

Collège de physique et de philosophie
Séance du 31 janvier 2011

Bernard d'Espagnat. Je voudrais d'abord vous informer que j'ai été contacté par Edouard Brézin et Bertrand Saint-Sernin, qui m'ont dit, l'un et l'autre, qu'ils seraient très en retard. Le premier, parce qu'il est à l'X, où il préside un comité d'enseignement, et il ne peut pas, évidemment, s'en éclipser. le second, parce qu'il y a, en ce moment-ci, une séance de notre académie (à laquelle je ne suis pas allé, mais lui si), et un comité ensuite, donc il arrivera en retard lui aussi.

Deuxième point, il y a ici des participants qui n'étaient pas là la première fois. La première fois, nous avons fait, chacun, une petite présentation très rapide de nous-mêmes, et je vais demander aux personnes qui n'étaient pas là la première fois de bien vouloir se manifester et dire rapidement qui ils sont et à quoi ils se rattachent.

Michel Bitbol. Michel Bitbol, directeur de recherche au CNRS, je travaille au CREA, et je m'occupe de pas mal de choses, parmi lesquelles de la philosophie de la physique, bien sûr, de la philosophie des sciences, et beaucoup de philosophie de l'esprit, ensuite.

Carlo Rovelli. Je m'appelle Carlo Rovelli, je travaille à Marseille, je suis physicien. Je travaille sur la gravité quantique. J'ai toujours eu un intérêt pour l'histoire et la philosophie des sciences. J'ai écrit un livre sur l'histoire des sciences, centré sur Anaximandre.

J'ai été fortement connecté – j'ai vécu dix ans aux Etats-Unis – avec le centre d'histoire et de philosophie des sciences de Pittsburgh, parce que j'étais à Pittsburgh. J'ai travaillé un peu avec John Earman et avec John Norton. Je me suis occupé de mécanique quantique en particulier, et je travaillais sur la façon de regarder la mécanique quantique que l'on appelle mécanique quantique relationnelle.

Franck Laloë. Franck Laloë, physicien, laboratoire Kastler Brossel, collègue de Jean-Michel Raimond sur ce plan.

Jean-Pierre Gazeau. Je m'appelle Jean-Pierre Gazeau. J'ai été invité par Hervé Zwirn, mon collègue, à Paris 7. Je m'intéresse depuis quelques années, plutôt au niveau mathématique, au passage classique/quantique, aux méthodes de quantification.

Bernard d'Espagnat. Vous avez tous reçu le compte rendu de la dernière séance. Je vais maintenant demander à ceux chez qui cette lecture a suscité des remarques de lever la main, pour qu'on sache combien il y en a. [Bernard d'Espagnat lui-même, Hervé Zwirn et Michel Bitbol lèvent la main ; Jean Petitot indique qu'il s'exprimera plus tard.]

J'avais signalé des articles écrits par des philosophes. Si certains ont des remarques à faire à ce sujet, ils sont priés de lever la main à nouveau. Il n'y en a pas. Nous sommes donc peu nombreux à désirer nous exprimer et nous allons pouvoir le faire à fond. J'avais pensé proposer que les premières interventions portent sur le compte rendu (l'exposé et la discussion) et les suivantes sur les articles. Je tâcherai quand même de vous dire quelques mots sur ceux-ci si l'occasion se présente, parce que j'y vois une assez bonne introduction à ce que pensent des gens qui ne sont pas nous, et plus précisément certains philosophes non particulièrement intéressés par la mécanique quantique.

Mais pour l'instant, eh bien, c'est très simple, je vais demander à chacun de vous trois d'exprimer ce qu'il a à dire. Nous commencerons par Michel Bitbol, puisqu'il n'était pas là la dernière fois.

