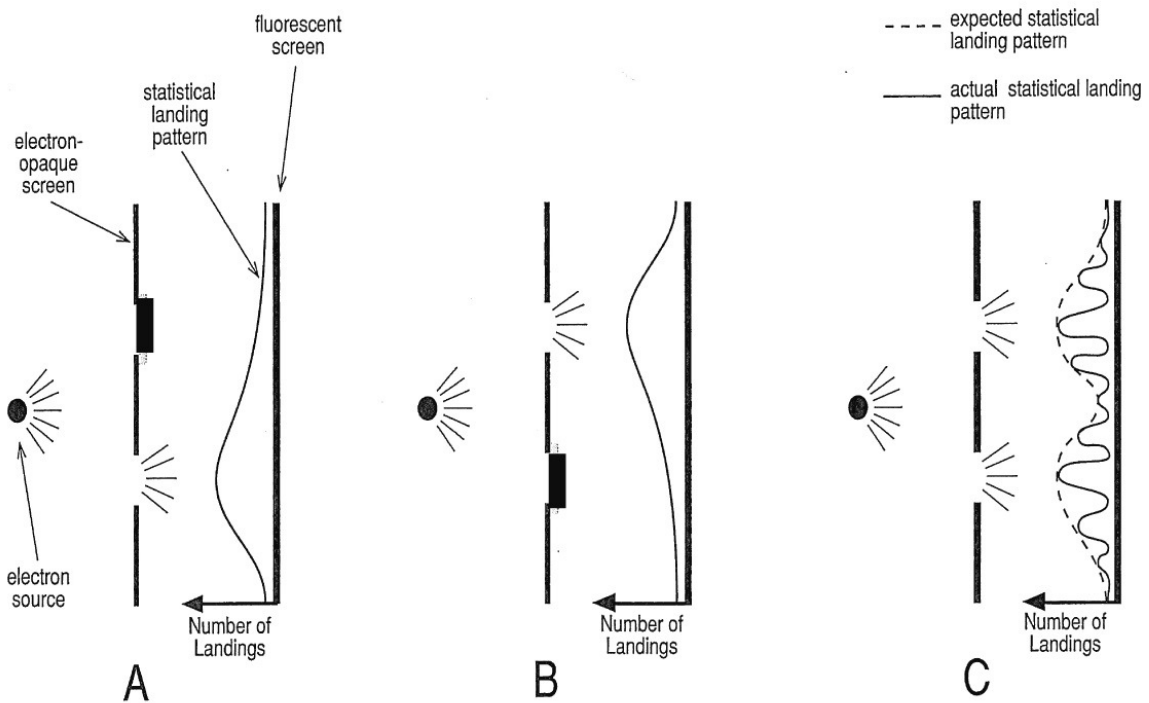
Qui n’est pas réfutée par les théorèmes sur les variables cachées

Qui rend compte de toutes les expériences justifiant la mécanique quantique

Qui permet de comprendre le rôle “actif” de l’appareil de mesure, c’est-à-dire de l’intuition de Bohr (mais sans en faire un a priori philosophique)

Qui explique, dans la mesure où c’est possible, la non-localité.

# REPENSONS À L'EXPÉRIENCE DES DEUX TROUS



COMMENT LES ÉLECTRONS PEUVENT-ILS ÊTRE  
À LA FOIS ONDE ET PARTICULE ?

ÉLÉMENTAIRE MON CHER WATSON !

CE SONT DES PARTICLES *GUIDÉES* PAR DES  
ONDES.



# MÉCANIQUE DE DE BROGLIE-BOHM

ÉTAT: ( $|\text{état quantique } \rangle, \mathbf{X}$ )

$\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_N)$  représente les positions de particules qui existent indépendamment du fait qu'on les "regarde" ou qu'on les "measure".

Ce sont des "variables cachées" en ce sens qu'elles ne sont pas incluses dans la description purement quantique  $|\text{état quantique } \rangle$ , mais elle ne sont nullement cachées : ce sont ces positions que l'on détecte directement, par exemple sur l'écran dans l'expérience des deux trous.

ÉVOLUTION TEMPORELLE :

1. ÉQUATION de SCHRÖDINGER pour l'évolution de  $|\text{état quantique } \rangle$ , pour tous les temps et en toutes circonstances *que l'on "mesure" quelque chose ou non.*

$$\Psi_0 \rightarrow \Psi_t = U(t)\Psi_0$$

$$i\hbar\partial_t\Psi = \mathcal{H}\Psi$$

$\mathcal{H} = -\frac{1}{2}\Delta + V$  est l'hamiltonien (quantique, avec  $\hbar = 1$ ,  $m = 1$ ).

## 2. ÉQUATION PILOTE

Les positions des particules évoluent au cours du temps  $\mathbf{X} = \mathbf{X}(t)$ . Leur mouvement est déterminé par l'état quantique : leur vitesse est une fonction de la fonction d'onde.

$$\dot{X}_k = V_{\Psi}^k(\mathbf{X}) = \frac{\text{Im}(\Psi^* \nabla_k \Psi)}{\Psi^* \Psi}(X_1, \dots, X_N)$$

Si on écrit  $\Psi = Re^{iS}$ ,

$$\dot{X}_k = \nabla_k S.$$

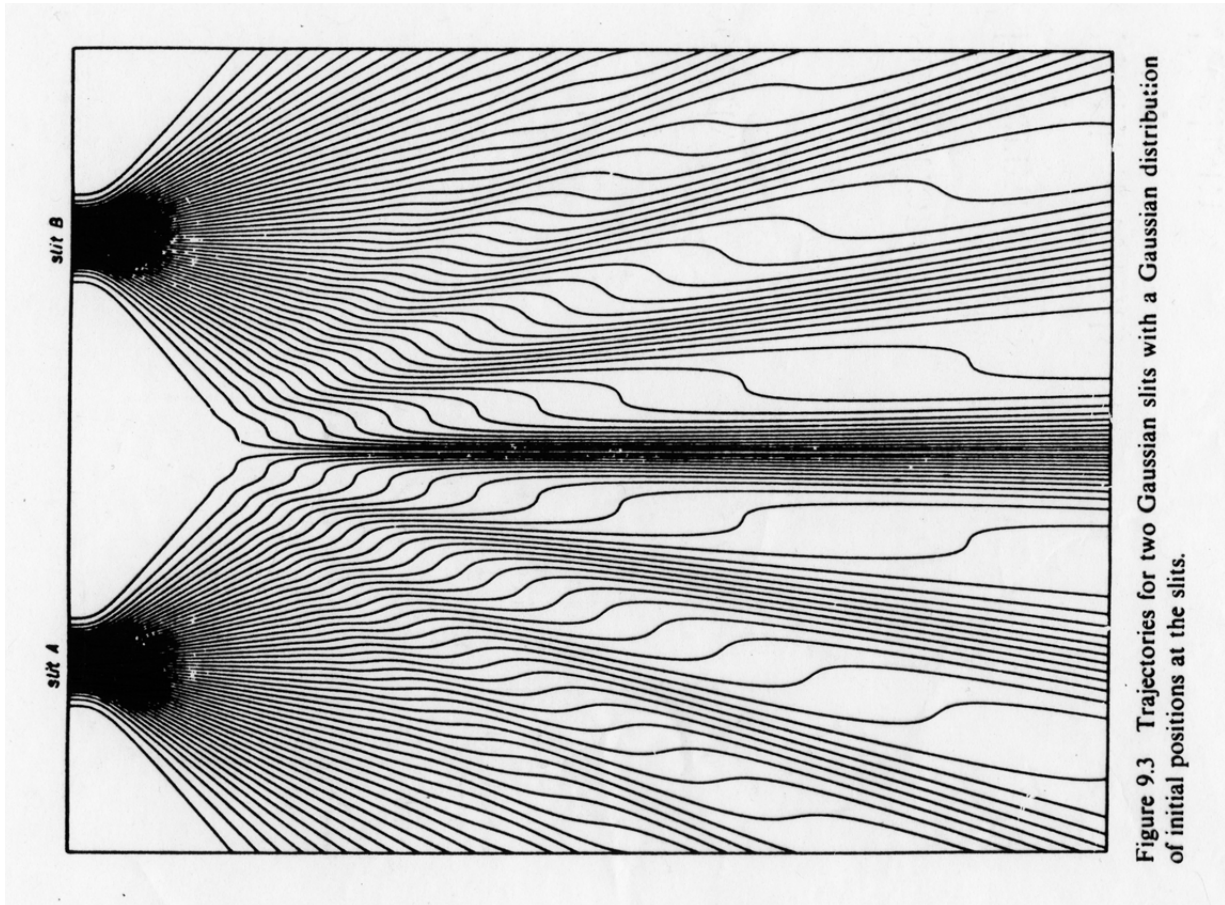
Rien de mystérieux:  $\dot{\mathbf{X}} = \frac{\mathbf{J}}{\rho}$  où  $\mathbf{J}$  est le courant associé à la “conservation de la probabilité”  $\rho = |\Psi|^2$ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0.$$

