

# PEUT-ON COMPRENDRE LA MECANIQUE QUANTIQUE

## Jean Bricmont, UC Louvain, Belgique

A.E.I.S, 1er Juin 2015

Transcription : Michel Gondran et Jean Pierre Treuil.

Peut-on comprendre la Mécanique Quantique? Le titre est ambitieux. La réponse sera positive, mais jusqu'à un certain point. Et elle sera différente de la présentation habituelle.

Jean Bricmont nous propose le plan suivant.

1. **Dans un premier temps**, une présentation très simple des deux principaux mystères de la mécanique quantique. Le premier mystère réside dans l'indétermination des mesures et l'existence des interférences. Il introduira les principes qui en rendent formellement compte (notions d'état et de superposition). Le second mystère est celui de la non localité et des inégalités de Bell.
2. **Dans un second temps**, une présentation de la théorie de de Broglie-Bohm et de la manière dont elle peut résoudre ces deux mystères.

### Expériences sur l'indétermination des mesures : les faits.

Jean Bricmont prend l'exemple des mesures de "spin". Il considère un objet quantique, appelé *particule*, lequel - soumis à un "dispositif de mesure" caractérisé par *une direction spatiale orientée* - renvoie, lors de l'acte de mesure, deux valeurs possibles : up et down ( $\uparrow$  et  $\downarrow$ ), dites "valeurs (ou mesures) du spin de la particule sur cette direction". Son approche, dans cette partie de l'exposé, est purement phénoménologique : Il ne précise pas - car s'avérant inutile à sa démonstration - la nature physique de l'objet "mesuré", ni celle du dispositif de mesure, vu comme une "boîte noire", ni même la signification physique du spin. Son but est de mettre en avant - d'une façon très simple - les étrangetés auxquelles est confrontée la notion de mesure, dans ce contexte quantique. L'arrière plan technique est cependant l'expérience de Stern et Gerlach, dans laquelle la direction spatiale associée à l'appareil est celle d'un champ magnétique.

### Vous avez dit "mesure" ?

Pour qu'une mesure ait un sens, il faut que la répétition "immédiate" d'un acte de mesure sur le même objet - et avec les mêmes réglages que l'acte initial - fournisse les mêmes réponses. C'est une condition minimale de cohérence d'un point de vue phénoménologique. En conséquence, si l'on a mesuré le spin sur une direction donnée, puis que l'on répète la mesure sur cette même direction, alors on *doit* retrouver la même réponse. Les dispositifs de mesure considérés sont censés répondre à cette condition. Mais Jean Bricmont met des guillemets à "mesure" : En mécanique quantique - et contrairement à l'expérience de ce qu'est une mesure à notre échelle - ces mesures n'expriment pas de vraies propriétés de la particule. Il s'agit d'un point important, sur lequel il reviendra à plusieurs reprises. Penser que l'on mesure une propriété intrinsèque de la particule introduit le maximum de confusion : ce n'est pas le cas et on peut même le démontrer.

### Des expériences et leur résultats

Toute la présentation de Jean Bricmont est articulée sur ce que l'on observe lorsqu'on soumet successivement la particule à des mesures sur des directions différentes. Il considère donc deux dispositifs ou "appareils" de mesure, respectivement associés à deux directions *orthogonales*, appareils désignés par 1 et 2, soit quatre réponses possibles :  $1\uparrow$ ,  $1\downarrow$  (sur l'appareil 1) et  $2\uparrow$ ,  $2\downarrow$  (sur l'appareil 2).

**Première expérience, appareil 1 puis appareil 2** : soit une particule ayant répondu  $1\uparrow$  à une mesure sur l'appareil 1 (on dira que la particule a été *préparée* en  $1\uparrow$ ). Après mesure cette fois ci dans l'appareil 2, on observe en sortie tantôt l'une, tantôt l'autre des deux réponses  $2\uparrow$  ou  $2\downarrow$ .

**Seconde expérience, appareil 2, puis appareil 1** : soit maintenant une particule préparée en  $2\uparrow$ , on observe en sortie, cette fois dans l'appareil 1, tantôt l'une, tantôt l'autre des deux réponses  $1\uparrow$  ou  $1\downarrow$ .

*La question est de savoir si l'une des réponses -  $2\uparrow$  ou  $2\downarrow$  dans la première expérience,  $1\uparrow$  ou  $1\downarrow$  dans la seconde - est privilégiée par rapport à l'autre.* La répétition des expériences un grand nombre de fois conduit aux constatations suivantes : en répétant la première expérience, on trouve chacune des deux réponses ( $2\uparrow$  ou  $2\downarrow$ ) dans 50% des cas, *aucune n'est favorisée*. Il en est de même dans la seconde expérience. Par ailleurs, si les particules sont préparées autrement -  $1\downarrow$  pour la première expérience,  $2\downarrow$  pour la seconde - les conclusions sont identiques à celles obtenues pour les préparations  $1\uparrow$  et  $2\uparrow$ , il existe toujours une indétermination de la réponse.

### Un dispositif de mesure impossible

Peut-on alors construire un appareil de mesure associé aux deux directions, avec comme réponses possibles les quatre doublets  $[1\uparrow, 2\uparrow]$ ,  $[1\uparrow, 2\downarrow]$ ,  $[1\downarrow, 2\uparrow]$ ,  $[1\downarrow, 2\downarrow]$  ? *Cette construction s'avère impossible.*

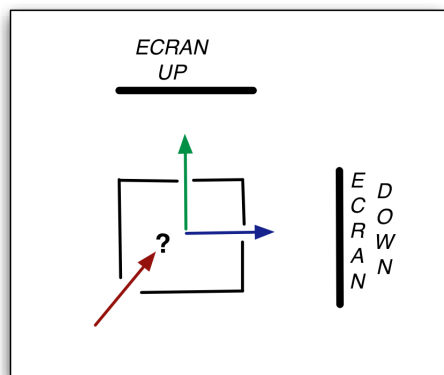
Une façon d'essayer de le faire consiste à utiliser successivement les deux appareils mono-directionnels, par exemple en effectuant d'abord une mesure avec l'appareil 1, puis aussitôt une mesure avec l'appareil 2. Cette procédure ne fonctionne pas, comme l'on peut d'ailleurs s'y attendre à partir des observations précédentes. Sa répétition immédiate ne renvoie pas en effet à tous les coups le même doublet, condition exigée pour une mesure ; par exemple, lors du second passage dans l'appareil 1, on observe *tantôt l'une, tantôt l'autre des deux réponses  $1\uparrow$  ou  $1\downarrow$ , et ce, quel que soit le doublet affiché antérieurement*. L'indétermination - toujours dans l'hypothèse de directions orthogonales - étant de 50% pour  $1\uparrow$ , 50% pour  $1\downarrow$ . Après le premier passage dans l'appareil 2, la mémoire de la réponse donnée - lors du premier passage dans l'appareil 1 - est perdue.

En fait, toute tentative pour mesurer le spin "simultanément" sur les deux directions 1 et 2, avec l'assurance d'une répétition donnant le même résultat, est vouée à l'échec.

