

Collège de physique et de philosophie
Séance du 24 septembre 2012

Bernard d'Espagnat. Je n'ai pas besoin de vous présenter Pierre Hohenberg, grand spécialiste de la mécanique statistique quantique, que vous connaissez tous au moins de nom si ce n'est davantage. Il nous parlera de sujets qui nous intéressent ici et qui ont une portée philosophique. Le titre de son exposé est « le réalisme quantique ».

Section I – Exposé par Pierre HOHENBERG

Pierre Hohenberg. Je vous remercie. Cela me fait plaisir de participer à ce séminaire en petit comité informel.

Je commencerai par quelques définitions, car beaucoup de discussions et de débats dans ce domaine — et Dieu sait qu'ils sont nombreux — résultent simplement de malentendus ou d'imprécision sur la définition des termes. Ensuite, je parlerai brièvement de la mécanique classique comme exemple de ce que, pour ma part, j'appelle le réalisme. Puis, je décrirai ce que je qualifie d'énigme fondamentale de la mécanique quantique. Pourquoi ne peut-on pas simplement passer de la mécanique classique telle que je la décris de façon réaliste à la mécanique quantique ? Je décrirai ensuite une formulation réaliste de la mécanique quantique, qui est une version de la théorie de Griffiths, des histoires soi-disant consistantes, que j'appelle CQT. Cela vient de « *consistent quantum theory* », mais je souhaite que l'on oublie les mots pour retenir simplement le terme CQT. Par la suite, je ferai un contraste avec les autres formulations qui existent sur le marché, que vous connaissez, et les décrirai du point de vue que j'ai élaboré. Enfin, si j'ai le temps, j'essayerai de répondre aux 17 questions, que vous connaissez peut-être, de Maximilian Schlosshauer. Il a publié un livre ayant interviewé 17 spécialistes des fondements de la mécanique quantique et leur a posé 17 questions. Il y a donc 17x17 réponses.

Bernard d'Espagnat. Nous nous permettrons d'ajouter quelques questions encore !

Pierre Hohenberg. Si j'ai le temps, je mentionnerai mes 17 réponses.

1. Définition

Ce que j'appelle les fondements (*foundations*) de la mécanique quantique revient simplement à formuler la théorie de telle sorte qu'elle soit compréhensible. Qu'est-ce que la théorie ? Ceci vient en contraste avec deux autres types de questions qui sont souvent mélangées. La première est la validité de la théorie : est-ce que la théorie est vraie ? D'autre part, quelles sont les conséquences de la théorie sur la philosophie, la physique, etc. ? Ces trois types de questions sont souvent appelés les fondements de la mécanique quantique. J'aimerais en tirer la partie qui, à mon avis, est probablement la plus simple, qui consiste simplement à formuler la théorie, à voir de quoi il s'agit. L'ayant formulée, on passe à autre chose.

Je crois qu'il est utile d'identifier les deux grands courants de formulation. L'un de ces courants est ce que j'appelle l'opérationnalisme — en fait, c'est Copenhague. L'autre, par contraste, est le réalisme. Par ces mots, je ne veux dire qu'une chose : c'est une caractéristique de la formulation de la théorie. Ce n'est pas un point de vue philosophique sur la nature, la physique ou autre. Simplement, la formulation est ou bien opérationnaliste, ou bien réaliste. Voici ce que cela signifie. Dans une formulation réaliste, pour un système S on n'emploie que des concepts qui se réfèrent à S lui-même. Dans une formulation opérationnaliste, cela ne suffit pas : il est nécessaire d'employer des concepts extérieurs à S. C'est tout ce que j'entends par cette distinction. Ces concepts extérieurs sont ou bien un observateur, ou bien un appareil de mesure, un agent, une information — quelque chose d'extérieur à S. Le point important pour l'opérationnalisme est que ceci est nécessaire. Les concepts se référant à S sont insuffisants.

Pour une formulation réaliste, je distingue :

- ce que j'appelle l'ontologie : ce sont simplement les objets dans S qui caractérisent le système, ce que Bell appelle les « *beables* », les « existables », en contraste avec les observables. Pour la théorie opérationnaliste, les éléments de S sont des « observables ». Mais dans une théorie réaliste l'on n'a pas d'observateur ; donc, ce sont les « existables » de la théorie ;
- ce que j'appelle l'épistémologie, mot un peu pompeux pour désigner simplement les prédictions de la théorie qui se réfèrent aux existables, aux éléments de l'ontologie.

La formulation opérationnaliste n'a pas une ontologie indépendante pour S, c'est évident.

2. La mécanique classique comme exemple de formulation réaliste

La mécanique classique est un exemple idéal de ce que j'appelle une formulation réaliste. L'ontologie est l'espace des phases. Je souhaite la formuler d'une façon un peu abstraite, qui sera utile pour le passage à la mécanique quantique. Je distingue les états (que j'appelle aussi états dynamiques), qui sont

les points de l'espace des phases, et les propriétés qui sont des sous-espaces de l'espace des phases. Je distingue les états et les propriétés parce qu'on peut formuler l'épistémologie de façon simple : si l'on a un état à un temps $t = 0$, l'épistémologie est simplement la trajectoire à t négatif ou t positif du système à travers l'espace des phases.

En ce qui concerne les propriétés, on peut exprimer l'épistémologie en termes de théorie des ensembles ou de logique, par l'affirmation selon laquelle l'état dynamique confère une valeur vérité aux propriétés. En effet, étant donné un état dynamique représenté par un point x , nous pouvons définir une fonction vérité T_x qui a pour domaine les propriétés du système et pour valeurs ou bien 1 ou bien 0 (vrai ou faux). Une propriété est vraie si le point x représentant l'état est dans le sous-ensemble correspondant à la propriété. Une propriété est fautive si le point x n'est pas dans le sous-ensemble correspondant à la propriété.

On peut se représenter l'évolution dynamique comme l'évolution de cette fonction de vérité sur ce qu'on appelle le réseau, l'ensemble, des propriétés. C'est un peu compliqué, mais cela aboutit à l'idée que toute la mécanique classique peut s'exprimer en théorie des ensembles, en logique des fonctions de vérité (ce sont des objets de logique) et en algèbre, parce qu'on peut définir des opérateurs sur les propriétés, des opérateurs de projection. Il y a donc une équivalence entre la théorie des ensembles — les ensembles qui s'unissent par intersection, union et complément —, la logique — les propositions logiques qui s'unissent par disjonction, conjonction, négation — et l'algèbre des opérateurs de projection.

La première généralisation de la mécanique classique déterministe est bien la mécanique statistique classique, obtenue par le remplacement de l'état dynamique unique par un ensemble de points ayant une densité de probabilité initiale $\rho_0(x)$. La fonction de vérité est à son tour remplacée par une distribution de probabilités des diverses propriétés. La condition de Kolmogorov est simplement une expression d'une condition très simple de la théorie des ensembles, qui correspond à la loi de distributivité de la logique classique.

Se pose maintenant la question suivante : dans ce langage de théorie des ensembles et de logique, comment formuler la mécanique quantique ? Nous savons déjà que les fonctions de vérité, probablement, ne survivront pas. Peut-on, comme nous l'avons fait en mécanique statistique classique, simplement remplacer les fonctions de vérité par des fonctions (ou distributions) de probabilité ? Après tout la fonction de vérité est simplement un cas spécial d'une fonction de probabilité qui n'a que deux valeurs, 0 et 1. Nous allons voir qu'en général ce simple remplacement ne marche pas, si l'on veut respecter l'ontologie quantique de l'espace de Hilbert.

3. L'énigme fondamentale de la mécanique quantique

Avant d'aborder la question générale, essayons d'attacher aux propriétés quantiques une valeur vérité, comme en mécanique classique. Nous allons voir que cette tentative nous amène à ce que j'appelle l'énigme fondamentale de la mécanique quantique. C'est très élémentaire, mais important. On peut l'expliquer sur le système quantique le plus simple, un spin- $1/2$. C'est un espace de Hilbert de deux dimensions. Désignons par $[S_x +]$ le projecteur, l'opérateur de projection sur la propriété $S_x = +1/2$. Dire $[S_x +]$ équivaut à dire que la proposition logique $S_x = +1/2$ est vraie. C'est la proposition logique qui se réfère au sous-espace qui est la propriété.

Edouard Brézin. Je veux être sûr de comprendre les mots. Cet état $[S_x +]$ est ce que nous notons habituellement par le ket de Dirac.

Pierre Hohenberg. Oui. Mais ici il ne s'agit pas d'un état dynamique, mais plutôt de la propriété $[S_x +]$.

Edouard Brézin. La proposition est que si je mesure dans cet état $[S_x +]$...

Pierre Hohenberg. Non, je ne parle pas de mesure. Je dis simplement que la propriété $[S_x +]$ est vraie. Il s'agit d'une caractéristique intrinsèque de la propriété, sans référence à une mesure extérieure.

Edouard Brézin. Le système est dans cet état. Nous savons qu'il est dans cet état.

Roger Balian. Nous le savons parce que Pierre veut être réaliste : il a éliminé l'observateur et l'appareil de mesure.

Edouard Brézin. Vous dites en somme que le système, lui, sait dans quel état il est, même si nous ne le savons pas.

Pierre Hohenberg. Je ne sais pas ce que ces mots veulent dire. Ce que j'essaie de faire pour le moment c'est d'associer une valeur vérité à une propriété, mais rassurez-vous, je n'y arriverai pas.