On peut penser à  $\Psi$  (ou  $\text{Im} \log \Psi$  pour être précis) comme analogue à l'hamiltonien en mécanique classique: celui-ci est aussi défini partout (sur l'espace de phase) et guide le mouvement des particules là où elle se trouvent. Voir la fonction d'onde comme analogue à une *loi* dynamique.

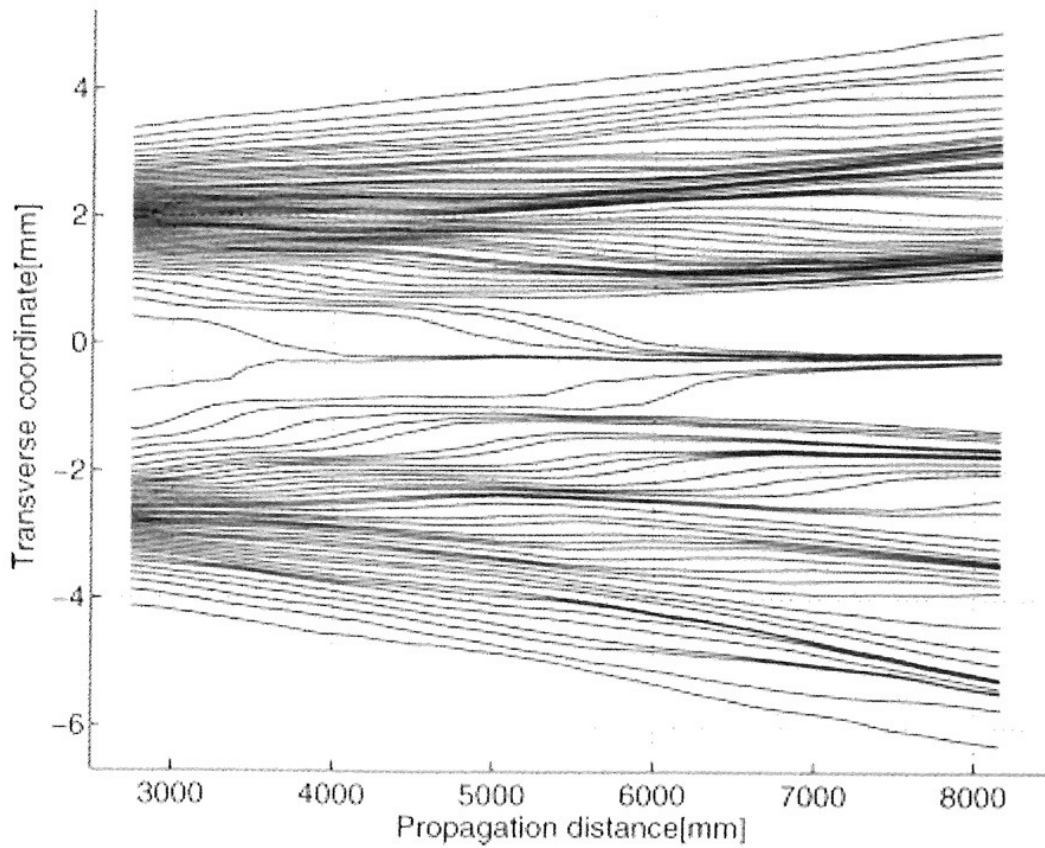
Bohm a réécrit cette équation sous la forme d'une équation de Newton avec un potentiel modifié:  $V_{class} \rightarrow V_{class} + V_Q(\Psi)$ . Si on tient compte du  $V_Q(\Psi)$ , on peut raisonner “classiquement”.

Expérience des deux trous : solution numérique de la dynamique de de Broglie-Bohm.



Mouvement *dans le vide* hautement *non classique* !! (En terme de potentiels,  $V_{class} = 0$ , mais  $V_Q(\Psi) \neq 0$ ). Notez que l'on peut déterminer a posteriori le trou par lequel la particule est passée ! Remarquez aussi la présence d'une ligne nodale : par symétrie de  $\Psi$ , la vitesse est tangente à la ligne séparant le haut et le bas de l'image : donc, les particules ne peuvent pas traverser cette ligne.

Expérience récente (Science, juin 2011).



Mesure “faible”, c’est-à-dire indirecte- comme à peu près toutes les mesures.

Il est clair que l'expérience à deux trous ne peut en aucune façon être réconciliée avec l'idée que les électrons se déplacent selon des chemins. En mécanique quantique, il n'y a pas de concept de chemin d'une particule.

LANDAU et LIFSHITZ

Est-ce si clair que cela ?

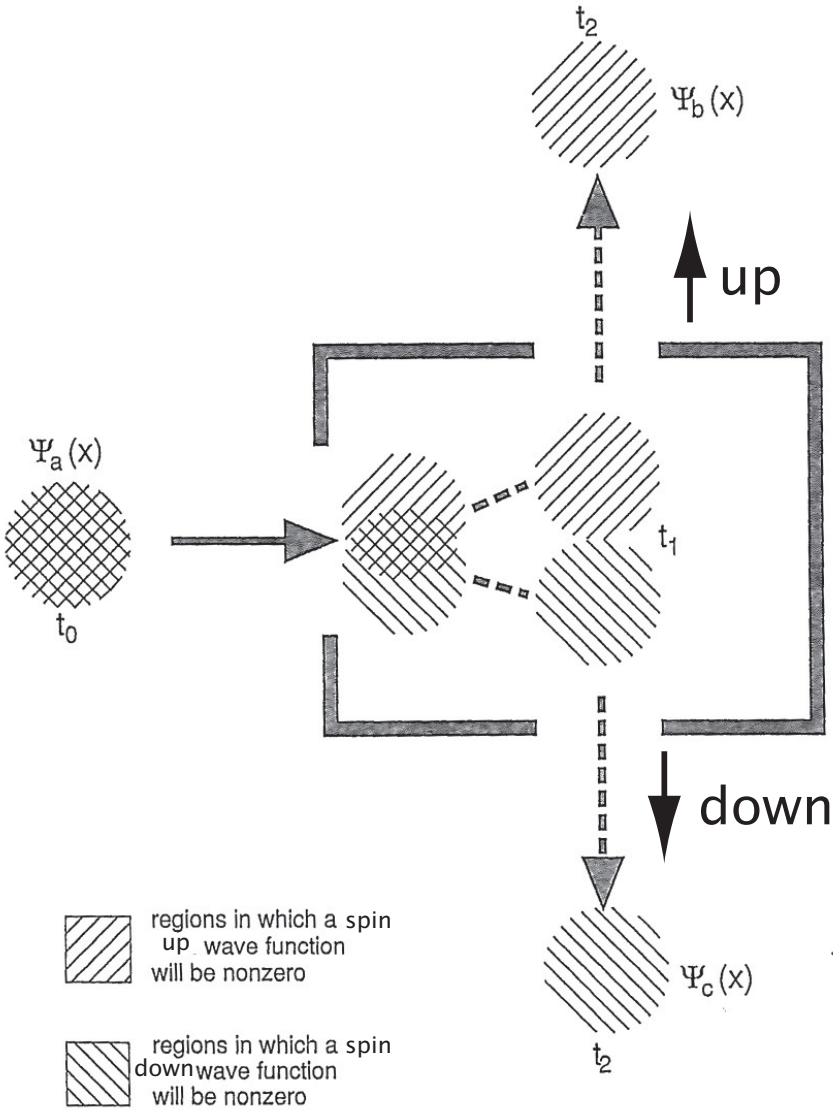
N'est-il pas évident, étant donné la petitesse des scintillations sur l'écran, que nous avons affaire à une particule ? Et n'est-il pas évident, étant donné les franges d'interférence et de diffraction, que le mouvement de la particule est dirigé par une onde ? De Broglie a montré en détail comment le mouvement de la particule, passant par seulement un des trous de l'écran pouvait être influencé par des ondes se propageant à travers les deux trous. Et influencé d'une façon telle que la particule ne va pas là où les ondes s'annulent, mais est attirée là où elles coopèrent. Cette idée me semble si naturelle et simple pour résoudre le dilemme onde-particule, que le fait qu'elle soit si généralement ignorée me paraît être un grand mystère.