### Expériences sur les Interférences : les faits.

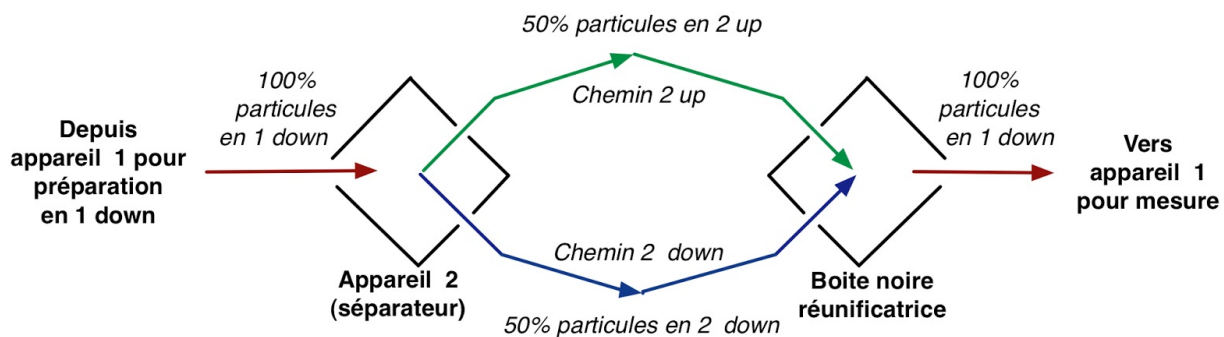
Jean Bricmont aborde ensuite les phénomènes d'interférences.

Pour bien comprendre l'expérience qu'il décrit, il est nécessaire de préciser schématiquement la manière dont sont construits les appareils de mesure dont il vient d'être question. Ces appareils comportent matériellement une entrée et deux sorties, avec - en face de ces dernières - deux écrans capteurs ; les deux sorties - et donc les deux écrans - sont associées respectivement à l'une et à l'autre des deux réponses possibles, par exemple  $2\uparrow$  et  $2\downarrow$  pour l'appareil 2 ; la mesure consiste concrètement à détecter des impacts sur ces écrans, la réponse  $2\uparrow$  s'identifiant ainsi à la constatation d'un impact sur l'écran qui lui est associé.



Dans une première expérience, Jean Bricmont considère donc un flux de particules *toutes préparées en  $1\downarrow$* , que l'on dirige vers l'appareil 2 tel que présenté ci dessus, **mais sans ses écrans capteurs**. Soumises à cet appareil, les particules *sont donc censées* répondre (à 50%, 50%)  $2\uparrow$

ou  $2\downarrow$ , en s'échappant par les sorties correspondantes. Mais, du fait de l'absence d'écrans capteurs, les particules "poursuivent" des trajectoires, ou "chemins " distincts. Un système de miroirs et une "boîte noire" ramènent cependant ces trajectoires à se rencontrer, de façon symétrique, puis à se confondre sur un même axe final ; sur cet axe est placé un appareil 1, pour une mesure, avec comme réponses possibles  $1\uparrow$  et  $1\downarrow$ .



**Dispositif pour l'expérience sur l'interférence**  
(librement inspirée de la figure donnée par Jean Bricmont)

### Bizarre, bizarre, et quelle coïncidence !

Le résultat des mesures sur ce dernier appareil est le suivant : sur un flux de particules en entrée du dispositif, toutes préparées en  $1\downarrow$ , nous trouvons en sortie : 0% (des réponses) en  $1\uparrow$  et 100% en  $1\downarrow$ . Ce résultat est très étonnant, pour ne pas dire incompréhensible, car il est en totale contradiction avec la conclusion de l'expérience précédente : en effet, nous avons alors compris que le passage dans l'appareil 2 faisait perdre la mémoire de la mesure antérieure sur l'appareil 1, une seconde mesure sur cet appareil donnant une réponse indéterminée (50%, 50%). Ici au

contraire, les particules ne perdent pas la mémoire de leur préparation initiale en  $1\downarrow$ . C'est le mystère de l'interférence.

Une seconde expérience est menée sur le même dispositif, mais ici le flux en entrée (toujours dirigé sur l'appareil 2) est constitué de particules toutes préparées  $2\uparrow$  ... En sortie du dispositif, la réponse sur l'appareil 1 est cette fois  $\grave{a}$  indéterminée : 50% en  $1\uparrow$  et 50% en  $1\downarrow$ . Cette indétermination ne pose pas de problème particulier ; l'appareil 2 renvoie toutes les particules en  $2\uparrow$ , dans l'état où elles ont été préparées, elles empruntent toutes le même chemin, et l'on se retrouve dans le cas présenté à propos de la superposition.

### Mais plus étonnant encore !

Dans la troisième expérience, le flux d'entrée est toujours formé de particules préparées avec un spin  $1\downarrow$  Mais cette fois un écran est placé en aval de l'une des sorties de l'appareil 2 et bloque donc l'un des chemins, par exemple le chemin  $2\downarrow$ . A la sortie du dispositif, les constatations sont alors les suivantes :

1. 50% des particules manquent à l'appel ! (Ce sont "bien sûr" les particules qui ont été arrêtées par l'écran...)
2. Les réponses données par les particules restantes se répartissent, après passage et mesures dans l'appareil 1, pour 50% sur  $1\uparrow$  et 50% sur  $1\downarrow$ . L'indétermination réapparaît ! Ici encore ce résultat est très surprenant : suite aux constatations - déjà étonnantes - de l'expérience sans blocage, nous nous attendions en effet à trouver ces particules restantes, en totalité en  $1\downarrow$  ; comment le fait de placer un écran bloquant les particules suivant le chemin  $2\downarrow$  (et les éliminant ainsi de l'expérience) pourrait-il affecter les propriétés des particules empruntant l'autre chemin ?

### Que de réserves ! que se passe-t-il donc ?

L'auditeur de Jean Bricmont, et le lecteur de ce compte rendu n'auront pas été sans remarquer des hésitations dans la description des expériences ; hésitations marquées par des expressions comme "les particules *sont censées* répondre", et par de nombreuses mises "entre guillemets" (les particules "poursuivent" les trajectoires...). En effet, autant est-on certain du dispositif mis en place et des observations faites en entrée et en sortie, autant l'énoncé de ce qui se passe à l'intérieur est source de grandes difficultés.

Il nous semble en effet, être dans **une impasse**. Essayons de raisonner sur une particule. Que fait cette particule, quand nul obstacle ne se présente quels que soient les chemins ?

1. **Suit-elle le chemin  $2\uparrow$ ?** Non, parce que s'il en était ainsi, les réponses en sortie du dispositif par l'appareil 1 seraient indéterminées (50% sur  $1\uparrow$  et 50% sur  $1\downarrow$ ) Or ce n'est pas ce qui est constaté (100% sur  $1\downarrow$ )
2. **Suit-elle le chemin  $2\downarrow$ ?** Non, pour la même raison.
3. **Suit-elle simultanément les deux chemins?** Non, cette fois encore, car lorsqu'on cherche à détecter par où elle passe, on la trouve le long d'un des chemins, et non sur les deux

4. **Ne suit elle donc aucun des chemins ?** la réponse est Non une dernière fois car, si on bloque les deux chemins, rien ne passe.

On rencontre là un des mystères de la mécanique quantique !

### **Le formalisme : représenter les états par des vecteurs**

Le formalisme de la physique quantique “résoud” les étrangetés et contradictions qui viennent d’être présentées. Cette résolution - précisera Jean Bricmont - consiste en une mise en cohérence des résultats obtenus dans les expériences évoquées, par le biais d’une description mathématique ; mais cette description mathématique doit être questionnée quant à son interprétation physique.