Michel Bitbol. Merci beaucoup, Monsieur d'Espagnat. Effectivement, je n'étais pas là, et j'ai donc lu avec beaucoup d'intérêt et d'attention ce qui a été dit lors de la dernière séance. J'ai en particulier trouvé que le débat suivant l'excellent exposé a été très riche et très révélateur. Ce qui m'a beaucoup frappé, c'est de voir émerger un accord plus large aujourd'hui que jamais auparavant, autour de ce que j'appellerai une interprétation anti-réaliste de la physique quantique. L'idée est que la théorie quantique n'est pas une représentation directe et univoque du monde. Il est vrai que plusieurs symboles de cette théorie ont reçu un nom évocateur d'une représentation, comme le « vecteur d'état » censé représenter l'état d'un système ; censé représenter, si on prend au sérieux la sémantique du mot « état », quelque chose qui est *intrinsèque* au système. Mais justement, dans la conférence d'Edouard Brézin, j'ai lu un certain nombre de nuances importantes qui mettent directement en cause cette conception standard du vecteur d'état. Par exemple, Edouard Brézin s'est demandé si on ne pouvait pas dire que l'état quantique est l'expression de notre connaissance plutôt que l'expression d'une caractéristique intrinsèque des systèmes. Il a cité à cet égard Rudolf Peierls qui aurait lui aussi émis une telle proposition, en l'offrant comme une solution du problème de la mesure. Dès que j'ai lu cette phrase dans l'exposé d'Edouard Brézin, je me suis dit qu'elle pointait vers une conception tout à fait compatible avec l'interprétation relationnelle de Carlo Rovelli. Selon Rovelli, en effet, l'état quantique n'est pas une caractéristique propre des systèmes physiques mais une caractéristique relationnelle qui dépend de la position qu'occupe l'observateur dans le processus de connaissance. Cette convergence potentielle m'a beaucoup frappé. D'autant plus que la signification de cet accord a été très bien exprimé par une intervention d'Olivier Rey, qui signalait que les paradoxes de la théorie quantique disparaissent si l'on admet qu'elle n'est pas une « science du monde tel qu'il est, mais de la façon dont nous interagissons avec lui ». La phrase rappelle des formulations célèbres de Heisenberg et de Bohr. Du coup, j'ai vu se renforcer encore ma conviction qu'un consensus recommençait à émerger autour d'une interprétation proche de celle de Bohr et de Heisenberg, après une longue éclipse de celle-ci.

Dans ces conditions, il me semble que notre collège pourrait se donner un programme qui ne se limiterait pas à discuter à fond de l'opposition entre (1) un fort réalisme scientifique et (2) une conception alliant antiréalisme scientifique et « réalisme ouvert » au sens que vous, Monsieur d'Espagnat, donnez à cette expression. Notre collège pourrait considérer que ce débat est en grande partie derrière nous, et qu'il serait intéressant désormais d'aller au bout de la lecture antiréaliste de la mécanique quantique, en essayant d'en tirer toutes les conséquences et d'en tester la validité.

Nous pourrions d'abord montrer comment une telle lecture résout ou dissout les paradoxes les plus confondants de la physique quantique. Certains intervenants ont signalé qu'elle est susceptible de désamorcer certains paradoxes (comme le paradoxe de la mesure). Je pose pour ma part l'hypothèse qu'une lecture pleinement antiréaliste est apte à résoudre *tous* les paradoxes ; et ce serait donc un bon projet que d'essayer de tester point par point cette hypothèse.

Dans le même esprit, un deuxième projet pour notre centre consisterait à chercher pourquoi une théorie qui, comme on l'admet maintenant, ne représente pas une réalité complètement extérieure à nous, complètement indépendante de ce que nous faisons en elle, est néanmoins si efficace. Pourquoi cette efficacité ? Le fameux argument du miracle des réalistes scientifiques dit que, si la théorie ne représentait pas le monde, on ne comprendrait pas pourquoi elle marche tellement bien. Y aurait-il moyen, contre les réalistes scientifiques, de

comprendre pourquoi la théorie est efficace alors même qu'elle ne représente pas de façon fidèle, et point par point, le monde ?

Enfin, le troisième projet que je vois pour certains d'entre nous consisterait à essayer de comprendre pourquoi nous avons si longtemps résisté à cette autre vision de la théorie scientifique, et en particulier de la théorie quantique ; une vision selon laquelle la mécanique quantique n'est pas du tout une représentation *du* monde, mais un inventaire de la multiplicité réglée, cohérente, de nos positionnements possibles *dans* le monde. Y a-t-il là un facteur culturel qui nous rend rétifs à la pleine acceptation d'une telle conception ?

Mais il y a un dernier point, un point que je ne peux manquer d'évoquer, puisque c'est sans doute celui-là qui intéresse le plus, et à juste titre, M. d'Espagnat. Puisque nous ne pouvons plus concevoir notre théorie quantique actuelle, qui est une théorie cadre de la plupart des théories physiques, comme une copie plus ou moins fidèle du monde, la question qui doit encore être posée est la suivante : comment devons-nous concevoir la réalité dans laquelle nous sommes plongés pour qu'elle soit ainsi résistante à tout essai de représentation ?

Bernard d'Espagnat. Oui, effectivement, il y a là toute une voie qu'il sera intéressant, en effet, d'explorer. Mais j'ai une ou deux remarques ou questions à vous poser.