Pierre Hohenberg. La mécanique quantique nous dit que pour n'importe quelle direction i , la valeur de S_i est ou bien $+1/2$ ou bien $-1/2$. Donc, $[S_{i+}]$ **ou** $[S_{i-}]$ est vrai, parce que pour n'importe quel i , c'est toujours ou bien plus ou bien moins. Cela ne peut pas être autre chose. De même, $[S_i]$ **et** $[S_j]$ est faux dès que i et j sont différents.

- (a) $[S_{i+}]$ ou $[S_{i-}]$ est V pour tous i
- (b) $[S_{i\pm}]$ et $[S_{j\pm}]$ est F pour tous $i \neq j$

($V = \text{vrai}$, $F = \text{faux}$).

Telles sont les affirmations de la mécanique quantique, que tout le monde connaît. D'un autre côté, la logique classique donne une loi de distributivité, bien connue, qui s'exprime ainsi :

(c) $(S_i \text{ et } S_k) \text{ ou } (S_j \text{ et } S_k) = (S_i \text{ ou } S_j) \text{ et } S_k$ quels que soient les indices i, j et k .

De celle-ci l'on déduit aisément, toujours en logique classique, qu'entre quatre propositions S_i, S_j, S_k et S_m il existe une loi de distributivité plus générale que, après identification des indices i, j, k, m à, respectivement, $x+, x-, z+$ et $z-$, on peut écrire:

$$([S_{x+}] \text{ et } [S_{z+}]) \text{ ou } ([S_{x-}] \text{ et } [S_{z+}]) \text{ ou } ([S_{x+}] \text{ et } [S_{z-}]) \text{ ou } ([S_{x-}] \text{ et } [S_{z-}]) = \\ = ([S_{x+}] \text{ ou } [S_{x-}]) \text{ et } ([S_{z+}] \text{ ou } [S_{z-}])$$

Dans le cadre de la logique classique cette identité s'impose. En revanche on voit immédiatement que dans le cadre du formalisme quantique standard elle est erronée. En effet selon ce dernier les propositions figurant entre parenthèses dans son premier membre sont fausses toutes les quatre à cause de (b), ce qui fait que ce premier membre est une proposition fautive, alors que les propositions figurant entre parenthèses dans le second membre sont toutes deux vraies à cause de (a), ce qui fait que ce second membre lui-même est vrai.

En somme, j'ai mis (a), (b) et (c) ensemble et j'ai démontré que vrai = faux. J'en conclus, et c'est là l'énigme - ou le problème fondamental ! - que la mécanique quantique est en contradiction avec la logique classique. Toute « interprétation » (je n'aime pas le mot), toute formulation de la mécanique quantique est une réaction à cette circonstance.

La réaction opérationnaliste à cela consiste à nier l'existence de propriétés intrinsèques, à dire qu'il faut quelque chose d'autre. Elle est de dire que (a) et (b) ne sont pas vraiment vrais, parce que elles prétendaient renvoyer à des propriétés intrinsèques. Mais moi, je ne veux pas l'opérationnalisme. A la suite de Einstein, Bell, etc. je cherche une formulation réaliste. Les formulations réalistes font face à notre énigme, *grosso modo*, de trois façons différentes.

Celle que j'appelle R1 consiste à adopter une ontologie classique. C'est la stratégie ou le choix de Bohm et de Bell, en fait. Pour le spin, par exemple, elle consisterait à dire que son ontologie est toute la sphère classique correspondante : un spin classique peut pointer vers n'importe quel point de cette sphère. Cela implique que (a) n'est pas vrai : La projection du spin selon une direction donnée ne vaut pas nécessairement $+1/2$ ou $-1/2$, entre les deux elle peut prendre n'importe quelle valeur. A ce moment-là, la contradiction disparaît. C'est une ontologie classique mais elle a des conséquences sérieuses si l'on veut néanmoins retrouver les prédictions de la mécanique quantique (voir la discussion des variables cachées dans le 5. ci-dessous).

La deuxième stratégie (R2), est essentiellement celle de Griffiths, des histoires consistantes. Elle dit que S_x et S_z par exemple sont incompatibles. La proposition (b) n'est pas fausse, c'est simplement un mot que l'on n'a pas le droit de dire, une phrase que l'on n'a pas le droit d'exprimer.

Bernard d'Espagnat. Il y a des tribunaux... ?

Pierre Hohenberg. C'est une solution purement linguistique, syntactique. Griffiths se contente de dire que la syntaxe de la mécanique quantique défend (b), et si l'on n'a pas (b) on n'a pas la contradiction non plus. Selon lui (b) est un non-sens, pas quelque chose de faux. Le tribunal, c'est cette syntaxe.

Bernard d'Espagnat. En somme, il dit que (a) est vrai et (b) est vrai, mais qu'on n'a pas le droit de dire que (a) **et** (b) sont vrais.

Pierre Hohenberg. Non, je ne suis pas d'accord. Pour Griffiths, la proposition (b) n'est ni vrai ni fausse, puisque les propriétés $[S_i]$ et $[S_j]$ sont incompatibles pour $i \neq j$.

Une troisième possibilité (R3), appelée « logique quantique », a été introduite par von Neumann et Birkhoff dans les années 30. Ils acceptent (a) et (b) comme étant la mécanique quantique, et ils disent qu'il faut changer la logique. Donc, ils nient la loi de distribution et appellent cela la logique quantique.

Je vais maintenant vous présenter ma version du réalisme quantique. Ce ne sera ni l'un ni l'autre, mais en un certain sens une combinaison de R2 et R3 avec modifications. C'est ce que j'aimerais vous montrer maintenant.

4. CQT

Ma version du réalisme quantique est ce que j'appelle CQT. Cela vient de *consistent quantum theory*, mais les mots ont un intérêt surtout historique. Je préfère parler de *compatible quantum theory*, pour des raisons que je ne vais pas exposer maintenant, mais qui se clarifieront par la suite. CQT est une version de la formulation de Griffiths qui elle, s'appelle « les histoires consistantes ». Le point terminal est le même, mais le chemin intellectuel et la justification sont différents. Ma prétention, et surtout mon espoir, est que cela paraîtra un peu moins arbitraire.

C'est une formulation réaliste, selon ma définition du terme, qui est basée sur une seule hypothèse, que j'appelle l'ontologie de l'espace de Hilbert. La voici. Un système S est représenté uniquement par des éléments dans l'espace

de Hilbert. Les états dynamiques (*q-states*) sont représentés par des vecteurs ou plus précisément des rayons.

Edouard Brézin. A une phase près.

Pierre Hohenberg. Oui, à une phase près. C'est ce qu'on entend par un rayon. En outre, les propriétés (*q-properties*) sont représentées par des sous-espaces de Hilbert, ou de façon équivalente par les projecteurs. $[A] \equiv \text{Proj}(A)$. La propriété A est donc un sous-espace de Hilbert, et $[A]$ est le projecteur sur ce sous-espace.

Ayant ceci comme ontologie, mon épistémologie est contrainte, restreinte. Une fois que j'ai accepté ceci, voici quelle est mon épistémologie. La dynamique est basée sur l'hamiltonien — c'est la mécanique quantique que l'on connaît. Mais les propriétés doivent respecter l'ontologie de Hilbert. Cela veut dire que les opérations que l'on avait faites pour dire que la logique et la théorie des ensembles étaient équivalentes doivent maintenant reconnaître l'incompatibilité entre elles de certaines propriétés, c'est-à-dire le fait que les projecteurs $[A]$ et $[B]$ peuvent ne pas commuter. Je définis l'intersection \cap_q comme l'intersection des deux sous-espaces. C'est la même chose que l'intersection classique. Cela correspond au *and* quantique.

$$A \cap_q B \equiv \text{Intersection}(A, B) = (\text{and})_q$$

Mais dans le cas de l'union et du complément, c'est différent. Dans l'espace classique, ce serait l'union de deux ensembles. Dans l'espace de Hilbert, l'union quantique de deux sous-espaces $A \cup_q B$ s'appelle en Anglais « the span ». C'est le plus petit sous espace contenant tous les vecteurs de A plus tous les vecteurs de B, ou tous les rayons de A plus tous les rayons de B.

Par ailleurs le complément de A, qui représente la négation, n'est pas tout le complément, c'est le complément orthogonal, l'ensemble des vecteurs qui sont orthogonaux à tous les vecteurs de A. Non pas tous les vecteurs en dehors de A, mais seulement les vecteurs orthogonaux.

$$\neg_q A \equiv A_\perp (\text{orthogonal complement}) = (\text{not})_q.$$

Ce qui est important à noter c'est principalement la différence entre les deux notions d'union (ou complément) de deux ensembles et d'union (ou complément orthogonal) de deux sous espaces de Hilbert. La première, valable en physique classique, conduit à la loi de distributivité, celle que, plus haut, nous avons désignée par la lettre (c). La seconde au contraire ne l'implique pas. En fait, appliquée à des sous-espaces la loi en question n'est valable que pour ceux qui correspondent à des propriétés compatibles entre elles (dont les opérateurs commutent). En revanche elle n'est pas valable pour des propriétés incompatibles.

$A \cup_q (B \cap_q C) \neq (A \cup_q B) \cap_q (A \cup_q C),$ si A, B, C sont incompatibles,

$A \cup_q (B \cap_q C) = (A \cup_q B) \cap_q (A \cup_q C),$ si A, B, C sont compatibles,

A comp B si $[[A], [B]] = 0..$

C'est très important.