Notre conférencier présente d’abord les principes de ce formalisme, toujours dans le contexte des mesures de spin :

1. à chaque instant, une particule est dans un certain *état*, incluant ce qu’on appelle son spin ; seule cette composante est prise en compte dans un premier temps.
2. cet état est représenté mathématiquement par un vecteur d’un espace bi-dimensionnel, *l’espace des états*.
3. à chaque appareil de mesure du spin dans une direction donnée correspondent deux vecteurs de l’espace des états, vecteurs qui en forment une base ; ces vecteurs sont les vecteurs propres d’un certain opérateur (concrètement, une matrice), opérateur qui constitue, en quelque sorte, la carte d’identité de l’appareil de mesure. Ils sont respectivement associés aux deux réponses possibles : il est alors commode d’utiliser les mêmes notations pour désigner un vecteur et la réponse qui lui est associée ; Jean Bricmont parle ainsi des vecteurs  $1\uparrow$  et  $1\downarrow$  (appareil 1),  $2\uparrow$  et  $2\downarrow$  (appareil 2) .
4. tout état peut donc s’écrire comme une combinaison linéaire des deux vecteurs caractérisant un appareil ; par exemple l’état  $c_1 1\uparrow + c_2 1\downarrow$  , ou encore  $d_1 2\uparrow + d_2 2\downarrow$  ; les coefficients de la combinaison ( $c_1, c_2$ ) ou ( $d_1, d_2$ ) pouvant être des nombres complexes.
5. au cours du temps et *en l’absence de toute mesure* (Règle R1), les coefficients caractérisant l’état évoluent en conformité avec *l’équation de Schrödinger*, laquelle maintient - si les vecteurs sont normés au départ - la somme de leur carrés, égale à 1 :  
 $|c_1(t)|^2 + |c_2(t)|^2 = 1$  ,  $|d_1(t)|^2 + |d_2(t)|^2 = 1$
6. *lors d’une mesure*, l’état de la particule se trouve projeté “instantanément” sur l’un des vecteurs propres de l’opérateur caractérisant l’appareil. C’est ce qu’on appelle aussi “l’effondrement” de l’état (Règle R2). Les probabilités d’obtenir dans cette projection l’un ou l’autre des vecteurs, *donc l’une ou l’autre des réponses*, sont égales aux carrés des coefficients de la combinaison linéaire reliant l’état *d’avant mesure* aux vecteurs propres : par exemple une mesure par l’appareil 1 sur l’état  $c_1 1\uparrow + c_2 1\downarrow$  répond  $1\uparrow$  avec la probabilité  $|c_1(t)|^2$  et  $1\downarrow$  avec la probabilité  $|c_2(t)|^2$  (le vecteur représentant l’état est supposé normé, pour assurer que la somme des deux probabilités soit bien égal à 1).

Jean Bricmont explique alors, comme annoncé, comment ces principes rendent cohérents les résultats des expériences ; il les reprend point par point, telles qu'ils les a décrites.

### L'indétermination des mesures : l'éclairage de la théorie

Le conférencier commence par l'expérience soumettant à une mesure sur l'appareil 2 des particules toutes préparées en  $1\uparrow$ . Pour effectuer le calcul de ce qui se passe dans l'appareil 2, on ré-écrit l'état  $1\uparrow$ , comme une combinaison linéaire des vecteurs caractérisant cet appareil. Une physique plus précise des états de spin nous enseigne que, *lorsque les directions spatiales 1 et 2 sont orthogonales*, on obtient :  $1\uparrow = 1/\sqrt{2} (2\uparrow + 2\downarrow)$ . Les probabilités des réponses à la sortie de l'appareil 2 sont donc de  $|1/\sqrt{2}|^2$  pour  $2\uparrow$  et  $|1/\sqrt{2}|^2$  pour  $2\downarrow$  : ces probabilités sont bien égales, on retrouve l'indétermination "50% 50%" sur la mesure de l'appareil 2.

### Les Interférences : l'éclairage de la théorie.

Les principes ci-dessus rendent compte également des résultats très déroutants rencontrés dans les expériences d'interférences. Toutefois, dans l'écriture de l'état d'une particule, il faut inclure, à côté des composantes "spin", des composantes spécifiant les chemins empruntés. Sans entrer dans le détail mathématique de ces dernières composantes, Jean Bricmont nous montre l'essence du raisonnement formel :

1. Une particule préparée dans l'état de spin  $1\downarrow$  suit le chemin **C** avant d'entrer dans l'appareil 2. Son état complet est noté  $|1\downarrow\rangle|C\rangle$
2. L'état de cette même particule, après être passée dans l'appareil 2, devient une combinaison linéaire de deux états élémentaires, chacun associant un état de spin possible en sortie de cet appareil et le chemin initié par cette sortie.
3. Convenons de noter **C2 $\uparrow$**  le chemin de l'état de spin  $2\uparrow$  et **C2 $\downarrow$**  l'autre chemin. L'état de la particule en sortie de l'appareil 2, avant de passer dans la "boite noire" réunificatrice, s'écrit  $1/\sqrt{2} (|2\uparrow\rangle|C2\uparrow\rangle - |2\downarrow\rangle|C2\downarrow\rangle)$
4. Dans la boite noire, les deux chemins se rencontrent et reprennent une seule et même direction.
5. Convenons d'appeler **D** le chemin "réunifié" suivi par la particule après être passée dans la boite noire. Son état s'écrit alors  $1/\sqrt{2} (|2\uparrow\rangle|D\rangle - |2\downarrow\rangle|D\rangle)$

L'état final de la particule en entrée de l'appareil 1 est donc :

$$1/\sqrt{2} (|2\uparrow\rangle|D\rangle - |2\downarrow\rangle|D\rangle) = 1/\sqrt{2} (|2\uparrow\rangle - |2\downarrow\rangle)|D\rangle = |1\downarrow\rangle|D\rangle$$

La particule termine le circuit, en étant mesurée par l'appareil 1. Celui-ci la laisse nécessairement dans l'état  $1\downarrow$  puisque cet état est l'un des vecteurs propres. On retrouve donc à la sortie de l'ensemble du dispositif la particule dans l'état où elle se trouvait à son entrée, malgré toutes les transformations qu'elle a subies.

### Les principes questionnés : un premier débat

Jean Bricmont aborde alors les questions de fond que pose le formalisme quantique, malgré ses succès stupéfiants.

Tout d'abord, il faut bien voir que le formalisme mobilise deux règles mutuellement incompatibles : l'une sur ce qui se passe "en dehors des mesures", l'autre sur ce qui se passe "lors des mesures". La première met en oeuvre, par l'équation de Schrödinger, une évolution *continue et déterministe*. La seconde introduit un saut *discontinu* - l'effondrement de l'état - et *stochastique*. C'est l'un des problèmes fondamentaux de la physique quantique. Comment réconcilier ces deux règles ?

Jean Bricmont s'attarde ensuite sur une question plus large, autour de cette notion centrale d'état. Quel en est le sens physique ? Dans la musique des débats agitant les physiciens sur cette question, notre conférencier nous rappelle trois mouvements.

### Une première réponse : tais toi et calcule

C'est la position standard, "orthodoxe". Celle que l'on enseigne dans les cours. Elle consiste à dire que la seule préoccupation doit être de pouvoir prédire des résultats de mesure : résultats qui ne sont que des traces - observables par nous êtres humains, dans nos laboratoires - des transformations macroscopiques affectant nos instruments dans leurs interactions avec le monde microscopique. En se satisfaisant de constater que le formalisme quantique possède pour ce faire des capacités inégalées.

Jean Bricmont trouve que cette position est très insatisfaisante ; la mécanique quantique en effet est à la base de la physique des particules, de la physique atomique, de la physique nucléaire, de la chimie, et donc de la biologie ; elle explique la stabilité de la matière, etc... Il est difficile d'admettre que nos théories physiques les plus fondamentales ne portent que sur certains phénomènes macroscopiques, réalisés en laboratoire, appelés "mesures", et ne disent rien sur la réalité sous-jacente.