J. BELL

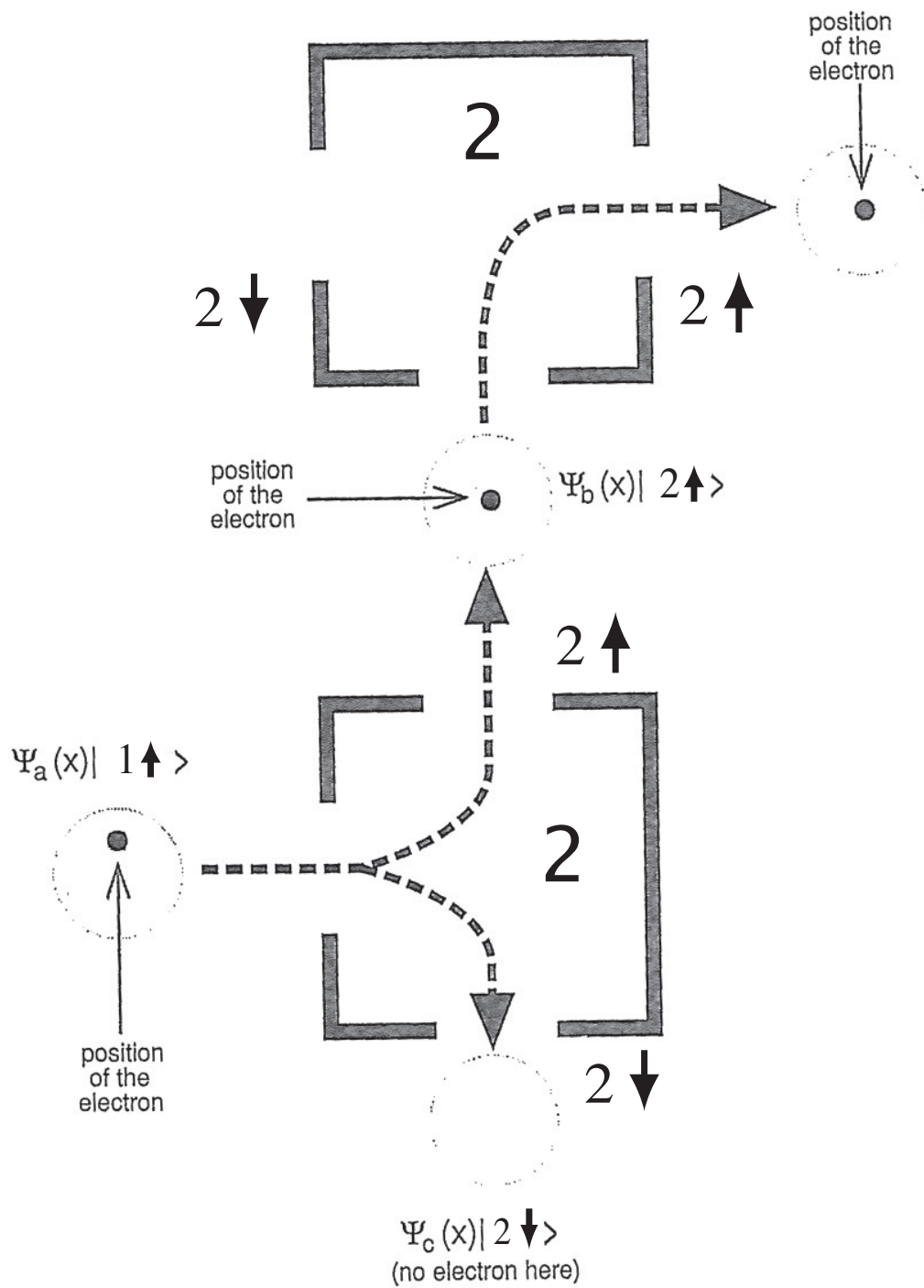
## TROIS QUALITÉS DE BASE DE CETTE THÉORIE :

- Explique les expériences avec le ‘spin’ et les théorèmes sur la non-existence des variables cachées.
- Illustre la source de la non-localité.
- Comment une théorie déterministe obtient-elle les mêmes résultats statistiques que la mécanique quantique ordinaire ?