La question qui vient ensuite est la suivante : peut-on introduire une fonction (ou distribution) de probabilité ? Les fonctions ont toutes pour domaine les propriétés. Y a-t-il une fonction de probabilité qui ait pour domaine les q -propriétés, les propriétés quantiques qui ont cette algèbre là, y compris les propriétés non compatibles ? La réponse à cette question est donnée par le théorème de Gleason, un théorème non trivial pour les espaces de Hilbert. . Pour expliquer ce théorème il faut d'abord introduire une distinction importante entre une fonction de probabilité et une mesure de probabilité. Une mesure de probabilité a toutes les caractéristiques d'une fonction de probabilité, sauf la distributivité. Le théorème de Gleason s'énonce en termes de mesure de probabilité. Il dit que toute telle mesure de probabilité (toute fonction qui a les caractéristiques que l'on exige d'une mesure de probabilité) doit être de la forme de Born. C'est-à-dire que le poids (ou la mesure) de la propriété A est égal à la trace de $\rho[A]$ (rappelons que $[A]$ est le projecteur correspondant à la propriété A) pour un certain ρ . Je précise que j'appelle « poids » ce qui est une mesure de probabilité, non pas, comme nous le verrons, une véritable fonction de probabilité. Et, nous apprend Gleason, la seule forme que puisse prendre une mesure de probabilité est

$$W(A, \rho) = \text{Tr}(\rho[A]),$$

où ρ joue le rôle de l'état dynamique. On voit que, en fait, la convention jusqu'ici utilisée, consistant à représenter l'état dynamique par un vecteur ou un rayon, peut et doit être généralisée. L'état peut très bien être mixte. Le point est que, tout comme les états purs, les mixtes engendrent une mesure de probabilité (ou un poids), et que toute probabilité d'une propriété quantique doit être obtenue à partir de cette mesure.

Le point essentiel qu'il faut noter est que la mesure (ou le poids) de Born n'est pas, en général, une fonction (ou densité) de probabilité au sens de la théorie des probabilités. Cela tient à ce que le poids s'applique à toutes les propriétés, même les propriétés incompatibles. Et nous avons vu que pour des propriétés incompatibles, la loi de distributivité n'était pas valable, ce qui veut dire que les conditions de Kolmogorov ne seront pas valables non plus. Toute densité de probabilité doit être une mesure de probabilité, mais l'inverse n'est pas vrai. Cette mesure doit en outre satisfaire les conditions de Kolmogorov.

Comment va-t-on créer, former, de véritables fonctions de probabilité ? La réponse est que le poids de Born, qui n'est pas lui-même une fonction de

probabilité, engendre une multiplicité de fonctions de probabilité. Le réseau des propriétés comporte l'incompatibilité. Il est ce qu'on appelle non-Booléen, car il admet la non-commutativité. En revanche, quand on *restreint* cette fonction à des sous-espaces compatibles, Booléens, la fonction W restreinte spécialisée aux sous-espaces Booléens crée des fonctions de probabilité qui satisfont à toutes les conditions classiques de Kolmogorov. Ceci parce que Kolmogorov dépend de la compatibilité, du caractère Booléen.

Étant donnée une propriété A , on peut trouver un ensemble de propriétés qui sont compatibles avec elle, et si l'on restreint l'application du poids de Born à ce domaine (qu'on peut appeler un sous-réseau Booléen) cela donne une vraie fonction classique Kolmogorovienne, Booléenne, de probabilité.

Catherine Pépin. Qu'est-ce qui détermine les sous-réseaux compatibles ou non compatibles ?

Pierre Hohenberg. Deux propriétés sont compatibles si leurs projecteurs commutent. Donc, nous avons une propriété et nous cherchons toutes les propriétés dont le projecteur commute. Ça, c'est un sous-réseau compatible ou Booléen. Mais il peut y avoir plusieurs sous-réseaux incompatibles entre eux qui contiennent la même propriété. Quand le poids de Born est spécialisé à ce sous-réseau-ci, c'est une fonction de probabilité classique Kolmogorovienne. Avec un autre sous-réseau, c'en est une autre. Ce sont là deux fonctions de probabilité incompatibles. Probabilité, cela veut dire logique, comme je l'ai dit précédemment. Nous avons donc des logiques incompatibles, si l'on veut utiliser ce mot. Quant à ces sous-réseaux mutuellement incompatibles, Griffiths les appelle des *frameworks*. En français, d'après Franck Laloë, cela s'appelle des « familles cohérentes » et nous allons employer ce terme désormais.. Pour le spin $\frac{1}{2}$ il y a la famille cohérente de S_i , par exemple celle de S_x , parce que $([S_x +]$ et $[S_x -])$ forme un ensemble complet (en ce sens que, disposant de ces deux projecteurs on peut exprimer n'importe quel vecteur spin comme combinaison linéaire des vecteurs correspondants). Dans ce cas simple ce n'est autre chose qu'une base dans l'espace de Hilbert. Mais il y a d'autres familles, ou bases : $S_y, S_z, S_w...$ Ce sont toutes des logiques, des « familles cohérentes » incompatibles pour le spin $\frac{1}{2}$.

Ce que j'appellerai « loi de la famille unique » est simplement l'affirmation que les différents sous-réseaux incompatibles donnent des fonctions de probabilité et des logiques incompatibles. Il n'y a donc pas de sens à essayer de combiner une probabilité dans une famille avec une probabilité dans une autre. Cette loi de la famille unique, que j'appelle « interdiction de la polygamie », est naturelle du point de vue des conséquences du théorème de Gleason. C'est ce que Griffiths appelle « the single-framework rule ».

Dans tout ce que je viens de dire, il y avait les notions d'état et de propriété, mais celle de dynamique n'entraînait pas. Or nous savons qu'en mécanique quantique, la dynamique est importante. En fait, on peut généraliser ce qui précède à des temps différents. La généralisation d'une propriété est ce que Griffiths appelle une histoire. C'est simplement une suite de projecteurs ou de propriétés correspondant à des temps différents. On associe aux projecteurs un temps par une dynamique de Heisenberg. Donc, on peut généraliser une propriété à un seul temps par une suite de propriétés à une succession de temps, t_1, t_2, \dots, t_N

$$C(A) = [A_1, t_1] \odot [A_2, t_2] \odot \dots \odot [A_N, t_N]$$

Edouard Brézin. Pourquoi avez-vous mis des points de suspension ? Ce sont des virgules ? Est-ce la collection que vous regardez ?

Pierre Hohenberg. Les points de suspension indiquent les temps entre t_3 et t_{N-1} . L'opérateur $C(A)$ induit des opérations dans un espace qui est une répétition N fois de l'espace de Hilbert. N est arbitraire ; c'est le nombre de temps qu'on a choisi. C'est un genre d'espace de Hilbert généralisé qui conduit à une algèbre. Cette notation est celle de Griffiths. Ce n'est pas très important et ce n'est pas très profond. Mais ce n'est pas un produit vectoriel. On peut définir un poids de Born pour les histoires, et l'on peut définir un produit scalaire d'histoires. Employant ces notions on peut définir ce qu'on appelle des familles cohérentes, pour lesquelles la notion de probabilité introduite précédemment a un sens.

En résumé, tout ce que je vous ai présenté à un seul temps se généralise à des temps multiples, avec des lois de syntaxe que Griffiths a introduites. Pour ma part, ce que j'ai essayé de vous présenter, c'est une route à travers l'algèbre de Hilbert, d'abord en un seul temps où le théorème de Gleason dicte l'épistémologie, et ensuite une généralisation naturelle à des temps multiples — mais celle-ci n'ajoute rien aux principes logiques. On a tendance à penser que la théorie de Griffiths est entièrement liée à ces suites de temps. Non. C'est une généralisation qui complique la chose. L'essentiel est contenu dans le théorème de Gleason à un seul temps.

J'ai terminé ma présentation de la formulation réaliste de la mécanique quantique, qui nous livre une multiplicité de fonctions de probabilité, et par là même de logiques et de notions de vérité, incompatibles entre elles. C'est tout. En analogie avec la mécanique classique je vous ai dit ce qu'étaient l'ontologie

et l'épistémologie, un point c'est tout. Il n'est pas nécessaire de demander ce qu'il en est des mesures !

Les mesures

Je traite les mesures exactement comme nous l'a appris von Neumann et comme on l'apprend dans les bons textes. On considère un appareil de mesure extérieur et on couple cet appareil de mesure au système S. On ajoute peut-être un environnement si l'on veut, mais ce n'est pas obligatoire. L'effet de la mesure est un couplage physique qui a donc un effet sur S. L'appareil de mesure M est programmé pour identifier une famille particulière A. Il intrique les états de M avec les états de la famille à laquelle A appartient et permet d'obtenir le poids W spécialisé à cette famille. C'est le choix qu'a fait l'appareil. Les propriétés qui appartiennent aux familles incompatibles avec la famille de A, elles, sont perturbées par l'interaction. Donc, toute la théorie de la mesure naturelle est bien expliquée ici : l'effet essentiel d'une mesure est de *sélectionner* la famille qui se réfère à la propriété mesurée.

Voici mon résumé de CQT : même en physique classique, les propriétés n'ont pas de valeur de vérité si l'on ne précise pas l'état dynamique. Donc, les valeurs de vérité sont relatives (contingentes, ou contextuelles) à l'état dynamique, c'est évident. En mécanique quantique, les probabilités de propriété sont relatives à l'état dynamique et en plus à la famille. Le comportement quantique est par définition un comportement où il y a différentes familles cohérentes incompatibles, et qui sont physiquement importantes. Le comportement classique, par définition, est une limite dans laquelle toutes les familles cohérentes qui ont une pertinence physique sont compatibles. On peut toujours trouver des familles cohérentes qui sont incompatibles, mais toutes celles qui ont une correspondance physique sont compatibles. Griffiths a un slogan pour sa version de CQT : liberté, égalité, incompatibilité !

Si vous le voulez bien j'aimerais maintenant mettre, en quelques mots, CQT en contraste avec les autres formulations afin que l'on voie mieux ses traits particuliers.