Une première remarque, c'est que vous avez fait allusion à la notion que j'ai introduite de « réalisme ouvert ». Je crois avoir toujours bien précisé que cette notion n'est aucunement en contradiction avec la manière dont vous présentez la physique. Je considère au contraire, comme vous, que la physique n'est pas capable de décrire la réalité en soi. Je suis même tenté de considérer la physique quantique comme étant une théorie essentiellement opérationnaliste, autrement dit ramenant tout, directement ou indirectement, à la notion de prévision de résultats d'expériences, ce qui implique évidemment qu'elle se rapporte toujours à nous, à ce que nous verrons ou à ce que nous ressentirons. Est-ce dans cet esprit-là que vous envisagez la théorie dont vous venez d'esquisser le programme ? Ou est-ce que vous y voyez plus que simplement de l'opérationnalisme ?

Michel Bitbol. Merci beaucoup pour cette question, Monsieur d'Espagnat. Oui, je vois plus dans la théorie quantique que de l'opérationnalisme, mais pas un « plus » dans le sens de « plus de représentation de la réalité ». J'y vois plus dans le sens de « plus de justifications de la remarquable capacité de cette théorie à prévoir le résultat de nos opérations expérimentales ». Cette justification additionnelle fait bien sûr appel à la philosophie transcendantale, c'est-à-dire à une philosophie inspirée de celle de Kant. Même si du travail reste à faire dans cette direction, j'ai de bonnes raisons de croire que l'efficacité de cette théorie peut être comprise si on la conçoit, un peu à la manière de Kant, comme un recueil des conditions de possibilité d'une certaine modalité de notre connaissance. Pas la même modalité de la connaissance que celle sur laquelle réfléchissait Kant, bien sûr ; pas la modalité de la connaissance qu'examinait le Kant historique qui n'avait à sa disposition que la mécanique newtonienne. Mais l'identification de la structure du connaître dans le produit de la connaissance peut se faire dans le même esprit que lui dans tous les cas, y compris lorsqu'on s'éloigne considérablement de la mécanique newtonienne.

Travailler dans l'esprit de Kant consiste simplement ici à essayer de voir en quoi une théorie physique moderne comme la mécanique quantique n'est pas juste une sorte d'amas arbitraire de recettes, mais une structure totalement cohérente de prescriptions opératoires exprimant les présuppositions générales de nos propres interventions dans le monde environnant. Un bon exemple de ce rapport entre structure théorique et conditions de possibilité de l'action a été donné par Olivier Rey dans le compte-rendu de la dernière séance : c'est celui de la conception de l'espace que soutenait Poincaré. Chez Poincaré, l'espace est construit en tant

qu'inventaire de nos possibilités de mouvement, et la géométrie euclidienne s'ensuit. Selon cette conception, la théorie de l'espace qu'est la géométrie euclidienne n'est ni une représentation passive d'une réalité extérieure ni un empilement de recettes : elle exprime de manière optimale la cohérence des mouvements accessibles à un être à la fois sensible et capable de motricité.

Bernard d'Espagnat. C'est ça. Vous rapportez, finalement, le mouvement, la notion même de mouvement, à la notion d'être conscient.

Michel Bitbol. La conscience, je n'en ai pas parlé, pas encore.

Bernard d'Espagnat. C'est un peu dans cette direction.

Michel Bitbol. Disons que jusque là, on peut éviter de parler de conscience. On peut s'en abstenir jusqu'à ce point-là qui consiste à recueillir les conditions de possibilité d'une certaine action coordonnée dans le monde. Evidemment, on pourrait aussi décider de parler de la conscience, et ça serait très intéressant. Mais nous serions peut-être embarqués un peu trop loin de notre sujet de discussion.

Tout de même, peut-être pourrais-je introduire brièvement le thème de la conscience en disant ce à quoi me fait penser la notion de réalité indépendante. Souvent, monsieur d'Espagnat, vous parlez de la réalité indépendante en sous-entendant par là une réalité indépendante de nos esprits. En même temps, la réalité indépendante de nos esprits n'est pensable que par un esprit. Lorsque nous évoquons une réalité indépendante, nous faisons une opération d'auto-abstraction, nous nous abstrayons de cette réalité que nous voudrions penser comme indépendante de nous. Mais nous ne devrions pas oublier que cette opération d'abstraction n'est elle-même qu'un mouvement de notre esprit ! Dès lors, nous sommes forcés de reconnaître que toute réalité à laquelle nous avons affaire ne se présente jamais que comme objet (positif ou négatif) d'un acte conscient. Il ne faut perdre de vue ce fait absolument élémentaire, qui n'est pas un fait scientifique mais un fait quotidien, immédiat. Chaque fois que je décris quelque chose, je le fais à travers un acte de conscience ; chaque fois que je pense à quelque chose, c'est un acte de conscience ; chaque fois que je pense à quelque chose que ma conscience ne saisirait pas dans son champ, c'est encore un acte de conscience (la conscience que quelque chose échappe à ma conscience). Au total, la réalité ne se donne jamais que comme corrélat immédiat ou médiat d'une conscience.