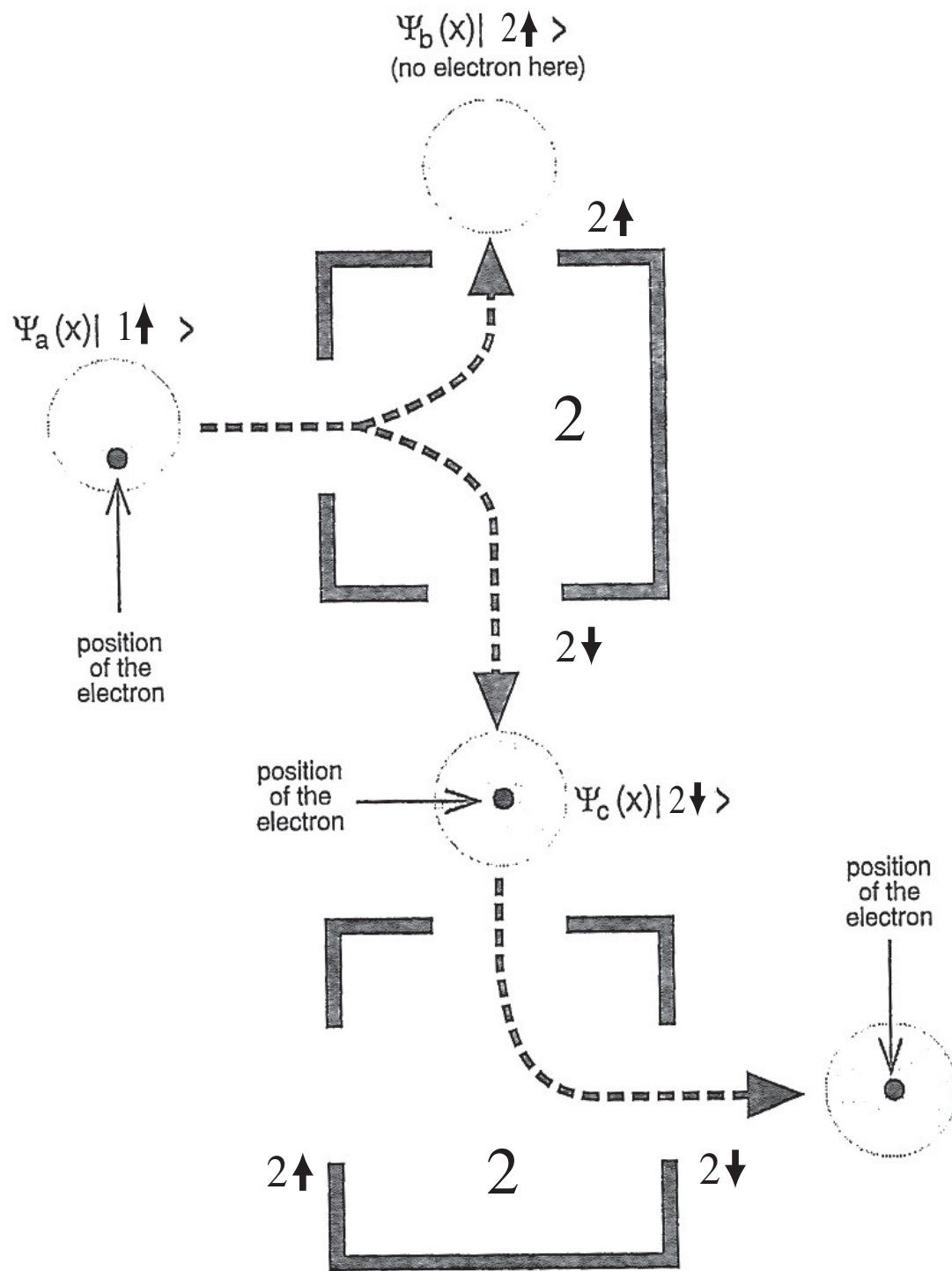
Voyons comment cela marche, d'abord pour le "spin":



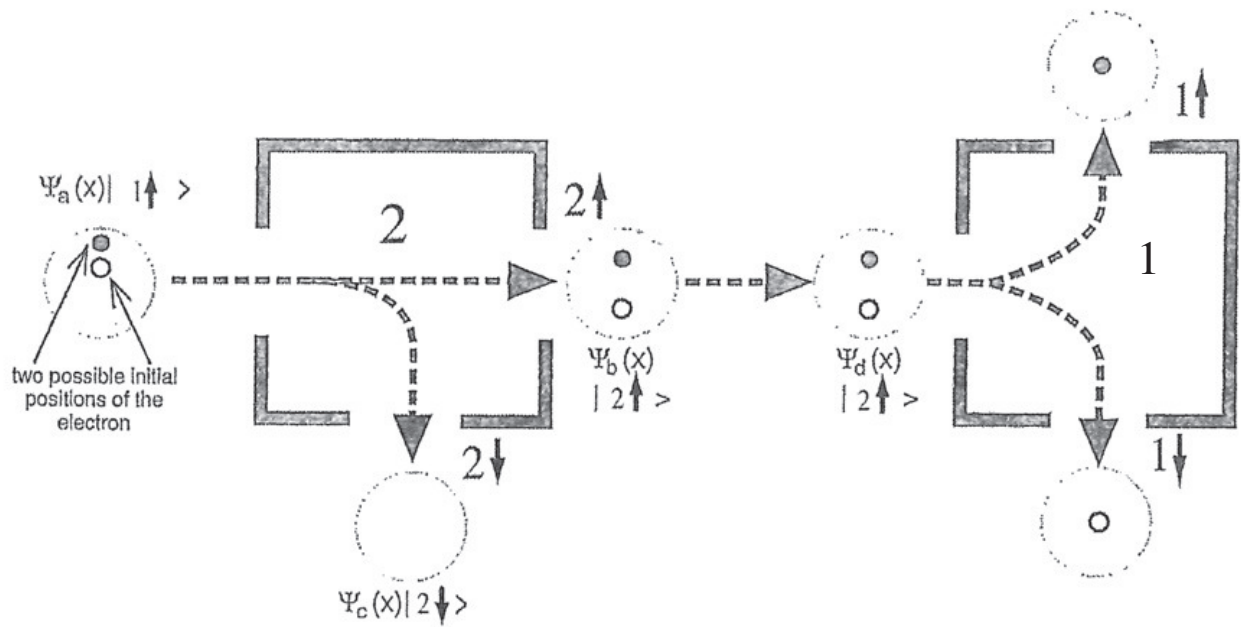




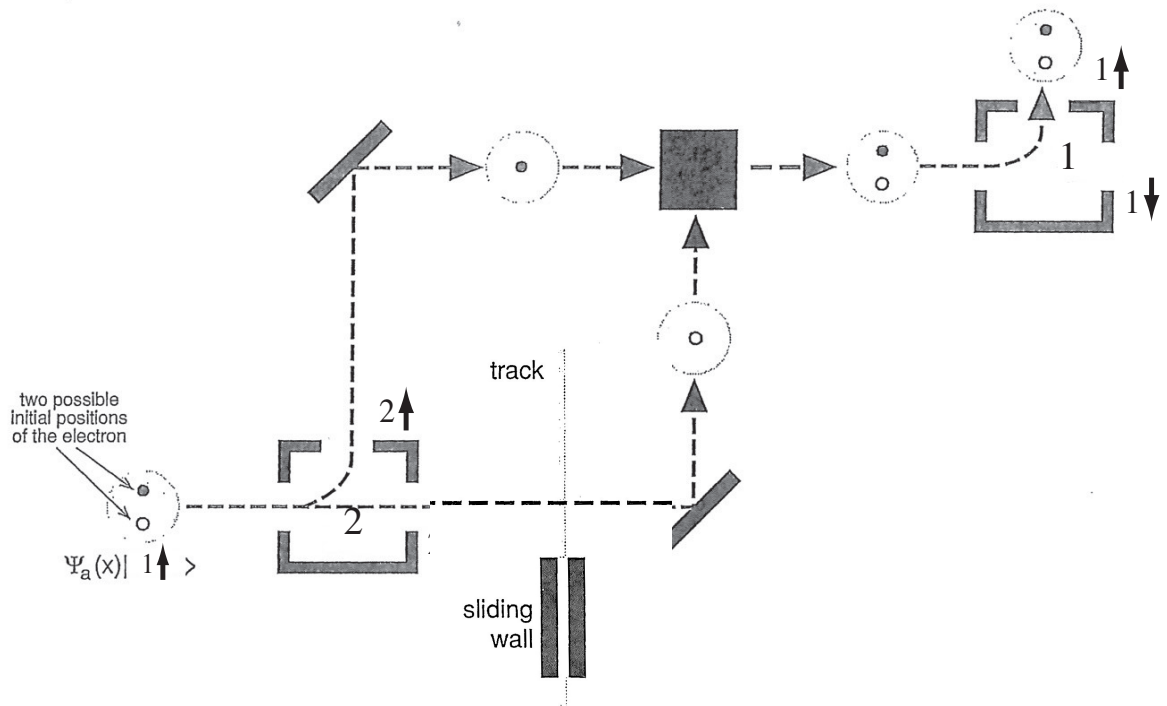
La particule est guidée par la partie de la fonction d'onde dans le support de laquelle elle se trouve.



Pourquoi la “mesure” du spin dans la direction 2 peut changer sa valeur dans la direction 1.