5. Autres formulations

Opérationnalisme : Copenhague

Dans cette formulation, on a besoin de mesures extérieures pour donner un sens aux propriétés. Mais du point de vue de CQT, on peut voir que le premier rôle des mesures est, comme nous l'avons déjà remarqué, simplement de choisir la famille cohérente. Evidemment, il y a d'autres effets — l'irréversibilité, etc. — parce que les mesures sont faites par des appareils macroscopiques. Donc, l'opérationnalisme est une spécialisation de CQT pour les systèmes qui sont observés macroscopiquement. De même du point de vue

de l'information (*quantum bayesianism*), les mesures sont remplacées par les agents et l'information. C'est une forme d'opérationnalisme, qui est aussi un cas spécial de systèmes soumis à une interrogation par des agents.

Alain Aspect. C'est intéressant, parce que j'allais vous demander en quoi vous étiez différent de Copenhague, à part dans les mots.

Pierre Hohenberg. En ce que j'ai d'abord formulé la théorie de façon complète pour un système quantique fermé sans faire référence à des mesures ou à d'autres éléments extérieurs au système.

Alain Aspect. Mais sinon, cela suit le même schéma.

Pierre Hohenberg. A mon avis, toute la question entre opérationnalisme et réalisme est la suivante : est-ce qu'on a besoin de faire appel à un appareil ou un agent extérieur pour donner un sens à la théorie? Prenons par exemple les écrits de Chris Fuchs, qui est dans la lignée de Bayes : il dit que le réalisme est inconsistant, qu'il n'y a aucun moyen de formuler la théorie sans faire appel à une agence extérieure. Quant à moi je dis que le réalisme quantique n'a pas besoin de réfuter l'opérationnalisme. Il émet simplement une objection à l'affirmation selon laquelle l'opérationnalisme est nécessaire, que sans lui on ne peut pas formuler la théorie.

La formulation orthodoxe Dirac-von Neumann-Born

Cette formulation, que j'appelle 'orthodoxe' est distincte de l'opérationnalisme radical de Copenhague. En effet, ceux à qui on la doit, les pères du formalisme quantique actuel, ne suivaient pas Bohr jusqu'au bout. Ils considéraient que ψ était la représentation, plus ou moins réaliste, du système, et que toute propriété compatible avec ψ était aussi réelle. Chez eux ce sont seulement les propriétés incompatibles avec ψ qui reçoivent une interprétation opérationnaliste. Il y a donc un mélange de réalisme et d'opérationnalisme. Et c'est justement ce mélange qui mène au « problème de la mesure » et au problème du collapse. Bohr n'a jamais eu de problème de collapse. Il ne parle jamais de collapse. Dans l'approche que j'appelle orthodoxe, par contre, ψ représente le système, si bien que pour toutes les propriétés qui sont incompatibles avec ψ , il faut avoir recours aux mesures, ce qui a pour conséquence le collapse.

Edouard Brézin. Avec Bohr, explicitement, après mesure le système se trouve dans un état propre de...

Pierre Hohenberg. Je dirais que cela, ce n'est pas Bohr. C'est Dirac, von Neumann etc., ce que j'appelle la formulation orthodoxe. Bohr ne parle pas d'une représentation intrinsèque du système par ψ , ni avant ni après la mesure.

Les variables cachées : de Broglie-Bohm

Dans la formulation de deBroglie/Bohm il s'agit vraiment de choisir une ontologie classique, où les éléments de l'ontologie sont les coordonnées $\{x\}$. On peut présenter la théorie en considérant que ψ fait simplement partie de l'épistémologie. Les Bohmiens modernes parlent de cette façon. Cela veut dire qu'il y a des existables ou des observables préférés (les positions, les x). Mais à tous les autres, qui sont incompatibles avec ces x , Bohm donne une interprétation opérationnaliste. Il y a donc une différence : ils choisissent un groupe de variables comme étant ontologiques, et les autres non. C'est justement cette ontologie classique des x qui mène à une dynamique non locale, en accord avec le théorème de Bell.

Edouard Brézin. Qu'est-ce qu'une dynamique non locale ?

Pierre Hohenberg. La dynamique est non locale en ce sens que le comportement des x est régi par ψ . Et qu'il est régi par tout le ψ non localement, c'est-à-dire que les variations de x_1 , par exemple, dépendent des valeurs de $\psi(x_1, x_2, \dots, x_N)$, pour toutes les variables $\{x_i\}$, aussi lointaines qu'elles soient de x_1 . La soi-disant non-localité de la mécanique quantique, qui est la conséquence du théorème de Bell, dépend de cette ontologie classique. Pour le montrer plus en détail, il faudrait un autre séminaire !

Alain Aspect. Pour employer des mots naïfs, quand vous avez deux systèmes intriqués, si vous faites quelque chose sur l'un, cela change le potentiel quantique de l'autre de façon non locale.

Pierre Hohenberg. Voilà.

La théorie de l'état relatif ou des multiples mondes

Passons à la théorie de l'état relatif ou des multiples mondes. Je ne veux pas en dire trop. Il y a toutefois une chose que j'aimerais préciser, c'est que de mon point de vue, ce n'est pas une formulation de la mécanique quantique. J'ai dit que la formulation de la mécanique quantique s'appliquait à un système S arbitraire. Dans la théorie de l'état relatif ou des multiples mondes, il n'y a qu'un seul système, l'univers entier. Ce n'est donc pas ce que j'appelle une formulation de la mécanique quantique, mais une formulation de la cosmologie quantique. Cela conduit à beaucoup d'ambiguïté et d'obscurité, surtout parce

que les partisans de ce point de vue emploient un langage (comme par exemple les termes ‘réel’ ou ‘réalité’) dans un sens qui leur est particulier.

Formulations des collapses spontanés

Il y a aussi toute une série de formulations qui s’appellent des collapses spontanés. Ce ne sont pas des formulations de la mécanique quantique parce que c’en sont en fait des modifications. On ajoute à l’équation de Schrödinger des termes aléatoires. Pour ma part, tant qu’il n’y a pas d’évidence expérimentale contre la mécanique quantique, j’ai peu d’appétit pour ce genre de changement.

Catherine Pépin. Dans votre formulation, la dynamique est locale. L’équation de Schrödinger est donc complètement inchangée.

Pierre Hohenberg. Voilà.

Catherine Pépin. Vous avez une interprétation réaliste avec une dynamique locale.

Pierre Hohenberg. Oui. Cela demanderait tout un séminaire, mais on peut résumer la chose en un mot. La non-localité vient de l’ontologie de l’espace de Hilbert, parce que les états dans l’espace de Hilbert peuvent être très non locaux. Songeons à une paire intriquée — un atome ici, un atome là, arbitrairement loin. Donc, il y a beaucoup de non-localité ontologique, c’est-à-dire incluse dans les états quantiques, mais aucune non-localité dans la dynamique. Il n’y a pas d’influence non locale.

Alain Aspect. Dans l’espace de configuration, il n’y a pas de non-localité. Schrödinger s’en est aperçu rapidement. S’il essaye de décrire deux particules, dans l’espace où l’on décrit les deux particules il n’y a aucune non-localité. Les non-localités apparaissent lorsqu’on essaye de revenir dans l’espace réel.

Pierre Hohenberg. C’est une autre façon de le dire, mais je préfère la distinction entre les états non-locaux (qui existent aussi en mécanique classique, par exemple une onde plane) et les influences non-locales, qui n’existent ni en mécanique classique ni en mécanique quantique.

Hervé Zwirn. Je voudrais vous poser une question en faisant un parallèle avec la mécanique classique. Si j’interprète bien ce que vous dites, le prix à payer pour avoir une présentation réaliste de la mécanique quantique identique à la présentation réaliste de la mécanique classique, consiste selon vous à accepter une modification du concept de probabilités.

Pierre Hohenberg. Ou plutôt, de reconnaître l'existence de fonctions de probabilité multiples et incompatibles.

Roger Balian. Et de logiques multiples.

Pierre Hohenberg. Et par conséquent de logiques multiples.

Hervé Zwirn. Une fois que nous avons dit cela, voyons ce qu'il en est si l'on veut poursuivre le parallèle et aller jusqu'à la notion de mesure. En mécanique classique, quand on fait une mesure cela n'est pas censé avoir une influence quelconque sur la probabilité. Alors que là, je ne vois pas comment on peut faire l'économie de la réduction du paquet d'ondes. C'est-à-dire que quand on fait une mesure, cela revient à choisir à un moment donné, par le choix même de l'appareil de mesure, une famille de probabilités. Mais cela n'a pas que cet effet. Si l'on voulait que ce soit rigoureusement comparable à la mécanique classique, il faudrait que de surcroît, ce choix n'influe pas ou ne modifie pas les probabilités. Or en fait, ça les modifie.

Pierre Hohenberg. Comme je l'ai dit plus haut, l'effet principal d'une mesure est de choisir, parmi la multiplicité de familles cohérentes, celle qui correspond à l'appareil de mesure. Une fois la famille choisie, l'acte de mesure ne modifie pas les probabilités. Elle révèle les probabilités attachées aux diverses propriétés appartenant à la famille choisie, comme ce serait le cas en mécanique statistique classique.

Hervé Zwirn. Donc, il y a quand même là une différence.

Pierre Hohenberg. Absolument. Les propriétés appartenant aux familles cohérentes non-sélectionnées sont fortement perturbées, mais celles appartenant à la famille cohérente sélectionnée ne sont pas perturbées par la mesure.

6. Réponses aux 17 questions de Maximilian Schlosshauer

Pierre Hohenberg. Le livre de Maximilian Schlosshauer *Elegance and Enigma*, sorti l'an dernier, interroge 17 grands interprètes de la mécanique quantique, dont aucun n'est défenseur des histoires consistantes. Je vous livrerai mes réponses à moi dans leur version originale, en anglais.