Bernard d'Espagnat. Vous écartez l'acte de foi, qui consiste à dire qu'il existe une réalité extérieure à nous, autrement dit, que nous ne sommes pas les seuls existants. Mais ce qui ce qui me paraît poser question dans votre approche, c'est justement que, finalement, on a l'impression qu'elle revient à dire « nous sommes les seuls existants ». Alors, pour contrer ça, vous pouvez, évidemment, rejeter la notion d'existence, dire que le mot « exister » n'a pas de sens.

Michel Bitbol. Non, évidemment, je suis d'accord avec vous, nous ne sommes pas les seuls existants, mais il faut examiner soigneusement comment cette certitude s'affirme en nous, comment, au fond, nous *savons* que nous ne sommes pas les seuls existants. Comment donc pouvons-nous en être sûrs ? Je pense que nous savons que nous ne sommes pas les seuls existants lorsque nous prenons conscience de nos propres limites. C'est au fond le caractère limité, et compris comme limité, de notre propre existence, qui nous apprend que nous ne sommes pas seuls à exister. Nous ne pouvons pas tout faire, nous ne pouvons pas tout connaître d'un coup, nous ne pouvons pas vouloir les mouvements de notre vis-à-vis, et donc

il y a quelque chose d'autre que nous-mêmes. Au fond, même la notion d'altérité doit s'analyser à partir de notre propre expérience. Telle est la leçon d'une branche de la philosophie bien connue, qui s'appelle la phénoménologie husserlienne. Si on voulait exprimer cette leçon dans les termes plus abstraits qu'utilise la phénoménologie, on dirait ceci : *même la transcendance ne s'appréhende que dans l'immanence*.

Bernard d'Espagnat. Merci pour cette réponse sur laquelle j'ai bien l'intention de réfléchir. Pour l'heure il y a d'autres personnes qui souhaitent s'exprimer, en particulier Jean Petitot.

Jean Petitot. Je voulais faire une remarque sur ce qu'a dit Michel à la fin de son avant-dernière intervention. Ce qui est important est le terme de « corrélat », le fait que toute réalité est le corrélat d'une conscience. La critique que vous lui avez faite consiste à dire qu'un corrélat de conscience est une sorte d'inclusion dans la conscience. On en arrive aussitôt à une certaine version moderne du solipsisme. Or la grande réussite de la phénoménologie de Husserl a précisément été de comprendre comment la transcendance du monde externe peut être fondée dans l'immanence de la conscience tout en restant une transcendance externe, c'est-à-dire en évitant le solipsisme. C'est une problématique qui démarre avec Kant. L'idéalisme transcendantal est parfaitement compatible avec un réalisme empirique. Ce n'est pas du tout un solipsisme, mais plutôt une problématique de la constitution des objectivités – en particulier de l'objectivité du monde externe – dans des opérations de conscience. Comme on maintient la transcendance objective, on ne tombe pas dans un solipsisme psychologique. Il faudrait donc creuser le concept de corrélation.

C'est un concept très compliqué, mais il se trouve que dans un autre domaine – qui nous fait sortir de notre réflexion sur la physique, dont Husserl s'est beaucoup occupé et qui correspond à des recherches pointues d'aujourd'hui – à savoir celui de la perception, on rencontre un problème exactement du même ordre. Les objets du monde externe, que nous percevons comme externes à nous dans un espace tridimensionnel, sont construits à partir du traitement d'informations rétinienne internes et immanentes, et on commence à comprendre de mieux en mieux comment se constitue cette extériorité, cette conviction que les objets sont à l'extérieur et nous transcendent, c'est-à-dire comment la perception sort du solipsisme. Donc, dans le cas de la perception, on commence à comprendre ce qu'est une corrélation sujet/objet. En physique, il faudrait faire quelque chose un peu du même ordre pour l'objectivité.

Bernard d'Espagnat. Il faudra que l'on réfléchisse beaucoup sur la manière dont, vraiment, Husserl, vous ou les autres arrivent à nous sortir, non pas particulièrement du solipsisme mais de l'idée qu'il n'y a qu'un existant, qui est de la nature de la conscience. Il faudra tâcher de comprendre ça.

Il y a d'autres personnes qui voulaient s'exprimer.