### Au delà, un point de vue implicitement plus "réaliste"

Beaucoup de physiciens s'affichent "orthodoxes", mais ils ont en fait un point de vue plus optimiste sur le degré de connaissance de la réalité, que J. Bricmont qualifie "d'implicite". Ce point de vue est que des expériences bien faites révèlent des propriétés préexistantes de la particule (mais pas nécessairement simultanément mesurables, et c'est là un point crucial, on en convient, par rapport à la physique classique) ; autrement dit, des propriétés *intrinsèques* à l'objet mesuré, telle à notre échelle la longueur d'une table ; cette grandeur est bien considérée comme une propriété préexistante, inconnue avant sa mesure.

C'était le point de vue d'Einstein et de Schrödinger. Ces derniers ont insisté en affirmant que s'il existe des propriétés préexistantes et inconnues, alors la mécanique quantique est incomplète. Ils ont été incompris de Bohr et des autres adeptes de l'interprétation de Copenhague, dont le but était de prédire, et qui ne voyaient pas l'intérêt (ni la possibilité ?) de cette complétion pour mieux le faire. Pour Einstein et Schrödinger, la prédictibilité n'est pas le but final de la science ; on sait

bien qu'il existe des systèmes chaotiques et imprévisibles, ce qui n'empêche pas d'en rechercher une théorie déterministe..

### Mais hélas, il n'y a pas de variables cachées !

Supposer la physique quantique incomplète implique l'existence de "variables cachées", sous-jacentes, dont la connaissance permettrait à coup sûr, *si elle était possible*, de prédire le résultat des expériences, sans indétermination. Cette hypothèse signifie que tout système est, à chaque instant, dans un *état où toutes les observables ont une valeur bien définie*, préexistante à toute mesure. Elle ne signifie pas que l'on puisse accéder à l'ensemble de ces valeurs, mais pour le moins, à certaines d'entre elles.

Il existe toute une littérature sur ces sujets ; Jean Bricmont en reparlera plus loin dans son exposé à propos de la non-localité et des inégalités de Bell, mais dans ce préliminaire il introduit le *théorème de Kochen-Specker* qui formalise mathématiquement l'hypothèse précédente et démontre sa non-réalisation. Sa conclusion est, en effet, "qu'il est impossible d'attribuer simultanément une valeur bien définie à toutes les quantités que l'on peut en principe mesurer - i.e. les observables - d'une façon qui soit en accord avec les prédictions usuelles de la physique quantique".

Le conférencier nous présente brièvement l'articulation de ce théorème. L'état du système est assimilé à une *fonction* attribuant une valeur déterminée, un nombre réel,  $v(P)$ , à toute propriété mesurable. Cette fonction concrétise la préexistence des propriétés et de leurs valeurs, avant toute mesure. Elle est paramétrée par les valeurs des variables cachées, mais ces dernières n'apparaissent pas explicitement dans le théorème. Kochen et Specker montrent alors la contradiction entre deux exigences requises pour la fonction  $v(P)$ , et donc sa non-existence :

1. **Accord avec la physique quantique** : les propriétés mesurables  $P$  sont les *observables*  $A$  de la théorie quantique, mathématiquement représentées par des opérateurs (hermitiens) sur un espace de Hilbert. La valeur  $v(P) = v(A)$  est pour toute propriété  $P$  l'une de celles données comme possibles par cette théorie, savoir une valeur propre de l'opérateur  $A$ .
2. **Cohérence des valeurs**. Cette cohérence s'exprime dans les sous-ensembles d'observables données par la théorie comme simultanément mesurables. De tels sous-ensembles sont appelés *contextes*. La condition requise est alors la suivante : dans toute combinaison reliant, par somme ou produit, plusieurs observables *d'un même contexte*, les valeurs prises doivent vérifier la même relation ; par exemple, si  $A, B, C$  - simultanément mesurables - sont reliées par  $C = AB$ ,  $v(C)$  ne peut être l'une quelconque des valeurs propres de  $AB$  ; elle doit être égale au produit  $v(A)v(B)$  ; on peut évoquer comme image, à notre échelle macroscopique, les deux longueurs d'un rectangle -  $v(A)$  et  $v(B)$  et son aire  $v(C)$ .

### Mais alors ?

Ce théorème rend intenable la vue "implicite". "La mesure", en effet, au moins pour certaines quantités (pas nécessairement pour toutes), ne mesure rien de préexistant. Elle ne fournit que le résultat de l'interaction entre l'objet "mesuré" et l'appareil. Ce dernier joue un rôle "actif", comme



le pensait Bohr. On revient à l'interprétation orthodoxe ; mais on ne dit rien sur le monde et même rien sur le processus de "mesure". On a "seulement" un algorithme, lequel permet, étant donné un input, de calculer la probabilité de l'output. Et c'est tout.

Ne peut-on pas vraiment faire mieux ? Est-ce vraiment là le but de la physique fondamentale? Avant de passer à une réponse, Brimont nous entretient d'un deuxième mystère, encore plus important que le premier, c'est le mystère de la "non localité".

### Second mystère: la non-localité

Notre conférencier, dans son exposé, approche ce mystère de plusieurs façons ; il nous présente d'abord une expérience de pensée que l'on trouve dans une lettre de 1935 d'Einstein à Schrödinger. Cette expérience est peu connue. de Broglie l'a décrite dans un de ses livres. On l'appelle les boîtes d'Einstein. Une unique particule est placée dans une boîte B, dans laquelle on insère une barrière qui coupe la boîte en deux ; on obtient ainsi deux "demi-boîtes" B1 et B2. On suppose que cette partition ne perturbe pas la particule.

Avant la partition, l'état de la particule est  $|B\rangle$ , signifiant que la particule "est" dans la boîte B. Après la partition, l'état de la particule devient une superposition  $1/\sqrt{2} (|B_1\rangle + |B_2\rangle)$  ;  $|B_1\rangle$  décrit que la particule "est" dans la boîte B<sub>1</sub> ;  $|B_2\rangle$  décrit que la particule "est" dans la boîte B<sub>2</sub>. On place le "est" entre guillemets, car on ne sait pas ce qui se passe en dehors des mesures. La seule chose dont on est sûr est que si l'on ouvre les boîtes, on trouvera la particule dans l'une ou dans l'autre.

Les deux demi-boîtes B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub> sont éloignées l'une de l'autre, d'une distance arbitrairement grande, par exemple l'une jusqu'à New-York, l'autre jusqu'à Tokyo. Les boîtes arrivées à destination, si l'on ouvre l'une d'elles (mettons B<sub>1</sub>), et que la particule ne s'y trouve pas, on sait qu'elle se trouve en B<sub>2</sub>. Par conséquent, c'est une mesure et l'état se "réduit" instantanément, de façon non locale, à  $|B_2\rangle$ . De fait, si l'on ouvre alors la boîte B<sub>2</sub>, on trouve la particule !

### De nouveau : qu'est-ce qu'un état ?

Une nouvelle fois, la question du statut de l'état se trouve posée : cet état est-il "physique" ou "épistémique" ? Dire qu'il est physique signifie qu'il est un élément de la nature. Dire qu'il est épistémique signifie qu'il n'est qu'un élément de nos connaissances, lequel nous aide à raisonner et éventuellement à agir sur le monde avec une certaine efficacité. Si je lance une pièce de monnaie, elle tombe pile ou face, mais si je cache le résultat, vous ne le connaissez pas. Pile ou face est physique, la connaissance de la probabilité 1/2 est épistémique.

Dire que l'état est épistémique équivaut à dire que la mécanique quantique est incomplète. Il existerait, dans cette hypothèse, des "variables cachées" qui complèteraient la description quantique et qui, dans le cas présenté, détermineraient dans quelle boîte se trouve la particule, avant qu'on ouvre l'une d'elles. Mais les théorèmes sur l'inexistence de variables cachées rendent douteuse la possibilité d'une telle complétion.