What first stimulated your interest in the foundations of QM ? It was the usual puzzles that nagged me since graduate school. Discussions with Jim Hartle on Decoherent Histories triggered my interest.

What are the most pressing problems in the foundations of QM today ? Getting consensus on the formulation of the theory and moving on.

What interpretive program can make the best sense of QM and why ? I agree with those who say that QM needs no interpretation. I believe it needs a formulation, and the one I favor is CQT.

What are quantum states ? Quantum states are, most generally, represented by density matrices (in Hilbert space).

Does QM imply irreducible randomness in Nature ? Yes. See the next question.

Quantum probabilities : subjective or objective ? They are objective. Quantum properties and histories have intrinsic probabilities, but these refer to probability functions that are contextual to the framework, as well as to the quantum state of the system.

The quantum measurement problem : serious roadblock or dissolvable pseudo-issue ? The measurement problem appears in the orthodox formulation because the latter is a mixture of realism and operationalism. Purely realistic or purely operationalist formulations do not have a measurement problem.

What do the experimentally observed violations of Bell's inequalities tell us about Nature ? They tell us that a formulation with a classical ontology of local beables must have nonlocal dynamics (influences).

What contributions to the foundations of QM have, or will, come from quantum information theory ? What notion of information could serve as a rigorous basis for progress in foundations ? Quantum information is not part of our realistic formulation of QM. It enters into discussions of the implications of the theory.

How can the foundations of QM benefit from approaches that reconstruct QM from fundamental principles ? Can reconstruction reduce the need for interpretation ? The nonrelativistic theory can and should be formulated independently of other theories and it should not require further interpretation.

J'ai adopté un point de vue phénoménologique. On peut évidemment se demander si la mécanique quantique non relativiste peut être déduite à partir d'une théorie plus fondamentale, mais cette question n'est pas nécessaire du point de vue phénoménologique que j'adopte, bien qu'elle soit évidemment intéressante.

If you could choose one experiment, regardless of its current technical feasibility, to help answer a foundational question, which one would it be ? Experiments are not part of the foundations (formulation) of QM. They belong to tests of the theory and the study of its implications.

If you have a preferred interpretation of QM, what would it take to make you switch sides ? My imagination is too poor to suggest to me what could make me switch sides, regarding my preferred « interpretation » (sic).

How do personal beliefs and values influence one's choice of interpretation ? I don't know and I don't believe they should.

What is the role of philosophy in advancing our understanding of the foundations of QM ? The concepts of 'realism', 'operationalism', 'ontology' and 'epistemology' are philosophical concepts, so I recognize an important role for philosophy. The role of philosophers, on the other hand, has been mixed. I appreciate their questions more than their answers. My attitude is best summarized by the following paraphrase of Einstein : « The foundations of QM require a minimum of philosophy, but no less. »

Je ne sais pas si vous vous rappelez le mot d'Einstein : « an explanation should be as simple as possible, but no less ».

What new input and perspectives for the foundations of QM may come from the interplay between quantum theory and gravity/relativity, and from the search for a unified theory ? I believe that nonrelativistic QM can and should be formulated independently of relativity (special and general), so the answer is none.

Where would you put your money when it comes to predicting the next major development in the foundations of QM ? I'm saving up my money.

What single question about the foundations of QM would you put to an omniscient being ? Why, eighty-five years after the mathematical formulation of QM, have physicists been unable to agree on a convincing formulation of the physical content of the theory, given that there is overwhelming evidence of its experimental validity ?

7. Conclusion

À mon avis, CQT est la formulation minimale de la mécanique quantique qui incorpore la physique correctement. Elle est basée sur l'hypothèse essentielle de l'ontologie de l'espace de Hilbert. L'épistémologie qui en suit est contrainte par le théorème de Gleason. Toutes les autres questions que l'on discute d'habitude, à mon avis, n'appartiennent pas au fondement dans le sens restreint que je lui prête. Par exemple, comment atteint-on la limite classique, comment décrit-on les mesures, l'information quantique, la non-localité, la décohérence, etc. ? C'est ce que j'appelle les conséquences de la mécanique quantique, pas la formulation.

Alain Aspect. La décohérence est une conséquence ?

Pierre Hohenberg. Oui, absolument, une conséquence. C'est ce qui se passe quand on est en présence d'un environnement avec multiples états.

La théorie est ce qu'elle est, de même qu'on peut formuler la théorie classique pour un système arbitraire. J'affirme donc : finissons-en avec les fondements de la mécanique quantique. Pour essayer de le dire de façon poétique : « *Friends, Colleagues, Countrymen, lend me your ears ; I come to bury Quantum Foundations, not to praise them* » (D'après William Shakespeare, *Julius Caesar*).

Parmi les références, je mentionnerais l'article que j'écris actuellement avec mon collègue R. M. Friedberg, « Quantum realism », qui n'est pas encore paru.

Section II – Discussion

Bernard d'Espagnat. Nous vous remercions pour ce bel exposé très intéressant. Nous avons encore un peu de temps pour les questions.

Roger Balian. Plus que de Griffiths, vous êtes finalement très proche de ce que font les C^* algébristes. Vous vous situez tout à fait dans le même cadre de pensée. Eux aussi disent que l'on fabrique l'opérateur densité, qu'on le construit, etc., et qu'une fois qu'on l'a construit on peut déduire toutes sortes de lois de probabilités, qui sont des vraies lois de probabilité.

Pierre Hohenberg. Si j'ai bien compris, c'est une généralisation de la mécanique quantique ?

Roger Balian. Non, pas du tout.

Pierre Hohenberg. Alors, il va falloir que je m'instruise.

Edouard Brézin. C'est juste l'algèbre des observables.

Roger Balian. Cela s'apparente à ce que vous dites, mais un peu à l'envers. Vous partez de l'espace de Hilbert et construisez les existables. Eux partent à l'envers. Ils disent qu'il existe une algèbre de *beables*. A partir de cette algèbre qui a un certain nombre de propriétés, on construit un espace de Hilbert. Une fois qu'on l'a construit, on associe à chaque observable un nombre c , que l'on appelle *expectation value*. Ensuite, à partir de ces nombres c , on fabrique des probabilités. Un cours de François David vient d'être donné à Saclay sur le sujet.

Bernard d’Espagnat. Je voudrais repartir de l’histoire de la théorie des histoires cohérentes. Elle commence par Griffiths, qui était gêné par une mécanique quantique où l’on parlait toujours d’observable, de mesure : il voulait avoir une description de la réalité elle-même. A première vue, cela paraît simple, il suffit de considérer que les propriétés que l’on mesure existent en réalité. C’est là la théorie de Griffiths, du moins au départ.

Griffiths lui-même — comme d’autres au même moment, en 1987 — s’est toutefois aperçu qu’il y avait un problème dans cette théorie. Il l’a constaté à propos de l’énigme Einstein-Podolsky-Rosen. Ce problème, c’est que dans l’expérience de pensée suggérée par ces auteurs, si l’on adhérait vraiment aux idées que Griffiths lui-même avait exprimées, on arrivait à la conclusion que, dans un état intermédiaire, une des particules en jeu (qui étaient des particules de spin $\frac{1}{2}$) avait nécessairement deux composantes de spin réelles en même temps, ce qui n’est pas possible. Griffiths s’en est sorti en disant qu’il est vrai que les conditions d’expérience impliquent que le spin de la particule a une composante précise selon une certaine direction, qu’il est vrai qu’elles impliquent qu’elle a une composante de spin selon une autre direction, mais qu’il n’est pas vrai que ces deux composantes de spin ont chacune une valeur précise. On lui a fait remarquer que c’était difficile à admettre, parce que cela consiste à dire que A est vrai et B est vrai, mais qu’il est faux que A et B soient vrais ensemble. Je ne sais pas si vous arrivez à admettre cela, mais moi, j’ai du mal.

Roland Omnès, ensuite, est intervenu avec sa théorie des diverses logiques, inspirée des vues de Griffiths. Il visait lui aussi une théorie réaliste. Mais dans ses premières moutures il n’avait pas vu cette difficulté. On la lui a fait remarquer. Il était axé sur l’idée (que je tiens, moi aussi, pour irréfutable) que la réalité est unique, que cela n’a pas de sens de parler d’une multiplicité de réalités, aussi la difficulté en question l’amena-t-elle à considérer qu’en fin de compte il y a beaucoup moins de propriétés pouvant vraiment être tenues pour réelles qu’il ne l’avait cru au départ. Dans la version finale de sa théorie on trouve dans cette catégorie les propriétés macroscopiques mais presque rien d’autre que cela. Cela l’a conduit à la notion de *reliable*. Il a parlé de *reliable properties*. Les *reliable properties* sont des propriétés qui sont vraies dans une certaine logique (dans un certain *framework*) mais qui ne peuvent pas être tenues pour vraies indépendamment du *framework*, de la logique, qu’on considère.