Jean-Paul Baquiast. Merci beaucoup. Je voudrais vous demander de m'autoriser à sortir une seconde du domaine de la physique pour réagir à ce que propose Michel Bitbol sur le mot réalisme. J'ai la faiblesse de participer avec d'autres personnes, dont Mioara Mugur-Schächter que vous connaissez, à une réflexion sur la possibilité, sur la nécessité, dirai-je, d'étendre le non-réalisme de la physique quantique à l'ensemble des sciences macroscopiques, parce qu'on retrouve exactement le même problème de la relativité à l'observateur et à l'instrument, que ce soit en sciences humaines, en biologie...

Je dirai donc que la réflexion que vous proposez, Monsieur Bitbol, me paraît susceptible d'intéresser d'autres scientifiques que les physiciens. En tout cas, je serais très heureux qu'ici on puisse la faire progresser.

Hervé Zwirn. Je vais peut-être revenir un peu en arrière, sur le compte rendu de la dernière séance, puisqu'on parlait de ce compte rendu.

Lors de cette séance, nous avons eu une discussion lancée par Bertrand Saint-Sernin autour du problème du réalisme, notamment à propos du réalisme à la Cournot. Cela nécessitait que nous définissions de manière un peu plus précise le terme de "réalisme", pour savoir exactement ce que nous entendions dans la discussion par les différents types de réalisme qu'on essayait de décrire. Nous sommes là déjà rentrés dans le vif de la discussion, mais il me semble qu'il y a différents niveaux de discussion. Ce dont on parle, depuis tout à l'heure, c'est essentiellement ce que l'on pourrait appeler le réalisme métaphysique, c'est-à-dire le fait de savoir si, oui ou non, il existe une réalité indépendante de l'esprit de tout observateur. Ça, c'est un premier problème.

Le deuxième problème, qu'on mélange quelquefois avec le premier, et cela introduit parfois un certain nombre d'ambiguïtés, c'est le fait de savoir si cette réalité est intelligible et si la physique actuelle, telle qu'elle est constituée, décrit adéquatement cette réalité.

Il y a donc, je dirais, trois problèmes, de natures différentes, qui bien évidemment sont liés mais qu'on a quelquefois tendance à confondre, et cela aboutit à un certain nombre de raisonnements approximatifs. Existe-t-il ou pas, une réalité indépendante de tout esprit ? Est-ce que cette réalité, si on admet qu'elle existe, est intelligible ? Est-ce que la physique est le bon instrument pour en rendre compte ? Ce sont trois sujets que lors de la dernière séance on a peut-être mis ensemble sans faire de distinctions suffisantes.

Sur la thèse du réalisme métaphysique, il existe un certain nombre de grands arguments historiques – ils ne sont pas nouveaux – et philosophiques. Il est vraisemblable que les discussions qui ont eu lieu autour de ces discussions sont rénovées d'une certaine manière par la mécanique quantique.

Les grands arguments, les plus connus, quels sont-ils ?

Il y a, tout d'abord, ce que Hume appelait la relation cause - effet. Pourquoi va-t-on postuler l'existence d'une réalité extérieure ? Par exemple, pourquoi est-ce que, lorsqu'on entend quelqu'un parler dans la pièce d'à côté, on va avoir tendance à inférer qu'il y a une personne ? Eh bien, parce que chaque fois qu'on a entendu quelqu'un, il y avait quelqu'un à côté, quand on est allé vérifier. Hume remet cela en cause puisque c'est une inférence inductive, et vous connaissez tous la critique de Hume sur l'induction. Ce type d'inférence n'est pas valide.

Dans le même style d'argument, quand on voit une forme devant nous, un plateau avec quatre pieds, on a tendance à en inférer qu'il existe une table extérieure à nous qui rend compte de cette perception. Hume critique cela aussi, en disant que l'hypothèse selon laquelle il existe réellement une table n'est rien d'autre qu'un agencement commode de nos perceptions, et là je vois dans cet argument le début de la phénoménologie. Husserl a été beaucoup plus loin, et ce sera très intéressant de reboucler là-dessus.

Et puis il y a le fameux argument, que Bernard d'Espagnat a mis en avant également, selon lequel, les expériences que nous faisons ne donnent pas toujours des résultats en accord avec nos théories scientifiques. Il y a quelque chose qui dit « non ». Donc la réalité résiste, et cela est souvent pris comme un argument en faveur du fait qu'il existe quelque chose d'autre que notre esprit. Cet argument-là peut être critiqué. L'exemple le plus simple de critique qu'on peut en faire est que, dans nos rêves, nous ne faisons pas ce que nous voulons et pourtant nos rêves ne sont qu'une pure invention de notre esprit. Nos rêves nous résistent. Donc le fait même qu'un certain nombre de choses nous résistent ne prouve pas qu'elles sont extérieures à nous.