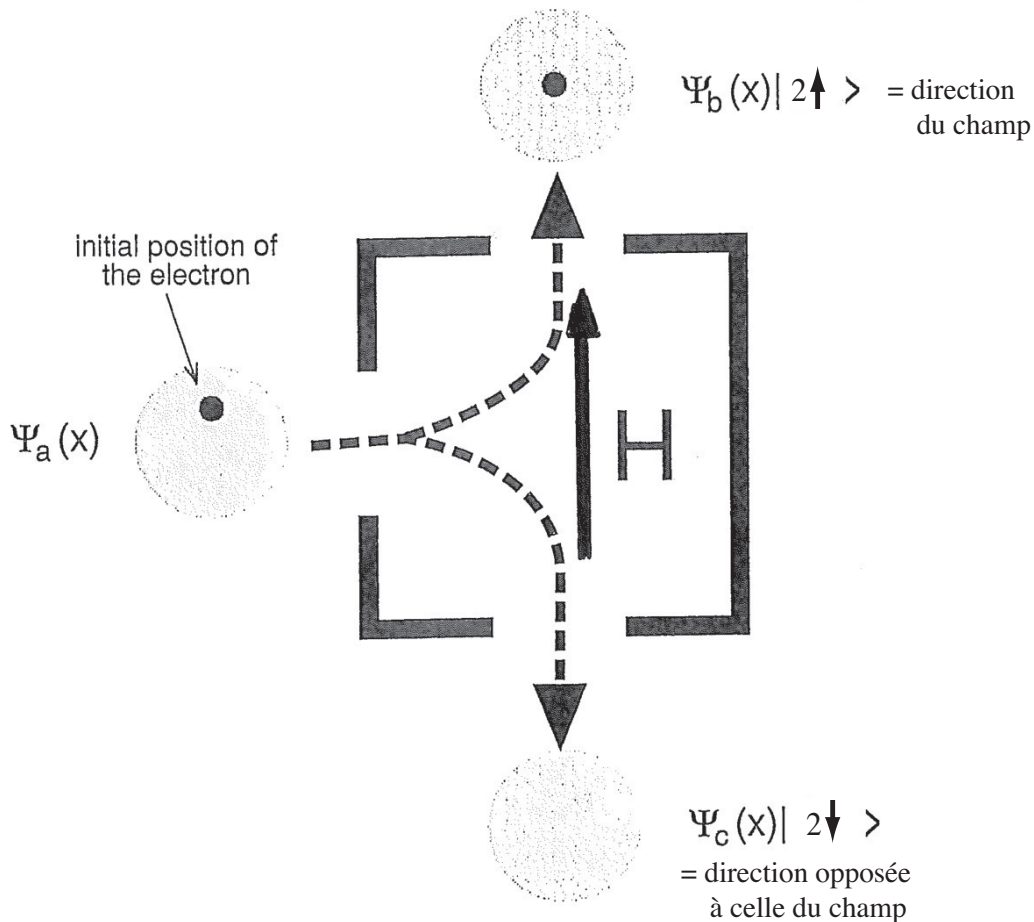
Et les phénomènes d'interférence ?



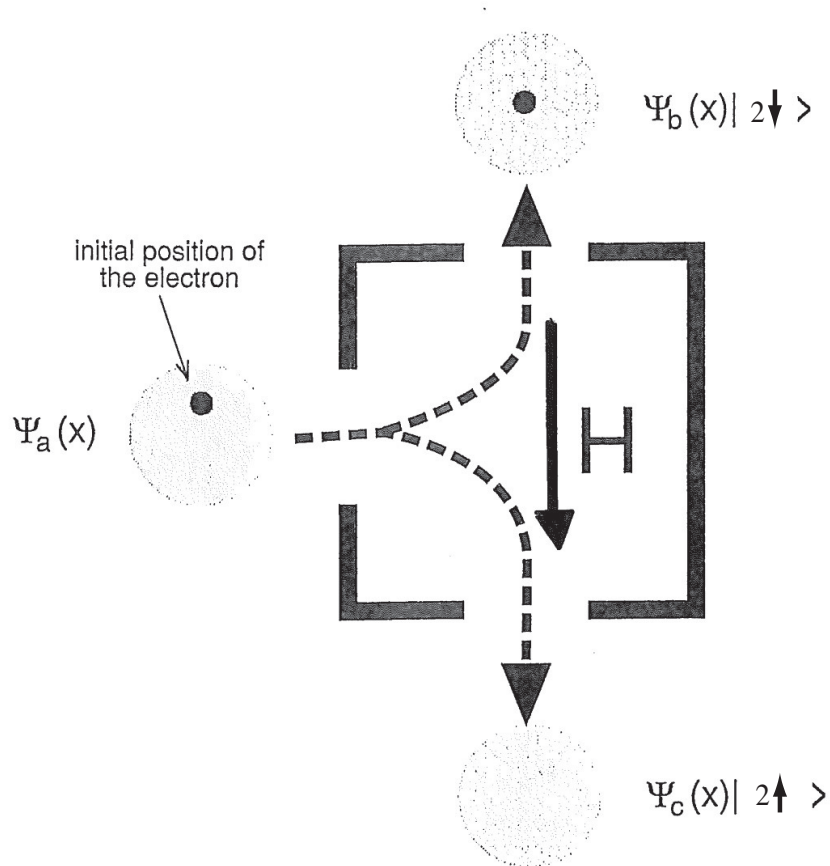
La particule suit un chemin et un seul, mais l'onde qui la guide devient une superposition de deux ondes, chacune suivant un des deux chemins (comme dans l'expérience des deux trous). Si l'on combine les deux ondes, on obtient un résultat différent que si l'on en bloque une.

Côté "surprenant": l'onde est "physique", elle joue un rôle de "pilotage" et n'est pas *seulement* une "onde de probabilité".

Pourquoi les “mesures” – autres que les mesures de position – ne mesurent (en général) aucune propriété pré-existante de la particule (le “spin” n’est pas réel).



$H$  = champ magnétique ; la partie  $|2\uparrow\rangle$  va toujours dans la direction du champ et la partie  $|2\downarrow\rangle$  va toujours dans la direction opposée. Mais la particule, si elle est initialement située dans la partie supérieure de la fonction d’onde, va toujours aller vers le haut (à cause des lignes nodales).



Donc, si on renverse le sens du champ, la particule qui était “spin up” devient “spin down”, alors qu’on “mesure” la même quantité dans les deux dispositifs, mais avec des arrangements différents de l’appareil. Donc, celui-ci n’est pas “passif” (il n’enregistre pas simplement quelque chose de préexistant à la mesure) mais “actif”. → ceci justifie l’intuition de Bohr, mais en l’incorporant dans la théorie même, pas comme un deus ex machina.

Einstein à Heisenberg :

“... Il est tout-à-fait erroné d’essayer de baser une théorie uniquement sur des quantités observables. En réalité, c’est l’opposé qui se passe. C’est la théorie qui décide ce que nous pouvons observer”.

”Il y a un long chemin [qui va des phénomènes à la production d’événements dans les appareils et de là aux impressions des sens] et tout au long de ce chemin ... nous devons être capables de dire comment la nature fonctionne ... avant de pouvoir prétendre avoir observé quoi que ce soit. ... Quand on parle d’observations, vous faites comme si tout pouvait être laissé comme c’était, comme si vous pouviez utiliser le vieux langage descriptif.”

C’est l’orthodoxie qui adopte un réalisme naïf à l’égard des “opérateurs” : tout ce que l’on voit vraiment, ce sont des mouvements de particules, et le calcul des opérateurs nous permet de calculer les statistiques de ces mouvements. Mais cela n’implique pas qu’on a “mesuré” un opérateur, ou même que cette expression a un sens clair.