Considérer, à l'inverse, que l'état de la particule est physique pose cependant un problème sérieux. Lorsque, lors de l'ouverture de la boîte à New York, l'expérimentateur ne trouve pas la particule, Il conclut qu'elle est dans la boîte de Tokyo, et il a raison ! mais peut-il en conclure qu'elle s'y trouvait "déjà", *avant l'ouverture* ? Si c'est le cas, (comme on est spontanément conduit à le penser), cela implique qu'un certain mécanisme a placé la particule dans la boîte de Tokyo, vraisemblablement à l'instant de la séparation, mais on peut aussi imaginer un transfert à un instant ultérieur. Cela implique donc un déterminisme que cet expérimentateur ignore, donc l'existence de variables inconnues de lui, variables "cachées" qui contrôlent ce déterminisme. Si l'on refuse cette hypothèse (l'existence de variables cachées), on doit alors admettre que ne pas trouver la particule dans la boîte de New York place en quelque sorte la particule dans la boîte de Tokyo ; autrement dit, c'est en ouvrant que l'expérimentateur agit sur l'état et cela des deux côtés, et donc de façon *non locale*.

### Action à distance, action magique ?

Nous avons donc affaire à une "action à distance". Pour donner une idée de la nature de cette action, J. Bricmont nous propose l'exemple imaginé par Hergé dans " Les 7 boules de cristal et le temple du soleil". Des explorateurs entrent en transe à certaines heures. Tintin découvre que la réponse à ce mystère se trouve loin de là, dans le Temple du Soleil où un chef Inca pique des statuettes ; c'est à cet instant là que le phénomène se produit ; lorsque les statuettes sont détruites, les explorateurs sont immédiatement désenvoûtés.

Dans cet exemple, l'action à distance possède un certain nombre de propriétés : 1. elle est supposée être instantanée ; 2a. elle a une portée arbitrairement longue ; 2b. son effet ne décroît pas avec la distance ; 3. elle est individuée ; 4. elle permet de transmettre des messages. En fait, c'est de la magie ! Aucun phénomène physique ne peut satisfaire simultanément ces quatre propriétés, sinon il serait possible d'envoyer des messages dans son propre passé ! Deux exemples : 1) la gravitation newtonienne vérifie les propriétés 1, 2a et 4, : la force de gravitation universelle dépend en effet instantanément, à chaque instant, de la distribution des masses de tout l'univers ; 2) la physique post-newtonienne - fondée sur l'idée de champs (électromagnétique ou gravitationnel) " se propageant dans le vide" - conserve, elle, les propriétés 2a et 4, mais pas la propriété 1.

Existe-t-il alors des phénomènes ayant simultanément les propriétés 1, 2a, 2b. et 3 ? C'est ce que J. Bricmont va essayer de montrer dans la suite de son exposé.

### Une introduction imagée aux situations E.P.R. et aux inégalités de Bell

Quelles conclusions peut-on déduire d'éventuelles corrélations entre les réponses données à des questions identiques, posées à des personnes, lesquelles ne peuvent s'échanger aucun message ? Jean Bricmont imagine une expérience dans laquelle deux personnes X et Y se dirigent l'une vers la porte A, l'autre vers la porte B. Quand elles arrivent aux portes, on leur pose des questions

numérotées 1, 2 et 3. Il n'y a chaque fois que deux réponses possibles : oui ou non. Cette expérience est répétée un grand nombre de fois.

Dans une première version de cette succession d'expériences, la même question est posée aux deux personnes parvenues respectivement en A et B. Cette question est indifféremment 1, 2 ou 3, et peut changer d'une expérience à l'autre. Le résultat observé est le suivant : à question identique, X et Y, pourtant éloignés, donnent la même réponse. Bien entendu il s'agit d'un résultat *imaginé*, dont nous savons cependant qu'il correspond à la réalité quantique des "situations EPR". Les seules explications possibles à cette corrélation parfaite sont les suivantes :

1. X et Y échangent des messages, l'un communiquant à l'autre la réponse qu'il a faite ; si l'intervalle entre les deux questionnements est suffisamment court, ils doivent le faire de façon instantanée, ou du moins dans un temps plus court que celui mis par la lumière pour franchir la distance entre A et B !
2. les réponses sont "prédéterminées" lorsque les deux personnes se quittent : soit parce qu'elles se sont concertées sur la réponse à donner à chacune des trois questions, soit parce que cette réponse s'impose d'elle-même dans leur esprit, par "l'état de la nature" à cet instant.

Si l'on refuse "l'action à distance" (explication 1), on doit se rabattre sur l'existence d'une prédétermination par des éléments qui correspondent exactement à ce qu'on appelle des variables cachées. C'est l'argument utilisé par Einstein, Podolski et Rosen en 1935, pour conclure à l'incomplétude de la physique quantique.

Dans une seconde version, on pose aux deux personnes, toujours parvenues aux portes A et B, des questions différentes ; par exemple, question 1 en A et question 3 en B.

Le raisonnement part de l'hypothèse qu'à chaque expérience, les réponses "justes" (celles qu'il faut faire) aux trois questions sont parfaitement déterminées par l'état de la nature et qu'elles s'imposent à l'esprit des futurs interrogés : par exemple [1 : Oui - 2 : Non - 3 : Oui] pour une expérience, [1 : Non - 2 : Non - 3 : Non] pour la suivante, etc. On s'interroge alors sur la fréquence des occurrences de réponses *identiques* ; par exemple [1 : Oui - 3 : Oui] ou bien [1 : Non - 3 : Non] ; cette fréquence est mesurée sur un grand nombre d'expériences répétées, sachant également que les couples de questions posées varient à chaque fois.

Un calcul simple montre : a) qu'il y a huit configurations possibles de réponses justes, dit autrement huit "états" de la nature différents ; b) que la probabilité que les réponses au couple de questions 1 et 3 soient identiques est de 0.5 ; c) donc que la somme des probabilités de réponses identiques aux trois couples - 1 et 2, 1 et 3, 2 et 3 - est donc de 1.5. Cette somme est supérieure à 1.

### Retour à la réalité quantique : la violation des inégalités de Bell

Quelles conclusions devraient-on tirer de ces statistiques, si elles conduisaient à une somme des probabilités inférieure à 1 ? Tel est le genre de problème posé par le physicien John Stewart Bell

en 1964, en analysant les résultats de certaines expériences quantiques ; ces expériences se ramènent formellement à celles, imaginaires, que Jean Bricmont vient de présenter (moyennant cependant quelques ajustements sans importance pour le propos) ; le couple des personnes X et Y devient une paire de particules "intriquées" ; les portes A et B, des instruments de mesures distants ; les questions, des actes de mesures de spin dans différentes directions spatiales (1,2,3) ; enfin, les réponses, des valeurs mesurées, par exemple [1 : Oui] devient ce qui a été noté  $1\uparrow$ , etc.

Dans ces expériences quantiques, on *observe* que la somme des probabilités de réponses identiques aux trois "mesures" peut être effectivement inférieure à 1, par exemple égale à  $3/4$ . On dit alors que les statistiques sur les mesures faites lors de ces expériences "violent les inégalités de Bell". Il faut d'emblée noter que le formalisme quantique (états *de la paire de particules* comme vecteurs d'un espace de Hilbert) rend cohérent ces résultats, pour surprenants qu'ils puissent paraître. Comme il l'a fait pour l'interférence, Jean Bricmont nous en initie d'ailleurs l'approche mathématique : état intriqué s'exprimant indifféremment - dans le cas présenté - par les combinaisons linéaires  $1/\sqrt{2} (|1\uparrow\rangle |1\downarrow\rangle - |1\downarrow\rangle |1\uparrow\rangle)$ ,  $1/\sqrt{2} (|2\uparrow\rangle |2\downarrow\rangle - |2\downarrow\rangle |2\uparrow\rangle)$ ,  $1/\sqrt{2} (|3\uparrow\rangle |3\downarrow\rangle - |3\downarrow\rangle |3\uparrow\rangle)$ , et réduction de ces états lors des mesures.