À la lecture de vos précédents articles mon impression était qu’au fond votre théorie était quasiment identique à celle, disons, d’Omnès (et d’autres auteurs) à ceci près qu’en ce qui concerne la notion de vérité des propriétés elle a conservé le langage de Griffiths. Elle continue à qualifier de vraies les propositions qu’Omnès qualifie seulement de *reliable* en raison du fait qu’elles ne sont vraies qu’à l’intérieur d’une certaine famille cohérente. Affaire de convention. Pourquoi pas ? Seulement, évidemment, le prix à payer est qu’il y a

plusieurs familles cohérentes et que si l'on veut discuter d'une expérience quelconque on est toujours obligé, quand il y a plusieurs temps à considérer, d'en introduire effectivement plusieurs. On ne peut pas sortir de là. Si, par exemple, on veut décrire une expérience de franges de Young, on peut, d'abord, ne considérer que deux temps, le temps 0 de la préparation et le temps 1 où les particules traversent l'écran porteur des fentes. Jusque là tout va bien car ces deux événements (particule dans le canon de l'appareil qui la prépare, puis dans l'une des deux fentes) peuvent effectivement être considérés dans le cadre d'une seule et même famille cohérente (chez Griffiths, Omnès et les autres toute 'famille' à deux temps seulement est 'consistante' : 'cohérente', disons, en Français). Mais ensuite, on doit prendre en considération le temps 3 de l'arrivée sur l'écran récepteur et, à ce moment-là, on est bien obligé de constater que ce cela fait sortir de la famille initiale. Autrement dit, on est obligé, il me semble, pour discuter l'expérience même la plus simple, de passer d'une famille cohérente à un autre.

Et, bien entendu, il se passe quelque chose de similaire en ce qui concerne l'expérience EPR généralisée - « à la Aspect *et al.* » disons - c'est à dire faite au moyen de deux analyseurs de polarisation non parallèles. Là, de nouveau, il y a plus de deux 'temps' distincts à prendre en considération : en effet, outre celui, t_1 , de la mesure faite par Alice et celui, t_2 , de celle faite par Bob il y a à considérer, en tout cas chez Griffiths, un temps t'_1 antérieur à t_1 , et un temps t'_2 antérieur à t_2 , car Griffiths pose qu'une mesure *révèle* la valeur que la quantité mesurée avait avant la mesure : il faut donc bien, non seulement que cette quantité ait la valeur précise en question à l'instant même de la mesure (et juste après) mais également qu'elle l'ait eue au moins en *un* 'temps', juste avant (en fait en un suite continue de temps). Et dans l'expérience dont il s'agit cela doit être vrai pour chacune des deux particules. Or on voit aisément (par exemple en supposant l'expérience faite sur des paires non de photons mais de particules de spin $\frac{1}{2}$, plus aisément 'visualisables') que les propositions énonçant ces quatre nécessités ne peuvent être groupées en une même famille cohérente au sens de Griffiths *et al.*. Et que poser $t'_1 = t'_2$ n'arrange rien, vu la possibilité d'inverser t_1 et t_2 en changeant de référentiel. De sorte que pour rendre compte d'une expérience telle que celle-là Griffiths est obligé de violer la règle que vous posez: celle de rester toujours à l'intérieur d'une même famille cohérente.

Cela dit, une chose me frappe. C'est que, au sein des familles cohérentes de Griffiths, coexistent (à différents temps), des propositions qui ne commutent pas. Ainsi par exemple, dans le cas d'un seul spin $\frac{1}{2}$, la famille des trois propositions

$$[S_{x+}(t_1)], [S_{x+}(t_2)], [S_{z+}(t_3)],$$

est cohérente au sens de Griffiths *et al.* alors qu'elle ne constitue manifestement pas un sous-réseau booléen. Et sa cohérence est évidemment liée au fait que

plusieurs temps y sont considérés. Ce qui m'incite à penser que votre définition actuelle des famille cohérente n'est pas la même que celle de Griffiths *et al.* et que, par conséquent, la différence entre votre théorie et les théories dites « des histoires cohérentes » pourrait être bien plus considérable qu'il ne paraît. Malheureusement je ne vois pas en vertu de quoi cette différence pourrait permettre à votre théorie d'échapper à la nécessité que je viens de noter à propos de celle de Griffiths *et al.* : celle d'avoir à utiliser à la fois plusieurs familles cohérentes, c'est à dire, finalement, plusieurs 'cadres de réalité', quand on veut rendre compte d'une expérience. Qu'en pensez-vous ?

Pierre Hohenberg. L'essentiel de votre remarque, à laquelle je ne peux que répondre partiellement, se résume dans votre affirmation :

« ... si l'on veut discuter d'une expérience quelconque on est toujours obligé, quand il y a plusieurs temps à considérer, d'introduire plusieurs familles cohérentes.... De sorte que pour rendre compte d'une expérience telle que celle-là Griffiths est obligé de violer la règle que vous posez: celle de rester toujours à l'intérieur d'une même famille cohérente. »

La caractéristique fondamentale de la mécanique quantique c'est l'absence d'une fonction de probabilité (et a fortiori d'une fonction de vérité) universelle, c'est-à-dire applicable à toutes les propriétés d'un système fermé. On est obligé d'introduire de multiples fonctions de probabilité, une pour chaque famille cohérente. Il s'en suit qu'on ne peut pas « discuter d'une expérience quelconque » de façon complète, sans introduire plusieurs familles cohérentes. Je suis d'accord avec vous. Ce n'est pas, toutefois une inconsistance de CQT, mais plutôt la conséquence inévitable de l'ontologie de l'espace de Hilbert. La règle de la famille unique est tout simplement ce qui donne un sens à chacune des fonctions de probabilité, une pour chaque famille.

En ce qui concerne votre question sur les temps multiples, chaque histoire constitue l'équivalent de ce qu'était la propriété dans le cas du temps unique et les conditions de compatibilité ne sont plus la commutation, mais une condition sur les corrélations entre histoires, exprimée par le poids de Born.

Je ne suis donc pas d'accord pour dire que la présentation de Griffiths - et d'Omnès d'ailleurs, qui en diffère de peu -, ne donne pas une description cohérente de ces expériences simples, qu'elles soient d'interférences à deux trous ou EPR etc. En effet pour tenir compte de toutes les propriétés il est nécessaire d'employer plusieurs familles, puisque certaines questions n'ont un sens que dans une famille déterminée et aucune famille ne permet de discuter toutes les propriétés quantiques. C'est simplement la traduction de l'incompatibilité quantique. Chaque famille donne des réponses, certes

probabilistes et des réponses ou des prédictions qui sont univoques, bien qu'incompatibles entre familles. Voilà pour l'ancienne théorie.

Qu'ajoute ma présentation d'aujourd'hui ? A mon avis, elle n'ajoute que la justification. Parce que la présentation de Griffiths, d'Omnès, de Gell-Mann et Hartle repose sur des hypothèses présentées comme des diktats : c'est comme cela qu'il faut faire. J'ai essayé de trouver l'origine de ces contraintes ou de ces lois, et de l'identifier comme étant liée directement à l'ontologie de l'espace de Hilbert. Une fois cette ontologie acceptée, le reste suit par simple mathématique. Si l'on veut décrire un système quantique de façon intrinsèque par un espace de Hilbert, à ce moment-là, il y a des limitations sur les fonctions de probabilité que l'on peut définir, leur universalité, etc. Ce que j'espère ajouter à cette histoire qui est maintenant un peu ancienne, c'est de voir comment les choses se suivent naturellement — on ne peut pas faire autrement — plutôt que de dire comme Griffiths qu'on n'a pas le droit de faire ceci ou cela, plutôt que d'imposer des lois de syntaxe. J'espère avoir relié cela non pas à une syntaxe de langage, mais à la structure intrinsèque, algébrique, de l'ontologie. Toutefois, je ne partage pas l'idée selon laquelle la théorie ne donne pas une description cohérente.

Alain Aspect. Là-dessus, je voudrais vous provoquer. Un de mes sujets de prédilection est qu'il ne faut pas mélanger les problèmes conceptuels de la mécanique quantique à une particule avec ceux d'EPR. Je suis donc parfaitement d'accord avec le début de l'intervention de Monsieur d'Espagnat. A une particule, il n'y a pas de problème. On sait, grâce à la théorie de Bohm qui est une théorie réaliste, qu'il n'y a pas problème, pas de non-localité, etc. Tant qu'on a une particule et les trous de Young, on peut faire une théorie à la Bohm qui marche bien.

Je pense que le vrai problème — et là, je suis un peu surpris que vous soyez si affirmatif — est autre. Quand nous avons une expérience EPR dans laquelle nous changeons les positions des appareils de mesure suivant des événements qui sont séparés par un intervalle de genre espace, il suffit de changer de référentiel pour que l'un soit avant l'autre ou l'autre soit avant l'un. J'ai du mal à savoir comment vous ferez pour ne pas avoir plusieurs réalités suivant que l'on est dans le référentiel de l'un ou dans le référentiel de l'autre. Il me semble que c'est le problème majeur d'EPR. J'étais parfaitement d'accord avec le début de votre intervention, Monsieur d'Espagnat. Si vous me dites — ce que je ne savais pas parce que je ne connais pas assez bien mon histoire... — que Griffiths a buté sur ce problème-là, ce fut à juste titre, c'est un problème majeur me semble-t-il.

Pierre Hohenberg. L'existence de multiples familles cohérentes est inévitable dans la mécanique quantique d'un système fermé. Vous me demandez comment je fais pour éviter d'avoir plusieurs « réalités » ? Je n'aime pas cette

terminologie qui se réfère à l'ontologie, alors que je préfère parler de « plusieurs notions de probabilité ou de vérité », c'est-à-dire d'épistémologie (voir ci-dessous), mais si vous le voulez, je concède qu'on puisse parler de multiples réalités, chacune relative (contingente ou contextuelle) à une famille cohérente déterminée.

Bernard d'Espagnat. Si vous voulez vraiment rester en cohérence avec votre hypothèse de départ, consistant à conférer un statut ontologique aux éléments de l'espace de Hilbert et à eux seuls (pas de « variables cachées »), je crains que vous ne vous trouviez acculé à cette nécessité.

Alain Aspect. Si vous dites qu'il y a plusieurs réalités, alors d'accord.