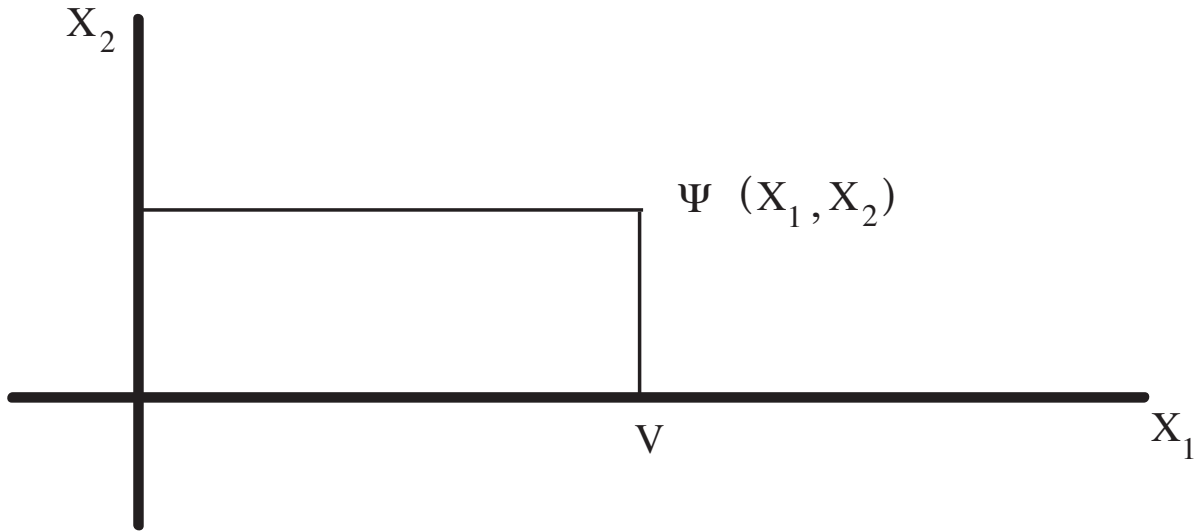
## LA NONLOCALITÉ DANS LA THÉORIE DE BOHM

Racine du problème : la fonction d'onde pour plusieurs corps est définie sur l'espace de configuration, pas sur l'espace réel.

Exemple du champ électrique : si  $E_1(X)$ ,  $X \in \mathbb{R}^3$  est le champ produit par la charge  $e_1$  et  $E_2(X)$  est le champ produit par la charge  $e_2$ , alors le champ produit par les deux charges,  $E(X) = E_1(X) + E_2(X)$ , est encore définie comme fonction de  $X$ .

Mais la fonction d'onde de deux particules  $\Psi(X_1, X_2)$  est définie sur  $\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$  (l'espace de configuration).





$$\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow (X_1, X_2)$$

$V =$  potentiel autour de la position de la particule 1.

$\Rightarrow$  il affecte  $\Psi(X_1, X_2)$  à travers l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar\partial_t\Psi = \mathcal{H}\Psi,$$

$$\mathcal{H} = -\frac{1}{2}\Delta + V.$$

$\Rightarrow$  Et cela affecte le comportement de la seconde particule à travers l'équation pilote.

$$\dot{X}_k = \nabla_k S, \text{ où}$$

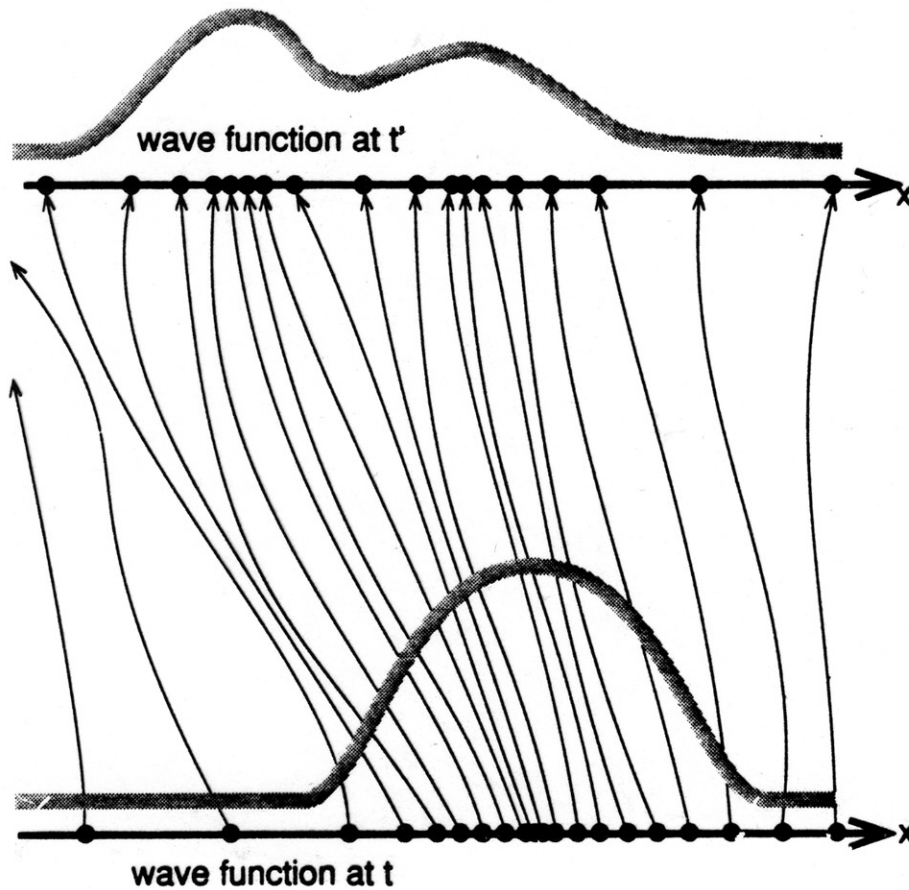
$$\Psi = \text{Re}^{iS}.$$

La fonction d'onde relie d'une certaine façon entre elles des parties arbitrairement éloignées de l'univers → Mysticisme ? Pas nécessairement !

Quid de la relativité ? De la théorie quantique des champs ? Il existe des versions bohmiennes qui reproduisent les résultats usuels.

Conséquence fondamentale de cette dynamique :  
 ÉQUIVARIANCE, ce qui explique l'accord avec les  
 prédictions quantiques usuelles

139



$$|\rho_t| = |\Psi_t|^2 \rightarrow \rho_{t'} = |\Psi_{t'}|^2$$

Où  $\Psi_{t'}$  provient de l'équation de Schrödinger

$$i\hbar\partial_t\Psi = \mathcal{H}\Psi$$

et  $\rho_{t'}$  provient de l'équation pilote.

$$\dot{X}_k = \nabla_k S, \text{ avec } \Psi = Re^{iS}.$$

Cela se déduit immédiatement de

$$\dot{\mathbf{X}} = \frac{\mathbf{J}}{\rho} \text{ (équation pilote)}$$

où  $\rho = |\Psi|^2$ , et de

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \text{ (qui suit de l'équation de Schrödinger).}$$

DOUBLE STATUT de  $\Psi$ :

- Loi gouvernant le mouvement des particules.
- Gouverne également la distribution statistique des positions des particules:  $|\Psi^2|$

Comparer avec l'hamiltonien  $\mathcal{H} \sim \log \Psi$  et  $|\Psi^2| \sim \exp(-\beta \mathcal{H})$

Quelle est la relation entre la théorie de de Broglie-Bohm et la mécanique quantique ordinaire ?

C'EST LA MÊME THÉORIE !

Mais alors, à quoi bon ?

Plus exactement, l'une (la théorie de de Broglie-Bohm) est une théorie, l'autre non (elle ne se présente pas ainsi, mais comme un algorithme permettant de calculer les résultats de mesure) !

La mécanique quantique ordinaire est simplement la théorie de de Broglie-Bohm tronquée : on oublie les trajectoires, cela n'affecte en rien les prédictions empiriques (et cela même est une conséquence de la théorie de de Broglie-Bohm), et cela crée "simplement" quelques bibliothèques remplies de confusions, de mysticisme et de mauvaise philosophie.