### Mais alors, l'action à distance serait elle-possible ?

Le point important concerne l'interprétation des résultats : la violation des inégalités de Bell contredit manifestement l'hypothèse que les réponses soient prédéterminées, autrement dit que les valeurs mesurées soient préexistantes aux actes de mesure. On est alors obligé de faire face à ces deux constatations :

1. La présence de corrélations parfaites (entre les réponses à une même question) et le rejet de l'action à distance - autrement appelé *hypothèse de localité* - impliquent des valeurs préexistantes (Argument EPR)
2. La violation des inégalités de Bell, dans les statistiques faites sur les réponses données à des questions différentes, impliquent l'impossibilité de telles valeurs préexistantes (Argument Bell)

On déduit logiquement qu'une des prémisses de l'argument EPR est fautive ; puisque les corrélations parfaites sont réellement observées, l'hypothèse de localité doit nécessairement être rejetée.

Autrement dit, et pour résumer cette partie,

*Une première conclusion* : un rôle apparemment essentiel de la "mesure", laquelle ne peut pas être comprise de façon naïve comme mesure d'une propriété préexistante.

*Une seconde conclusion* : 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.

Il en découle deux questions : peut-on se débarrasser de la non-localité ? NON ! Peut-on cependant se débarrasser de "l'anthropocentrisme", c'est-à-dire du caractère central, irréductible et fondamental de la mesure ? Bricmont pense que OUI !

### Que faire des deux conclusions ? la théorie de De Broglie-Bohm

La justification de ces positions se trouve pour notre conférencier dans la théorie de de Broglie-Bohm, qui est désignée dans la suite par théorie *dBB*. De Broglie l'a introduite en 1927, mais de façon peu élaborée, et lui-même n'y croyait pas complètement. Elle a été reformulée par Bohm en 1952 et popularisée par Bell.

D'emblée, Jean Bricmont énonce les caractéristiques de cette théorie : c'est une théorie de "variables cachées", mais qui ne sont nullement cachées. Elle élimine complètement le rôle de l'observateur. **Elle n'est pas réfutée par les théorèmes sur les variables cachées ! Elle rend compte de toutes les expériences justifiant la mécanique quantique. Elle 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. Elle explique, dans la mesure où c'est possible, la non-localité.**

#### De Broglie-Bohm : état d'un système

Jean Bricmont introduit le formalisme en prenant l'exemple d'un système de N particules sans spin. L'état d'un tel système est dans cette approche l'état quantique habituel (fonction d'onde  $\Psi$ ), *complété par la donnée des positions des particules*. Ces positions  $X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_N$  existent en effet, dans cette théorie, indépendamment du fait qu'on les "regarde" ou qu'on les "mesure". La fonction d'onde reste sous sa forme classique, une fonction associant une valeur complexe à chaque point de l'espace de configuration :  $\Psi(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N)$

#### Evolution temporelle

L'évolution temporelle de la fonction d'onde  $\Psi(t, x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$  est donnée par l'équation de Schrödinger pour tous les temps et en toutes circonstances, *que l'on "mesure" quelque chose ou non*. La nouveauté est que chaque particule  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) suit au cours du temps une trajectoire bien définie  $X_k(t)$  ; cette trajectoire est déterminée par la fonction d'onde : plus précisément, la dérivée temporelle de  $X_k(t)$  - autrement dit la vitesse et la direction prise par la particule  $k$  - est égale à chaque instant au gradient en  $x_k = X_k(t)$  de la *phase* de la fonction d'onde.

$$\Psi(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N) = R(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N) \exp[iS(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N)]$$

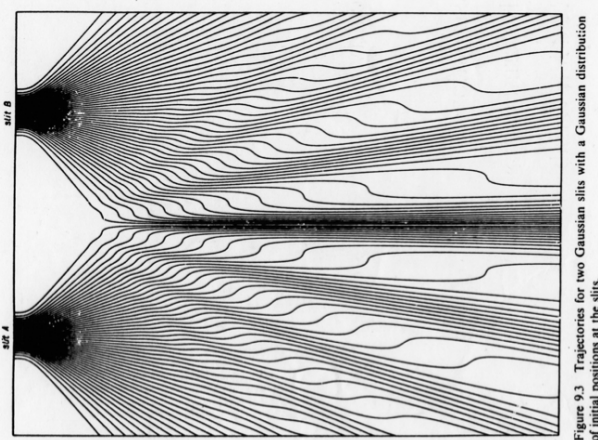
$$\frac{d}{dt} X_k(t) = \frac{\hbar}{m} \nabla_k S(t, x_1 = X_1(t), x_2 = X_2(t), \dots, x_k = X_k(t), \dots, x_N = X_N(t))$$

C'est ainsi que la fonction d'onde guide chaque particule. L'équation liant la vitesse de la particule -  $dX/dt$  - au gradient de  $S$  et à la masse  $m$  de la particule est appelée *l'équation pilote*.

La fonction  $S$ , partie imaginaire du logarithme de la fonction d'onde, opère un peu comme l'hamiltonien en mécanique classique. Ce dernier est aussi défini partout (sur l'espace de phase) et détermine le mouvement des particules, là où elles se trouvent. Jean Bricmont illustre cette analogie par quelques exemples.

### L'expérience des fentes de Young réinterprétées par de Broglie-Bohm

Il prend d'abord l'expérience des deux trous (fentes de Young). On sait que l'on observe obtient sur un écran des franges d'interférence. La solution numérique de la dynamique de de Broglie-Bohm - c'est-à-dire de l'équation de Schrödinger associée à l'équation pilote - reproduit parfaitement, dans ce contexte, les franges d'interférences observées. Mais elle produit, en plus, *le faisceau des trajectoires suivies par les particules*, puisque ces particules et ces trajectoires sont censées exister "réellement" et individuellement dans cette théorie.



Jean Bricmont nous montre une image très frappante du résultat d'une telle solution numérique. Nous la reproduisons ici. On y remarque les franges d'interférences, mais aussi une "ligne nodale", partageant en deux le faisceau des trajectoires, si bien qu'*aucune particule ne la traverse*. La forme et la position de cette ligne nodale résultent de la symétrie d'ensemble du dispositif, et donc de celle de la fonction d'onde.

Des expériences ont-elles été conduites, dont le résultat évoquerait une telle figure ? Jean Bricmont en mentionne une, parue dans Science (Science 332, n° 6034 (2011), 1179-1173). Dans cette expérience, des "trajectoires" sont reconstituées à l'aide de la technique dite "des mesures faibles". La figure présentée par le conférencier montre effectivement une certaine analogie avec la première : ligne modale infranchie et resserrement des trajectoires, conduisant aux franges d'interférences.

Jean Bricmont nous donne alors avec malice deux citations, montrant clairement les oppositions de points de vue à propos de ces expériences :

[Landau et Lifshitz](#) : *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.*

[J. Bell](#) : *N'est-il pas évident, étant donné la petitesse des scintillations sur l'écran, que nous avons à faire 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 seulement par un des trous de l'écran, ne pouvait-il pas être influencé par des ondes se propageant à travers les deux trous. Et ne*

*pouvait-il pas être influencé d'une façon telle, que la particule ne va pas là où les ondes s'annulent, mais est attirée là 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.*

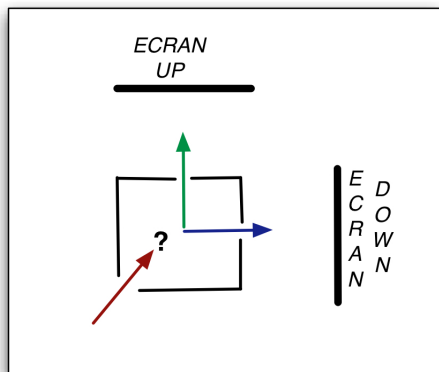
Jean Bricmont expose ensuite quelques unes des propriétés de la théorie, propriétés qui font selon lui de cette théorie une interprétation convaincante des résultats de la physique quantique.