Pierre Hohenberg. Je n'ai jamais dit qu'il y avait plusieurs réalités.

Roger Balian. Il y a plusieurs logiques, tout de même. Vous avez plusieurs logiques et plusieurs probabilités qui sont superposées.

Bernard d'Espagnat. Et c'est nous qui choisissons !

En fait – nous sommes tous d'accord, semble-t-il, sur ce point – cette nécessité d'une pluralité des réalités est extrêmement déplaisante pour ne pas dire inacceptable. Alors, la constatation de ce qu'elle paraît découler de votre hypothèse de départ (l'ontologie de l'espace de Hilbert) ne doit-elle pas nous amener à nous rappeler que celle-ci n'est, finalement, qu'une hypothèse ? Une hypothèse certes conforme à une longue tradition méthodologique de 'réification par la pensée' mais dont, à l'examen, l'adaptation à l'ensemble des faits expérimentaux se révèle hautement problématique et qui par conséquent me semble plus métaphysique que physique.

Pierre Hohenberg. À mon avis ce mot 'réalité' est ambigu. Je préfère parler d'ontologie, qui est le modèle mathématique du monde extérieur. En mécanique classique c'est l'espace des phases et en mécanique quantique c'est l'espace de Hilbert. Parler de réalité ou de propriétés réelles, par contre, donne lieu à des ambiguïtés. En effet, une propriété classique (qui fait partie de l'ontologie) peut être vraie, fausse, ou même indéterminée (si l'état dynamique n'a pas été désigné). Est-elle réelle en général ou seulement si elle est vraie ? De la même façon en mécanique quantique je préfère parler de l'ontologie et de qualifier les propriétés de vraies, fausses ou indéterminées, plutôt que de demander si elles sont réelles. Un système fermé en mécanique manque de notion universelle de vérité, il possède plusieurs vérités incompatibles et on peut le dire, une seule ontologie. Je reconnais que je n'ai rien résolu par ce langage, mais j'espère avoir clarifié la situation.

Bernard d'Espagnat. En ce qui concerne la question des temps multiples Il est bien vrai que dans ce cadre les conditions de compatibilité ne sont plus la commutation mais une condition sur les corrélations entre histoires. Reste que cette condition là - qui est au coeur même des théories de ces 'histoires' - n'est apparue nulle part dans votre exposé et ne semble pas pouvoir être inféré de son contenu, centré sur l'idée de commutation à l'intérieur d'une même famille cohérente. Ce qui incite à penser que les théories en question ne constituent aucunement de simples généralisations de votre théorie CQT ; et par conséquent à se demander si celle-ci peut vraiment être considérée comme en fournissant les fondements.

Pierre Hohenberg. Voyez ma réponse après l'intervention de Franck Laloë.

Alain Aspect. Il me semble, pour ce que j'en ai compris, que si je prends deux systèmes de référence qui sont tels qu'on inverse l'ordre dans lequel l'un précède l'autre, on aura dans un système une série d'histoires cohérentes, et dans l'autre une autre série d'histoires cohérentes, qui correspondent dans l'état intermédiaire à des situations complètement différentes. C'est-à-dire qu'il y a des états intermédiaires où un appareil aura fait click et l'autre pas, alors que dans l'autre histoire ce sera le contraire. Il me semble que c'est dans ces états intermédiaires que se joue la difficulté.

Bernard d'Espagnat. C'est ce qui me semble également.

Franck Laloë. Il me semble que la description par histoires qu'a faite Pierre Hohenberg, ou celle de Griffiths, doivent être vues un peu à la manière de Bohr, qui décrit toute expérience comme un tout non-décomposable. L'histoire, c'est un tout, qui certes contient toute une série de temps ordonnés, mais qu'il ne faut pas isoler. Ce n'est pas quelque chose qu'on peut interrompre au milieu, puisque c'est l'ensemble de l'expérience qui est décrit. Dans le cas évoqué, l'histoire n'a un sens que si l'on décrit l'émission des particules et les deux mesures qui se sont faites. Certes, différentes descriptions par des familles d'histoires distinctes sont possibles, ce qui met en pratique la complémentarité de Bohr. Mais on ne se pose pas la question de savoir ce qui se passe au milieu de cette expérience, de même que Bohr refuse de décrire une expérience à moitié faite. Ainsi, telle que je comprends la description par histoires, il faut prendre la description de l'ensemble, une fois qu'Alice et Bob ont choisi leur direction et qu'ils ont observé leurs résultats.

Pierre Hohenberg. Je suis d'accord que dans le cas de temps multiples, l'histoire dans son ensemble constitue l'existant, plutôt que événement par événement, mais ces événements sont, dans ce formalisme, définis par des

projecteurs et non pas par des mesures ou des « expériences ». D'autre part, les conditions de cohérence entre histoires sont une généralisation des conditions de compatibilité des propriétés à un seul temps, mais je ne suis pas d'accord qu'il y ai un désaccord entre les deux espèces de conditions.

Edouard Brézin. Excusez-moi de compliquer encore la question, mais je n'ai jamais trouvé que la mécanique classique soit réaliste ! La mécanique classique a deux formulations, l'une différentielle (équations de Newton), et l'autre qui est le principe de moindre action. On peut passer de l'un à l'autre mathématiquement de manière élémentaire. Mais le principe de moindre action est une absurdité du point de vue physique, car il imagine que la particule connaîtra sa position à l'instant T_0 et sa position à l'instant final, et que c'est comme cela qu'elle déterminera sa trajectoire. C'est non causal, c'est affreux. Comment se fait-il que cette formulation non causale soit équivalente à la formulation différentielle ? C'est parce que dans la formulation différentielle, on admet la notion de vitesse. Or les vitesses sont en réalité des positions à des temps successifs. C'est ce que nous savons. Ce n'est pas tout à fait causal, une formulation qui admet des vitesses. Par conséquent, je pense que la mécanique classique est non causale, et que l'explication de ce que nous voyons de la trajectoire unique, c'est Feynman qui nous la donne. Il n'y a pas de trajectoire unique. On passe bien par toutes les trajectoires, mais nous avons l'impression macroscopiquement qu'il n'y en a qu'une, qui est celle qui minimise l'action, parce que toutes les autres se détruisent par interférence. Je pense donc que la mécanique quantique restitue la causalité qui manque à la mécanique classique et à son réalisme. Je vois donc les choses de manière différente !

Bertrand Saint-Sernin. Ce que Monsieur Brézin vient de nous dire, Joseph Fourier l'énonce explicitement dans le discours préliminaire de la théorie analytique de la chaleur : les causes des phénomènes ne nous étant pas connues, nous faisons simplement une description. Nous avons la chance de connaître leurs lois, mais nous ne connaissons pas les causes. Le problème du réalisme depuis Platon est le suivant : est-ce que l'on peut intégrer à la science la causalité, ou pas ? Si on ne le peut pas, ce n'est pas du réalisme.

Pierre Hohenberg. Quand je parle de réalisme quantique, il ne s'agit pas de ces questions profondes. Je parle du réalisme simplement en opposition avec l'opérationnalisme. Je sais bien que c'est un mot dangereux !

Hervé Zwirn. J'ai une question sur la mesure. Tel que vous avez présenté les choses, nous avons l'impression que le problème de la mesure disparaît. Maintenant, essayons de détailler ce qui se passe. Quand on fait une mesure, il y a une interaction avec un appareil de mesure. Dans votre formulation, cela va induire le choix d'une famille cohérente.

Pierre Hohenberg. Cela va sélectionner une famille cohérente.

Hervé Zwirn. Mais en fait, cette sélection de la famille n'intervient pas réellement. Parce que si l'on faisait l'analogie avec la présentation habituelle du problème de la mesure, on pourrait dire que si l'on prend l'appareil de mesure comme un objet quantique, on peut le considérer lui-même selon différentes familles cohérentes, et donc que l'interaction entre le système et l'appareil de mesure lui-même pris comme un tout (l'ensemble des deux) peut être considérée selon différentes telles familles, aucune n'étant privilégiée. Ce n'est qu'au moment où un observateur viendra regarder qu'une famille cohérente particulière sera sélectionnée. Donc, je ne vois pas en quoi le problème de la mesure est éliminé. En effet, de quelle manière pourra-t-on montrer que l'appareil de mesure introduit une famille cohérente particulier dans ce cadre-là ?

Roger Balian. Un point n'est pas tout à fait juste : l'appareil de mesure lui-même non seulement choisit la famille cohérente de l'objet mesuré, mais choisit aussi la siennne.

Hervé Zwirn. Pourquoi ?

Pierre Hohenberg. Parce qu'il est classique. Autrement, ce n'est pas une mesure.

Hervé Zwirn. Avec un tel argument, on met le problème sous le tapis mais on ne le règle pas. Si vous dites que l'appareil de mesure est macroscopique, on en revient à la conception de Bohr et l'on ne résout pas le problème.

Roger Balian. Je ne dis pas qu'il est classique, je dis qu'il est macroscopique, c'est tout.

Pierre Hohenberg. Il est macroscopique *et* classique. C'est cela, une mesure. On peut mettre de multiples systèmes quantiques en interaction et obtenir de belles choses, mais ce n'est pas cela, une mesure.

Edouard Brézin. Donc, il y a des choses qui échappent à la mécanique quantique.

Pierre Hohenberg. Non, ce sont des choses qui n'y échappent pas. C'est une certaine limite de la mécanique quantique, qui est le comportement classique. Nous parlons d'une mesure dans le sens le plus simple. Evidemment,

il y a des mesures plus sophistiquées, par exemple des mesures faibles, etc. Mais dans le sens le plus simple, parce que le système quantique qui est l'appareil de mesure a un comportement classique, il n'a pas de familles incompatibles.