Il y a un autre argument qu'on peut avancer, que je défends, mais qui nous entraîne plus loin, c'est que nous avons à mettre en correspondance deux constructions mentales : D'un côté, une construction mentale de la réalité extérieure au sens que l'on a indiqué tout à l'heure. Comment construit-on dans notre esprit le fait qu'il existe des objets qui sont à l'extérieur ?

Comme le disait Jean, ce n'est pas parce qu'on a l'impression qu'on construit quelque chose à l'extérieur que c'est une raison suffisante pour légitimer le fait qu'il y a quelque chose d'extérieur. D'un autre côté, une construction qu'on va dire mathématique, qui est celle de nos théories scientifiques. Ce sont deux constructions qui se font avec des modes mentaux complètement différents. La perception de la réalité extérieure se construit dès l'enfance et elle est intuitive d'une certaine manière ; la construction des théories scientifiques se fait au fur et à mesure, et elle est basée sur d'autres notions. D'une certaine manière, le fait que les deux, quelquefois, ne collent pas parfaitement bien, n'est finalement pas si surprenant. Donc je pense qu'au contraire l'idée que quelque chose nous résiste est un argument pour dire que ce sont des choses que nous avons construites, mais de manière indépendante, et que les faire coller ensemble n'est pas si simple. La cohérence d'une théorie mathématique est un problème complexe et la cohérence de deux constructions indépendantes, le fait qu'elles soient consistantes entre elles, et la démontrabilité de cette consistance, est quelque chose d'extrêmement hypothétique. Evidemment, ce sont des analogies, puisque la construction mentale de la réalité n'est pas une théorie mathématique, mais ce sont des analogies qui poussent dans ce sens-là.

Enfin, le dernier point, c'est l'argument mis en avant essentiellement par Putman qu'il n'y a pas de miracle. Ça, c'est un argument qui me paraît très faible. Il consiste à dire que nos théories marchent tout simplement parce qu'il y a une réalité auxquelles elles correspondent. Que si ça n'était pas le cas, ce serait un miracle que nos théories marchent... Mais le nombre énorme de théories du passé qui ont marché, qui ont été empiriquement adéquates, c'est-à-dire qui ont sauvé les phénomènes, comme dit van Fraassen, et qui, pour autant, se sont révélées fausses montre que ce n'est pas parce qu'une théorie marche que, pour autant, elle correspond à une réalité extérieure qu'elle décrit précisément.

Cela est une introduction au thème de la séance d'aujourd'hui qui était le réalisme structurel. Ce qui semble rester à la fin, si on veut vraiment sauver quelque chose, eh bien, ça n'est pas l'ontologie des théories, dont on peut voir très facilement qu'elle a été remise en cause et démontée au fur et à mesure des évolutions des théories scientifiques, c'est vraisemblablement la structure, dans un sens à préciser sans doute, de ces théories, ce qui nous mène, effectivement, au réalisme structurel. Mais le réalisme structurel a eu différentes évolutions, plus abstraites qui semblent sauver une sorte de réalisme, qui n'est pas un réalisme ontologique au sens du réalisme scientifique naïf.

Bernard d'Espagnat. Dans votre premier livre et également dans un récent article, vous introduisez quand même très nettement la notion d'une réalité extérieure à nous. Vous considérez, quand vous définissez votre réalité empirique – nous en discutons tout à l'heure entre nous, avant la séance –, qu'il y a quelque chose qui n'est pas nous, qui nous oblige de ne pas penser n'importe quoi, qu'il y a quelque chose qui nous résiste. Je ne vois pas très bien le lien entre ça et ce que vous venez de dire, parce que ce que vous venez de dire semble arriver à la conclusion que, finalement, tout ça, ce sont des choses construites par nous.

Hervé Zwirn. Le lien est le suivant : je ne suis pas solipsiste. Le solipsisme est de toute façon une position dont on sait qu'elle est irréfutable. Je ne suis pas solipsiste parce que réduire tout ce qui existe à quelque chose qui nous est intérieur (ou qui m'est intérieur) est une position qui me paraît à la fois stérile et peu convenable, d'une certaine manière.

Olivier Rey. Une forteresse imprenable défendue par un fou !

Hervé Zwirn. La position selon laquelle rien d'autre n'existe que ce que je pense ou que ce que je conceptualise ne me satisfait pas.

Bernard d'Espagnat. J'avais l'impression que ça satisfaisait Michel Bitbol !

Michel Bitbol. Peut-être que je peux m'expliquer un tout petit peu plus pour lever cette hypothèse. Je ne suis pas le fou de la forteresse imprenable !

Olivier Rey. Je confirme, je partage son bureau !