### L'équivariance

Cette propriété explique l'accord avec les prédictions quantiques usuelles. Le couple équation de Schrödinger/équation pilote garantit en particulier que le champ de densité (observé) d'un nuage de particules coïncide à *tout instant*, avec le champ de probabilité déduit du carré de la fonction d'onde ; ceci, à la condition bien sûr que cette coïncidence soit vérifiée à l'instant initial. La probabilité effective de trouver une particule à un endroit donné reste celle donnée par le formalisme quantique habituel.

### Indéterminations de la mesure du spin.

Jean Bricmont souligne un point majeur dans l'argumentation : la mesure du spin, dans une direction donnée, s'effectue concrètement par la détection d'un impact sur l'un des écrans placés en face des sorties de l'appareil. Autrement dit, dans l'esprit de la théorie *dB*, par la *détection de l'issue d'une trajectoire*. Ici encore, la fonction d'onde induit, par la symétrie de l'appareil et la présence des deux sorties, une ligne nodale infranchissable. Cette ligne sépare en deux le faisceau des trajectoires suivies par les particules, les unes aboutissant à la sortie  $\uparrow$ , les autres à la sortie  $\downarrow$ . L'indétermination de la mesure perd son mystère : elle prend son origine dans les légères différences de positions que les particules ont en entrée du dispositif, de part et d'autre du départ de la ligne



nodale

Jean Bricmont reprend ensuite les expériences décrites au début de son exposé (perte de mémoire d'une préparation initiale, puis, à l'inverse, interférences conservant l'état existant à l'entrée du dispositif). Il en interprète les résultats par les mêmes mécanismes associant la superposition d'ondes associées respectivement aux divers chemins ouverts, et l'équation pilote guidant les trajectoires.

### Du statut de la fonction d'onde et des différentes mesures

Dans la théorie *dB*, l'onde (de la fonction d'onde) n'est pas seulement une "onde de probabilité", un outil efficace de prédiction probabiliste. C'est un champ *ayant une réelle existence physique*, assumant le rôle de pilotage des particules.

Jean Bricmont explique ensuite comment la théorie *dBB* rend compte "naturellement" du rôle actif de l'instrument de mesure. Il reprend, pour ce faire, l'exemple de la mesure du spin dans Stern et Gerlach et considère deux particules, situées à l'entrée de l'appareil dans la *même* position spatiale par rapport à la ligne nodale, par exemple dans la partie supérieure. Ces deux particules vont donc, en sortie, impacter le *même écran détecteur*. Mais si - entre le passage des deux particules - l'orientation du champ magnétique a été inversée, les spins, respectivement observés pour ces particules, seront opposés, puisque par définition le spin  $\uparrow$  est attribué à la particule sortant dans le sens du champ et le spin  $\downarrow$ , dans le sens inverse.

### Non localité

Le conférencier montre également que la théorie *dBB* est naturellement *non-locale*. Il considère un système de deux particules distantes 1 et 2, donc pilotées par une fonction d'onde  $\Psi(t, x_1, x_2)$  ; A l'instant  $t$ , on effectue une mesure sur la particule 1, alors positionnée en  $x_1=X_1$ . Cette mesure s'effectue par l'interaction avec un potentiel localisé, un champ magnétique par exemple ; ce potentiel, à travers l'équation de Schrödinger, modifie *instantanément* (?) la fonction d'onde pour toutes les valeurs de  $x_1, x_2$  (c'est-à-dire sur la totalité de l'espace de configuration). Le mouvement de la particule 2, positionnée en  $X_2$  en sera lui aussi immédiatement affecté à travers l'équation pilote. (Remarque : cette présentation de la non-localité, à la relire rétrospectivement, doit être incomplète, car pourquoi la modification de la fonction d'onde, à travers Schrödinger, serait elle instantanée ?)

### Pour terminer, un plaidoyer pour *dBB*

La théorie *dBB* échappe ainsi, selon notre conférencier, aux différents théorèmes d'impossibilité sur les variables cachées. Les seules variables cachées mobilisées sont les positions des particules. La théorie *dBB* est une théorie de la matière en mouvement. Aucun argument n'a été avancé pour montrer que l'introduction de ces variables-là était impossible. Bell affirme seulement qu'il est impossible, par exemple, d'introduire des variables cachées de spin. C'est à cette impossibilité que les discours sur la "disparition du réel" font allusion, mais il en va autrement pour les positions.

Supposer que ces variables de spin doivent nécessairement exister avant la "mesure" revient à faire preuve de réalisme naïf et à négliger le rôle "actif" de l'appareil de mesure. C'est un des grands mérites de la théorie *dBB* que de montrer explicitement pourquoi ces autres variables cachées ne peuvent pas exister et pourquoi, conformément à l'intuition de Bohr, leur valeur est "déterminée" par la mesure. Néanmoins, à la différence de Bohr, on n'a pas affaire ici à un postulat imposé de l'extérieur, mais bien à une conséquence des équations de la théorie.

L'introduction des "variables cachées" (c'est-à-dire simplement les positions des particules), est une théorie parfaitement développée, qui rend compte de tous les faits expérimentaux de la mécanique quantique non-relativiste. Bien que ce soit en partie une question de goût, la théorie *dBB* est aussi naturelle et élégante que n'importe quelle autre théorie fondamentale en physique. Aucun problème d'inconsistance ou de subjectivisme ne subsiste, et la fonction d'onde acquiert une signification physique bien précise.



Pour résumer, Jean Bricmont considère que la mécanique quantique ordinaire est simplement la théorie *dBB* tronquée, tronquée en ce sens qu'elle oublie la "matérialité" des particules et de leurs trajectoires. Mais cet oubli n'a pas (ou peu ?) de conséquences pratiques. Ainsi, comme le souligne ironiquement Bricmont, si la théorie *dBB* n'avait pas le mérite d'apporter des clarifications d'interprétation, elle n'aurait aucune utilité !

### Et pour finir, trois citations.

Bricmont termine par deux citations de Bell et celle d'une jeune étudiante italienne, V. Allori.

**J.S. Bell** : *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 non relativiste, 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'.*

*Mais alors pourquoi Born ne m'avait pas parlé de cette 'onde-pilote' ? Ne serait-ce que pour signaler ce qu'elle avait d'erronée ? 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 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 imposés de force par des faits expérimentaux, mais par un choix théorique délibéré ?*

**V. Allori** : *Ce qui m'a toujours intéressée 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.*

## La Discussion

A la suite de l'exposé, une riche discussion a eu lieu. Nous la reprenons ici dans l'ordre des interventions.

Claude ELBAZ : Vous avez décrit d'une part des expériences, d'autre part vous avez donné des explications théoriques. Les résultats sont-ils limités aux laboratoires ou est-ce qu'ils nous touchent tous? Pourquoi avoir choisi dans les expériences le spin qui est fondamentalement quantique ?

Jean BRICMONT : La théorie quantique est considérée comme la base de toutes les théories physiques, y compris les théories classiques.

Gilles COHEN-TANNOUDJI: Finalement , l'interprétation de de Broglie-Bohm est-elle validée ou invalidée par le résultat des expériences d'Aspect ?

Jean BRICMONT: Elle est validée par les expériences d'Aspect. En effet, le raisonnement EPR-Bell implique l'existence d'effets non locaux. L'interprétation *dBB* a l'avantage de rendre explicite cette non localité.