Roger Balian. Il a certes des familles incompatibles, mais cette incompatibilité ne joue pas car on va regarder seulement le pointeur.

Alain Aspect. C'est ce que Zurek appelle *preferred framework*.

Hervé Zwirn. Cela ne suffit pas. Il faut remettre quelque chose de plus.

Pierre Hohenberg. Une mesure, c'est quelque chose de plus. Une mesure, c'est une interaction quantique avec un caractère très particulier. On lit cela dans von Neumann. C'est-à-dire que la description quantique de la mesure ne consiste pas à prendre n'importe quels systèmes quantiques et à les mettre en interaction. C'est prendre le système arbitraire, microscopique, et le mettre en interaction avec un système quantique qui a un comportement classique en ce qui concerne le pointeur. Les autres, nous ne nous y intéressons pas.

Hervé Zwirn. L'explication de von Neumann n'est pas satisfaisante, justement.

Pierre Hohenberg. Dans la perspective des histoires ou de CQT, cela devient satisfaisant.

Hervé Zwirn. C'est cela que je ne comprends pas. Il me semble que si l'on reste dans le cadre strict de la mécanique quantique et que l'on s'interdit, ce qui serait rigoureux, d'utiliser le mot « classique » qui n'existe pas...

Pierre Hohenberg... Alors on ne fait pas de mesure. On ne peut pas discuter des mesures. J'apprécie la mécanique quantique sans discuter des mesures, mais je me sens l'obligation, pour satisfaire le grand public, de dire : peut-on aussi tenir compte des mesures ?

Roger Balian. Ce que vous dites me rappelle les mathématiciens qui font des probabilités. Ils sont extraordinairement contents, ils disent qu'une probabilité est une mesure au sens mathématique, ils jouent avec... Mais quand il faut l'appliquer, ce n'est pas leur problème !

Pierre Hohenberg. Voilà, mais on peut quand même le faire. Une mesure, c'est mettre le système en question en interaction avec un système particulier qui a un comportement classique, comme vous dites, en ce qui concerne les degrés de liberté qui intéressent la mesure.

Edouard Brézin. Ce qui nous gêne dans cette vision, c'est que si c'est une interaction avec un système macroscopique compliqué — c'est cela la mesure, je suis bien d'accord -, cela signifie que...

Pierre Hohenberg... Non, avec un système simple. Il est compliqué du point de vue microscopique, mais il est très simple.

Edouard Brézin. Mais *a priori*, on peut décrire l'interaction par un hamiltonien des forces locales, etc. Et l'on ne comprend plus comment cet appareil de mesure nous rend compte de ce que nous dit Alain, qui viole les inégalités.

Roger Balian. Si. Prenez le texte que nous avons écrit. C'est exactement ce que nous avons fait. Nous le faisons explicitement, en grand détail, en regardant les limites, les probabilités, les erreurs. Parce que c'est probabiliste, de toute façon.

Hervé Zwirn. Roger, au sujet du papier que vous nous avez exposé précédemment, nous avons conclu que vous ne pouviez pas faire l'économie de la petite hypothèse qui change justement tout. Celle selon laquelle l'on s'interdit de regarder un certain nombre de choses parce qu'elles sont au delà des limites, humaines ou matérielles. Donc, ce petit saut qui est présent dans la décohérence...

Roger Balian. Ce n'est pas un petit saut. C'est exactement comme quand on dit « ce parapluie est là ». En réalité, ce parapluie n'est pas là, il a une probabilité 10^{-40} ou $10^{-10\ 000\ 000}$ d'être ailleurs. C'est pareil. Alors, nous oublions cela. Nous ne faisons pas des mathématiques, mais de la physique.

Hervé Zwirn. Nous en revenons aux exposés de Franck. C'est « *for all practical purposes* ».

Roger Balian. Nous faisons de la physique.

Bernard d'Espagnat. Comme vous l'avez très bien dit vous-même l'autre jour, la physique que nous faisons est une physique essentiellement humaine, ce qui signifie à mon sens qu'elle ne vise pas à décrire le monde tel qu'il est, mais le monde tel que nous le voyons, autrement dit le résultat d'un inévitable formatage de la réalité par notre regard. Pierre Hohenberg a l'espérance de nous décrire le monde -le réel - tel qu'il est en soi. Je pense que c'est une espérance qui est belle, mais utopique.

Pierre Hohenberg. Je veux décrire le monde tel qu'il est en soi pour formuler la mécanique quantique dans son essence. Mais pour décrire un phénomène comme la mesure, il faut faire intervenir des modèles d'appareils réels macroscopiques. C'est la même chose que de se demander comment la seconde loi de la thermodynamique est reliée à la mécanique classique. Prenons pour image la trajectoire où Charlie Chaplin est couché à terre, se redresse soudain, se rétablit de la chute causée par une peau de banane et recule. Cette trajectoire à temps inversé, dans l'espace des phases elle existe. Mais il n'est pas dérangeant qu'elle soit négligeable. De même, le chat de Schrödinger existe. La superposition du chat vivant et mort existe dans le grand espace de Hilbert, mais nous ne devrions pas être dérangés par le fait que cela n'ait pas de signification physique. Cela a la même signification physique que la trajectoire dans laquelle Charlie Chaplin se rétablit à reculons.

Bernard d'Espagnat. Donc, votre ontologie n'est pas une ontologie au sens classique du terme.

Pierre Hohenberg. Elle l'est pour le petit système.

Bernard d'Espagnat. Mais si je comprends bien elle n'est pas apte à générer une conception du monde nous le représentant tel qu'il serait en soi tout à fait indépendamment de nous. Je suis d'accord avec vous quand vous affirmez que même en physique classique, la question d'irréversibilité, elle aussi, en appelle au fait que les choses nous apparaissent d'une certaine manière.

Pierre Hohenberg. Quand je parle d'ontologie, je parle de l'ontologie d'un système quantique qui est, dans mon idée, simple. L'ontologie du monde, ce n'est pas mon domaine ! Ce sont des questions philosophiques très compliquées. Nous avons déjà du mal à nous mettre d'accord sur la formulation de la mécanique quantique qui correspondrait à la formulation de la mécanique classique pour un système arbitraire petit. Tous les autres problèmes d'ontologie sont nécessairement compliqués.

Hervé Zwirn. Cela fait plusieurs séances que nous consacrons à ce sujet, et nous butons toujours à la fin de nos discussions. Nous en arrivons toujours au même point dur, sur lequel il y a un désaccord, qui est le suivant. Nous tombons tout d'accord pour dire qu'il est évident que, « *for all practical purposes* » comme on dit, c'est comme cela et cela marche très bien. Personne ne le nie. Ensuite, le désaccord vient du petit glissement qu'il y a entre le « *for all practical purposes* » (où l'on constate que c'est comme cela et que personne ne nie) et la conclusion que ce serait en fait et en réalité ultime comme cela. Même si l'on ne peut pas le voir - et nous avons eu ce débat longuement sur la décohérence -, le fait de dire que l'on ne peut pas s'en rendre compte parce que

c'est hors de notre portée n'est pas la même chose que le fait de dire que si l'on avait la possibilité (que nous n'avons pas) de le vérifier, ce serait différent. Pour certains cette différence n'existe pas et ils négligent les probabilités faibles comme si elles n'existaient purement pas. Mais pour d'autres, dont fait partie Bernard d'Espagnat, même si cette probabilité est suffisamment faible, tout en n'étant pas nulle, pour ne pas avoir d'effet visible, cela fait une différence de nature ; donc on ne peut pas sauter à la conclusion ultime. C'est le débat de fond auquel nous aboutissons à chaque fois.

Pierre Hohenberg. Je sais y répondre. Ce débat se réfère à la compréhension des mesures. C'est très intéressant, et cela fait partie d'une science passionnante. Ce que je prétends, c'est qu'il y a un autre sujet : présenter une formulation de la mécanique quantique pour un système microscopique, purement du point de vue de la description de ce que la théorie envisage pour ce système. Evidemment, si l'on veut comprendre comment c'est relié au monde de la physique expérimentale, il faut se poser les questions de la mesure. Mais il faut séparer ces questions qui sont subtiles, où il y a ce petit glissement, où il y a les 10^{-40} que vous évoquiez, de la question de la formulation. D'habitude, les formulations font intervenir les mesures. Or il me semble important de distinguer la formulation minimale de toutes ces autres questions, qui sont intéressantes mais que l'on peut distinguer logiquement. J'espère que l'on peut ainsi éviter cette discussion.

Alain Aspect. Pouvons-nous tomber d'accord sur le fait que cette formulation minimale accepte le principe ou postulat qu'il y a effectivement, quelque part, un appareil de mesure classique ?

Pierre Hohenberg. Non.

Alain Aspect. Qu'est-ce qui vous donne le droit de parler de probabilité si vous n'avez pas, quelque part, un concept d'appareil de mesure classique ?

Pierre Hohenberg. Parce que j'ai défini ce qu'est une probabilité. J'en ai une définition purement abstraite.

Roger Balian. La probabilité telle que vous la définissez, c'est une probabilité au sens des mathématiciens ; c'est un nombre. Nous ne savons pas encore comment la réaliser. Nous la réaliserons plus ou moins bien avec un appareil de mesure.

Pierre Hohenberg. Oui. Je croyais que c'était ce que j'avais dit, mais vous l'énoncez probablement mieux.

Bernard d'Espagnat. Nous avons eu un exposé très intéressant puis une discussion riche et animée. Vous nous avez bien éclairés sur des possibilités, et cela va nous donner de bons thèmes de réflexion. Nous vous en remercions très vivement.