Michel Bitbol. La question est de savoir quel est le sens de l'extériorité dont on parle. Qu'est-ce que ça veut dire, une réalité extérieure à nous ? Etant donné qu'on a l'intuition immédiate d'une extériorité spatiale, lorsqu'on parle d'une réalité extérieure on a tendance à représenter cette extériorité à l'image de la distance qui sépare mon corps et tous ces corps qui l'entourent. Or, je crois que la véritable extériorité dont on devrait parler ici, l'extériorité de la réalité extérieure n'est pas de cet ordre là. C'est une extériorité non-spatiale, au sens d'un dépassement vis-à-vis de ce que je peux faire ou de ce que je peux saisir ; c'est un excès par rapport à ma propre finitude. Un certain nombre de caractérisations non-spatiales de l'« extériorité » de la chose en soi ont d'ailleurs été proposées dans l'histoire des philosophies post-kantiennes, et cela peut nous aider à formuler un sens adéquat, non-métaphorique, de son échappée par rapport à nous. Je pense par exemple à Schopenhauer, qui, au lieu de caractériser la chose en soi comme une *chose*, justement, comme une chose qui nous serait extérieure au sens spatial, l'a caractérisée comme « la volonté », c'est-à-dire comme une sorte de pulsion complètement obscure que nous ressentons intérieurement et qui nous conduit à accomplir des actions sans que, véritablement, nous sachions pourquoi. Cette obscurité même de nos motivations à agir montre que, de fait, nous sommes débordés de toutes parts, que nous ne sommes pas seuls, et seuls maîtres de notre vie et de notre connaissance ; elle montre qu'il y a quelque chose de beaucoup plus vaste que nous qui agit par nous, en nous, et à travers nous. Ce trait de dépassement et de non-maîtrise de la « Volonté » au sens de Schopenhauer peut en somme être une caractérisation alternative de l'extériorité de la chose en soi.

Bernard d'Espagnat. Cela, vous l'acceptez ?

Michel Bitbol. Je trouve que ce n'est pas mal du tout. En tout cas, cela nous offre une vision de rechange plausible de l'extériorité. Kant, d'ailleurs, avait anticipé Schopenhauer lorsqu'il écrivait une très belle phrase isolée et pleine de perplexité dans sa *Critique de la raison pure*. Cette phrase, que j'ai notée avec beaucoup de passion et que j'ai commentée dans mon livre *De l'intérieur du monde*, est la suivante : « (...) concertant un tel noumène, nous ne connaissons pas du tout s'il se trouve en nous ou encore hors de nous (...) »¹. Bien sûr, pense Kant, la chose en soi « nouménale » (au sens où elle est seulement pensée comme un concept-limite) pourrait nous être extérieure au sens traditionnel, essentiellement spatial ; mais elle pourrait aussi bien être un simple prolongement de nous-mêmes, qui nous excède de toutes parts et qui manifeste par cet excès que nous ne sommes pas seuls, que nous n'enfermons pas tout *ce qui est* dans les bornes de notre conscience. Donc, on ne tombe pas dans le solipsisme, mais on ne pose pas non plus d'extériorité au sens banal du terme, on ne pose pas une complète séparation de ce qu'il y a vis-à-vis de nous.

¹ I. Kant, *Critique de la raison pure*, B344

Bernard d'Espagnat. On pourrait peut-être tenter un certain rapprochement entre ce que vous dites et l'attitude néoplatonicienne, l'attitude, en particulier, des disciples chrétiens du néoplatonisme. Même Saint-Augustin, avec son « maître intérieur », fait un peu penser à ce que vous dites.

Michel Bitbol. Tout à fait. Je suis parfaitement d'accord avec vous. Je pense que ça sera un beau thème de discussion à venir ; mais il ne faut peut-être pas le développer aujourd'hui, parce que nous avons d'autres sujets à traiter.

Hervé Zwirn. Pour aller dans le même sens, par rapport au refus du solipsisme, je dirai que, effectivement, ce que j'ai eu comme discours tout à l'heure pouvait laisser penser que je n'admettais pas qu'il existait autre chose que quelque chose qui vienne de nous. Mais ces arguments-là, joints au refus du solipsisme, donnent, d'une certaine manière, une base à partir de laquelle on peut construire ce qui c'est. C'est-à-dire : refus du solipsisme, donc tout ne vient pas de nous, mais en même temps, refus des arguments que j'évoquais tout à l'heure, pour penser une réalité de la manière traditionnelle dont on peut la penser, c'est-à-dire, comme le disait Michel, de manière extérieure, etc.