Gilles COHEN-TANNOUDJI: Donc, elle vérifie que les inégalités de Bell sont violées.

Jean BRICMONT: Oui, bien sûr. Parce que les prédictions sont les mêmes qu'en mécanique quantique. Notez que lors d'un séminaire à l'IHES, Aspect a dit qu'il était plus ou moins d'accord avec ma présentation sur les inégalités de Bell.

Gilles COHEN-TANNOUDJI: Le livre de Georges sur les 60 ans de de Broglie contient une contribution très importante de Pauli. Selon cette contribution, l'interprétation *dBB* conduit à d'énormes difficultés, énormes en statistique quantique.

Jean BRICMONT: Oui, je connais ce point de vue. Pauli l'affirme, mais il ne se rend pas compte qu'il y a une façon tout à fait cohérente de comprendre pourquoi l'identité des distributions de densité et de probabilités en  $\psi$  carré peut se conserver au cours du temps (c'est l'équivariance dont j'ai parlé). Il n'y a pas moyen de faire ce que Pauli suggère, c'est-à-dire séparer deux ensembles distincts qui auraient des distributions différentes. Pauli ne pouvait pas le savoir à l'époque ; mais dans la théorie *dBB*, c'est parfaitement clair. C'est un peu technique, mais j'explique cela plus en détail dans un livre que je viens d'écrire et qui doit sortir bientôt.

Michel GONDRAN: As-tu une explication du grand mystère de Bell : pourquoi la théorie *dBB* n'est-elle pas enseignée? pourquoi n'est-elle pas considérée?

Jean BRICMONT: J'ai tout un chapitre la-dessus. Il y a plusieurs aspects. Par exemple, dans l'article de Pauli, et que j'ai revu il y a quelques jours, les gens lorsqu'ils le lisent ne se posent pas de questions, car ils ont au départ la vue implicite, et non la vue orthodoxe. Une description complète est tout ce que l'on peut connaître, ce n'est pas ce qui est. Il y a toujours eu un malentendu entre Einstein et Bohr. Et quand Einstein est venu avec l'argument EPR, il a été universellement non compris, sauf par Schrödinger. Et la discussion était confuse. C'était avant guerre. Après la guerre, il y a eu un déplacement de la physique de l'Europe vers les Etats Unis, ainsi qu'un changement de mentalité. Il y a eu alors cette éthique : tais toi et calcule. ce changement était très prégnant. Je l'ai connu étant étudiant.

les gens ont alors décidé ( j'ai par exemple le témoignage de John Clauser là-dessus) que tous ceux qui se posaient des questions, de Broglie, Einstein, Bohm, Schrödinger étaient séniles (Bohm était marginalisé pour des raisons politiques, mais les 3 autres étaient considérés comme séniles) et n'avaient rien compris. L'idée principale, c'est que Bohr avait tout résolu. C'était la réponse aux questions des étudiants. C'était cette mentalité. Alors quand Bell est venu en 1964 avec son résultat, on ne lui a pas prêté attention, car il montre qu'il n'y a pas de variables cachées; et cela on le savait depuis longtemps. On avait oublié la partie EPR de l'argument, qui implique la non localité. Bell n'a pas été compris. On rejette aussi Bohm, dont la théorie est pourtant non-locale. Bohm a été complètement marginalisé pour des raisons politiques : il a été une victime du Maccartisme ; Il a du quitter les Etats Unis, se réfugier au Brésil, etc.. Le seul qui a bien défendu sa théorie, mais de façon un peu discrète, c'est Bell. Au CERN où il travaillait, ce n'était pas populaire d'en parler, alors il n'en parlait pas. Il disait : je suis un ingénieur quantique, mais le dimanche, j'ai des principes. Le livre le plus intéressant, c'est son livre "Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics". C'est un livre étonnant, où Bell défend constamment la théorie  $dBB$  ; cependant les commentaires sur Bell affirment que selon lui,  $dBB$  est impossible. Si des gens peuvent croire que le meilleur défenseur de cette théorie a démontré qu'elle était impossible, c'est un grand malentendu. On ne devrait pas faire le procès de quelqu'un, quand on n'a pas les données et que l'on se trompe sur ce qu'il a dit. Et pourtant, c'est ce qui se passe.

Quant il s'agit d'Einstein et de Bohr, il suffit de lire les textes pour comprendre qu'il y a incompréhension, comme avec Bell et Bohm. Encore maintenant. Il y a un problème philosophique et psychologique très profond qui est le résultat d'une histoire complexe.

Claude ELBAZ : A la base de la théorie de de Broglie-Bohm, il y a la dualité onde-corpuscule. De Broglie l'explique par son onde pilote.

Jean BRICMONT : Oui, c'est l'équation que j'ai donnée.

Claude ELBAZ : Dans toutes vos expériences, on a une particule au début, une particule à la fin; mais entre temps, on ne sait pas ce qui se passe.

Jean BRICMONT : Si, la théorie nous décrit de manière continue ce qui se passe. La fonction d'onde et les particules évoluent continuellement.

Gilles COHEN-TANNOUDJI : A propos du même livre, il y a un article de Schrödinger ; pour résoudre tous les problèmes de la mécanique quantique, il y a deux aspects : la non-individualité des particules et ce qu'il appelle la seconde quantification. Qu'est-ce que vous en pensez?

Jean BRICMONT : Je n'ai pas cet article en tête comme l'autre. La non-individualité, c'est la même chose que la non-localité : c'est le fait que la fonction d'onde est définie dans l'espace de configuration et non dans l'espace usuel.

Gilles COHEN-TANNOUDJI : là, je suis d'accord ; Mais, dans une désintégration bêta, l'électron ne préexiste pas; Et dans la physique actuelle, les particules n'ont pas d'individualité. les particules peuvent disparaître, se créer, etc...Les fondements de la théorie quantique doivent se prolonger dans la théorie quantique des champs. Claude ELBAZ fait une remarque allant dans le même sens : tout l'exposé se situe dans le cadre de la mécanique quantique non relativiste. La théorie quantique des champs ne change t-elle pas la perspective, avec le mécanisme de création-annihilation ?

Jean BRICMONT : Il existe une version Bohmienne de la théorie quantique des champs avec création et annihilation de particules. Cela était déjà développé par Bohm ; il y a beaucoup de références là-dessus. Ces théories ne sont pas très bien définies mathématiquement et nécessitent un cut-off , mais c'est aussi nécessaire pour les autres théories des champs. Je n'en ai pas parlé dans mon exposé, car je me suis restreint au cas non-relativiste pour me concentrer sur les fondements.

Michel GONDRAN : Il "suffit" en effet de rajouter à la théorie de base (de de Broglie-Bohm) des opérateurs de création et d'annihilation, comme on le fait en théorie quantique des champs.

Victor MASTRANGELO : Vous avez parlé tout à l'heure de mesures indirectes de trajectoires.

Jean BRICMONT: C'est un peu complexe. Il s'agit de mesures dites faibles qui ne mènent pas à des réductions de fonction d'onde, mais qui ne donnent pas non plus de positions très précises. Lorsque l'on fait une mesure faible, on fait ensuite une mesure forte ; On le fait très souvent et on obtient alors une statistique qui donne une position pour la position faible et une juste après pour la position forte. Avec ces deux positions et un intervalle de temps, on peut déduire une vitesse. En le faisant de nombreuses fois, on obtient un champ de vecteurs, et par intégration on obtient la figure de l'article Science 2011. Dans cet exemple, cela est fait avec des photons. On dit en général que l'on ne peut pas mesurer des trajectoires ; cet exemple montre que des mesures indirectes sont possibles.