À part cela (clarifier nos concepts), la théorie de de Broglie-Bohm n'a aucune utilité !

# HISTOIRE



*DAVID BOHM (à droite) pénètre dans la salle d'audience du House Un-American Activities Committee, le 25 mai 1949, en compagnie de Donald Appel, un membre de la commission d'enquête.*

**1950** : poursuivi pour avoir refusé de dénoncer d'autres personnes et invoqué le 5<sup>ème</sup> amendement.

**1951** : acquitté, mais son contrat n'est plus renouvelé à Princeton et il ne trouve pas d'emploi aux États-Unis. Part au Brésil (São Paulo).

**1951** : Quantum Theory- un des meilleurs livres orthodoxes ; reformule les objections d'EPR sous la forme actuelle (EPRB).

**1952** : sous l'influence d'Einstein, il change radicalement de point de vue : théorie de de Broglie-Bohm.

RÉACTIONS (en partie dues aux souvenirs de Max Dresden)

Nous considérons cela comme du déviationnisme juvénile. . . nous ne perdons pas notre temps à lire l'article [de Bohm]. Si nous ne pouvons pas le réfuter, nous devons nous mettre d'accord pour l'ignorer. [Oppenheimer, 1953. Abraham Pais parle aussi de "déviationnisme juvénile"]

[Bohm] est une calamité publique. . . un trotskiste et un traître. [Princeton Institute, 1953]

[Le travail de Bohm] est un sous-produit à durée de vie courte de la philosophie mécaniste du 19<sup>ème</sup> siècle. [Rosenfeld]

Espérer en des variables cachées est aussi ridicule que d'espérer montrer que  $2 + 2 = 5$ . [Heisenberg]

“Bohm ne cesse de m’envoyer des lettres comme m’en enverrait un religieux sectaire essayant de me convertir à la vieille théorie de de Broglie de l’onde pilote”. Son approche est d’une “simplicité folle” qui est bien sûr “au-delà de tout espoir”. [Pauli, lettre à Fierz, 1951]

Je ne vais sûrement pas entrer dans une controverse avec vous sur la question de la complémentarité, pour la simple raison qu’il n’existe pas le moindre point de controverse à ce sujet. C’est justement parce que nous sommes passés par ce processus de purification à travers des erreurs que nous sommes si sûrs de nos résultats. Il n’y a rien de vrai dans votre suspicion selon laquelle nous arrivons à la complémentarité par une sorte d’incantation magique. Je suis enclin à vous répondre que c’est parmi vos admirateurs parisiens que je discerne des signes inquiétants de mentalité primitive. [Rosenfeld, lettre à Bohm]



Et à propos de de Broglie au Congrès Solvay de 1927: Il fut immédiatement clair que personne n'acceptait ses idées ... En fait, excepté quelques remarques de Pauli, ... l'interprétation causale de de Broglie n'a même pas été discutée à la réunion. Seul Einstein y a fait référence *en passant*.

[Max Jammer, *The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*].

Commentaire de Mike Towler (basé sur Guido Baccagaluppi, Antony Valentini: *Quantum theory at the crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge Univ. Press, 2009):

C'est factuellement incorrect à tous les niveaux. La théorie a été intensément discutée par la plupart des participants, à la fois après la présentation par de Broglie et dans la discussion générale.

## RÉACTIONS AUX RÉACTIONS

En ce qui concerne Pais et le reste du Prince Institute, ce que ces petits péteux pensent n'a pas d'importance pour moi. Dans ces dernières six années, presque rien n'a été produit là. [...] Je suis convaincu que je suis sur le bon chemin. [D. Bohm]

Tout ce qui précède me fait penser à ceci:

La philosophie doit être étudiée, non pas pour obtenir une réponse définitive à ses questions, puisque, en général, aucune réponse définitive ne peut être connue comme étant vraie, mais pour les questions elles-mêmes : parce que ces questions élargissent notre conception de ce qui est possible, enrichissent notre imagination intellectuelle et diminuent l'assurance dogmatique qui ferme l'esprit à la spéculation. [B. Russell]

Pour revenir à la mécanique quantique:

“Je suis fermement convaincu que le caractère fondamentalement statistique de la théorie quantique contemporaine est uniquement dû au fait que celle-ci repose sur une description incomplète des systèmes physiques.

Dans une description physique complète, la théorie quantique statistique prendrait ... approximativement une position analogue à la mécanique statistique dans le cadre de la mécanique classique”.

A. EINSTEIN

MAIS, concernant la théorie de Bohm: “Trop facile”. (too cheap). N’oublions pas qu’Einstein était avant tout préoccupé par la localité, que Bohm ne restaurait pas.

Explication détaillée de Bell:

Laissez moi d'abord réfuter un mythe ... à savoir que la mécanique quantique a d'une certaine façon défait la révolution copernicienne. Ceux qui ont accompli cette révolution nous ont appris que le monde est plus intelligible quand nous ne nous imaginons pas comme étant au centre de ce monde. Est-ce que la théorie quantique replace les 'observateurs', ... nous ... au centre de notre image du monde? On parle beaucoup d'observables dans les livres de théorie quantique. Et le public pourrait avoir l'impression, à partir de certaines présentations dans la littérature de vulgarisation, que l'existence du cosmos dépend du fait que nous sommes là pour observer les observables. Je ne sais pas si c'est faux. Je suis enclin à espérer que nous sommes si importants. Mais je ne vois aucune raison en faveur de cette idée dans les succès de la théorie quantique contemporaine.

Je ne pense pas qu'il soit correct de dire au public que l'attribution d'un rôle central pour la conscience a été intégrée dans la physique atomique moderne. Il me semble irresponsable de suggérer que les aspects techniques des théories contemporaines ont été anticipés par les saints des religions anciennes . . . par introspection.

Le seul 'observateur' qui est essentiel, en pratique, dans la théorie quantique orthodoxe est l'appareil inanimé qui, amplifiant les événements microscopiques, leur donne des conséquences macroscopiques. Bien sûr cet appareil, dans les expériences de laboratoire, est choisi et ajusté par les expérimentateurs. En ce sens, les résultats des expériences dépendent des processus mentaux des expérimentateurs! Mais, une fois que l'appareil est en place et fonctionne sans qu'on y touche, le fait que les expérimentateurs restent pour regarder ou délèguent cette 'observation' à des ordinateurs est absolument sans importance . . . selon la mécanique quantique ordinaire.

Pourquoi il y a-t-il cette nécessité de faire référence aux ‘appareils’ quand nous discutons des phénomènes quantiques? Les physiciens qui ont été les premiers à rencontrer ces phénomènes les ont trouvés si bizarres qu’ils ont perdu tout espoir de les décrire en termes de concepts ordinaires comme l’espace et le temps, la position et la vitesse. Les pères fondateurs de la théorie quantique ont même décidé qu’aucun concept ne pourrait être trouvé qui permettrait une description directe du monde quantique. Ainsi, la théorie qu’ils ont établie avait seulement pour but de décrire systématiquement la réponse de l’appareil. Et que faut-il de plus, après tout, dans les applications? C’est comme si nos amis ne pouvaient pas trouver de mots pour décrire les endroits étranges où ils ont passé leurs vacances. Nous pourrions voir nous-mêmes s’ils reviennent plus bronzés ou plus gros. Et cela serait suffisant pour donner des conseils à d’autres amis, qui pourraient souhaiter être plus bronzés ou plus gros, à propos de ces endroits étranges. Nos appareils visitent le

monde microscopique pour nous et nous pouvons voir ce qui en résulte.

Le ‘Problème’ est le suivant: comment le monde doit-il être divisé exactement entre un appareil parlable . . . dont on peut parler . . . et un système quantique non parlable, dont on ne peut pas parler? Combien d’électrons, ou d’atomes ou de molécules, faut-il pour constituer un ‘appareil’? Les mathématiques de la théorie ordinaire requièrent une telle division, mais ne disent rien sur la façon de la faire. En pratique, la question est résolue par des recettes pragmatiques qui ont survécues à l’épreuve du temps, appliquées avec discernement et avec un bon goût né de l’expérience. Mais est-ce qu’une théorie fondamentale ne devrait pas permettre une formulation mathématique exacte?



À mon avis, les pères fondateurs avaient tort sur ce point. Les phénomènes quantiques n'excluent *pas* une description uniforme des mondes micro et macro, ... du système et de l'appareil. Il *n'est pas* essentiel d'introduire une vague division du monde de ce type. Cela a été indiqué déjà en 1926 par de Broglie, quand il a répondu à l'énigme

onde ou particule?

par

onde *et* particule.

Mais, lorsque cela fut complètement clarifié par Bohm en 1952, peu de physiciens théoriciens voulaient en entendre parler. La ligne orthodoxe semblait entièrement justifiée par les succès pratiques. Même aujourd'hui, l'image de de Broglie-Bohm est généralement ignorée, et n'est pas enseignée aux étudiants. Je trouve que c'est une grande perte. Car cette image stimule l'esprit d'une façon très salutaire.

L'image de de Broglie-Bohm élimine la nécessité de diviser le monde d'une certaine façon entre système et appareil. Mais un autre problème surgit. Cette image et, je pense, toute formulation précise de la mécanique quantique, a un aspect très surprenant: les conséquences des événements survenant à un endroit se propagent à d'autres endroits plus vite que la lumière. Ceci se produit d'une façon qui ne peut pas être utilisée pour envoyer des signaux. Néanmoins, c'est une violation grossière de la causalité relativiste.

J. S. BELL

En plus bref, sur “Copenhague”:

Une extravagance philosophique dictée par le désespoir

E. SCHRÖDINGER

Comment ce qui existe peut-il être impossible ?

(T. Pinch : What does a proof prove if it doesn't prove ?)

En 1932, von Neumann pense prouver l'impossibilité de théories à variable cachées; Il suppose que, pour *TOUTE* paire d'opérateurs, A, B, (même s'ils ne commutent pas entre eux)

$$v(A + B) = v(A) + v(B).$$

Alors, soit  $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_x + \sigma_y)$ . On a

$$v(\sigma_x) = \pm 1$$

$$v(\sigma_y) = \pm 1$$

$$v(\sigma) = \pm 1,$$

ce qui est incompatible avec  $v(A + B) = v(A) + v(B)$ .

Mais cette hypothèse est ‘idiote’ (Bell):  $A$ ,  $B$  et  $A + B$ , si  $A$  et  $B$  ne commutent pas, ne sont *PAS* mesurables simultanément.

SI on admet que l’appareil de mesure joue un rôle actif (intuition de Bohr, non formulable dans la théorie ordinaire, mais justifiée par de Broglie-Bohm), alors il n’y a aucune raison de supposer  $v(A + B) = v(A) + v(B)$ .

(Par opposition à ce qui est supposé par Bell-Kochen-Specker, à savoir  $v(AB) = v(A)v(B)$ , si  $A$  et  $B$  commutent, vu que, dans ce cas, les trois quantités,  $A$ ,  $B$  et  $AB$  sont mesurables simultanément et que les résultats de ces mesures doivent respecter cette règle).

La preuve de von Neumann, si vous la regardez sérieusement, elle tombe en morceaux entre vos mains. Il n'y a *rien* là-dedans. Ce n'est pas seulement erroné, c'est *stupide* ... Quand vous traduisez ses hypothèses en termes physiques, c'est du non sens. Vous pouvez me citer là-dessus; la preuve de von Neumann n'est pas seulement fausse mas idiote.

J. BELL

Pourtant, ce n'était sûrement pas l'avis de von Neumann lui-même:

“Ce n'est pas, comme on le suppose souvent, une question de réinterprétation de la mécanique quantique, le système actuel de la mécanique quantique devrait être objectivement faux pour qu'une description des processus élémentaires autre que celle qui est statistique soit possible”.

J. VON NEUMANN

Ces dernières années, le débat sur ces idées s'est rouvert, et certains mettent en question ce qu'ils appellent "l'interprétation de Copenhague" de la mécanique quantique – comme s'il existait plus qu'une interprétation possible de la mécanique quantique.

R. PEIERLS (1979)



Ni de Born:

Nuls paramètres cachés ne peuvent être introduits grâce auxquels la description pourrait être remplacée par une description déterministe. Par conséquent, si une future théorie devait être déterministe, elle ne pourrait pas être une modification de la théorie actuelle, mais devrait être essentiellement différente.

M. BORN

Ayant lu cela, j'ai relégué cette question dans mes arrières pensées et je me suis occupé de choses plus pratiques. Mais, en 1952, j'ai vu l'impossible se réaliser. C'était dans des articles de David Bohm. Bohm montrait explicitement comment des paramètres pouvaient effectivement être introduits, dans la mécanique ondulatoire nonrelativiste, grâce auxquels la description indéterministe pouvait être transformée en une description déterministe. Et, ce qui est plus important, à mon avis, la subjectivité de la version orthodoxe, la référence nécessaire à 'l'observateur' pouvait être éliminée. De plus, l'essentiel de cette idée avait été avancée déjà en 1927 par de Broglie, dans son image 'd'onde pilote'.

J.S. BELL

Mais alors pourquoi Born ne m'avait pas parlé de cette 'onde- pilote' ? Ne serait-ce que pour signaler ce qu'elle avait d'erroné ? Pourquoi von Neumann ne l'a-t-il pas prise en considération ? Plus extraordinaire encore, pourquoi continuait-on à produire des preuves d'impossibilité, après 1952, et aussi récemment qu'en 1978 ? Alors que même Pauli, Rosenfeld et Heisenberg ne pouvaient guère produire de critique plus sévère de la version de Bohm que de la dénoncer comme étant 'métaphysique' et 'idéologique' ? Pourquoi l'image de l'onde-pilote est-elle ignorée dans les ouvrages de mécanique quantique ? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique voie, mais comme un antidote à l'autosatisfaction régnante ? Pour montrer que l'imprécision, la subjectivité, et l'indéterminisme, ne nous sont pas imposées de force par des faits expérimentaux, mais par un choix théorique délibéré ?

J.S. BELL

Ce qui m'a toujours intéressé était de comprendre ce que le monde est. C'est pourquoi j'ai étudié la physique : si la physique est l'étude de la nature, alors pour comprendre la nature, il faut d'abord étudier la physique. Mais mes espoirs ont été déçus par ce qui est (ou semble être) généralement accepté dans beaucoup de départements de physique dans le monde entier : après la mécanique quantique, il faut abandonner l'idée que la physique nous donne une image de la réalité. Au début, j'ai cru que c'était vrai et j'ai été tellement déçue que j'ai décidé d'abandonner mon rêve 'romantique'...

Mais, à un moment donné, . . . J'ai réalisé que certaines des choses que j'avais acceptées n'étaient pas si manifestement vraies, et j'ai repris l'espoir que la mécanique quantique n'était pas réellement la 'fin de la physique', au sens où je l'entendais. Par conséquent, j'ai commencé une thèse en physique pour élucider la situation. En faisant mon doctorat sur les fondements de la mécanique quantique, j'ai compris que ce que les physiciens considéraient comme étant une vérité inévitable était au contraire une grossière erreur: la mécanique quantique ne nous force pas à abandonner quoi que ce soit, et sûrement pas la possibilité d'étudier la réalité à travers la physique.

V. ALLORI