Bon, j'aime bien la métaphore que tu as prise de Schopenhauer. D'une certaine manière, c'est tout ce qui contraint, tout en étant en partie extérieur à nous parce que ça ne provient pas de nous mais c'est en même temps lié à nous, tout ce qui contraint la manière dont on peut appréhender le monde, toutes les contraintes qui concernent nos perceptions. Dans la discussion qu'on avait tout à l'heure, on parlait de la différence entre réalité empirique et réalité phénoménale. C'est ce que j'ai appelé la réalité empirique, qui justement n'est pas spatialement séparée de nous, qui n'est pas constituée d'objets, de choses, d'entités, de champs, de vecteurs, de tout ce qu'on veut, mais qui est en fait un mélange entre quelque chose d'extérieur et quelque chose qui provient aussi de nos catégories, de la manière dont nous pouvons ensuite appréhender les phénomènes, ou créer les phénomènes, parce que je pense que d'une certaine manière nous créons ce que nous percevons.

Carlo Rovelli. Quelques réflexions pas très structurées, pour réagir à ce que vous avez dit et un peu appuyer ce que Michel a dit. Ce que je voudrais dire a à voir avec la certitude et l'évolution de la connaissance, surtout la certitude. Il me semble que la discussion, ici, est autour de la possibilité de fonder de façon certaine une croyance dans la réalité, ou un manque de croyance dans la réalité, ou une interprétation, une lecture de ce qu'est la connaissance, de comment la connaissance marche. Ce que je voudrais porter, au contraire, au centre de la discussion, c'est l'aspect du manque de connaissance, du manque de certitude qui est dans notre savoir.

Michel, tu as parlé de cette intuition fondamentale qui est que les éléments de la réalité on les perçoit toujours à l'intérieur de notre conscience, donc corrélat de la conscience, intuition fondamentale et aussi, je dirai, très ancienne : c'est les Upanishads. C'est vrai, sans aucun doute. En même temps, il est aussi vrai que cette conscience se forme lentement quand nous apprenons à penser au monde. Les sciences du développement nous apprennent que, d'abord, la réalité est sans soi, et après on ajoute le soi à la réalité, et encore après on commence à distinguer la réalité par soi, en développant une idée de la réalité indépendante de soi. Donc laquelle vient d'abord dans notre développement ? Première question.

Deuxième question : dans tout ça, on a parlé d'esprit. Vous avez tous parlé d'esprit, vous avez tous parlé de nous, notre position. Chaque fois que j'entends parler de ça, j'ai toujours un peu de confusion. J'ai toujours fait cette confusion quand j'étais à l'école, qu'on me parlait de Hegel . L'esprit, c'est qui ? C'est moi, Carlo ? C'est toi, Michel ? C'est nous tous ensemble

quand nous parlons ? C'est nous, ici, en tant que groupe ? C'est toute la communauté qui parle ensemble ? Qui est cet esprit ? Qui est la conscience ? C'est mon esprit ? C'est le nôtre ? Où faut-il que je le mette ? Je pense que, là aussi, il y a quelque chose à apprendre. C'est-à-dire : la constitution de la réalité se fait bien sûr comme dans la critique de l'empirisme classique, parce qu'il y a des régularités dans la perception, etc., etc. Il y donc ce parcours, qu'on connaît bien, mais il y a aussi autre chose. Moi, j'ai une idée de moi, j'ai une idée de ma conscience, mais j'ai des amis. Depuis que je suis petit, j'ai des amis : je parle avec toi et j'ai une idée de toi. Dans l'idée de toi, je commence lentement à m'apercevoir que tu es très similaire à moi, et que, quand moi je vois une ombre, toi aussi tu vois une ombre. Tu me dis « je vois une ombre » et j'entends que c'est la même chose que je te dis quand je vois une ombre. Donc j'ai une construction mentale dans laquelle il n'y a pas simplement la réalité, mais il y a aussi d'autres qui perçoivent la réalité, et il y a une étonnante similarité entre ma perception de la réalité et ce que les autres me disent qu'ils perçoivent de la réalité. Du coup, dans cette réalité, je mets quelque chose de complètement nouveau : c'est moi, en tant qu'un parmi beaucoup d'autres autour de moi, similaires à moi. Donc à l'intérieur de la réalité il y a maintenant quelque chose qui s'est formé dans ma construction, qui est ma conscience – la mienne –, perçue comme un élément de la réalité extérieure, seulement une copie de ce que je vois les autres faire et dire.

Evidemment, on y passe tous, l'humanité est passée par là et on se pose la question : si je veux fonder une connaissance sûre, d'où est-ce que je pars ? C'est un peu ça la question que nous nous posons, mais est-ce que c'est la bonne question ? Est-ce que c'est ça qui nous intéresse ?

Le problème du réalisme, vous l'avez brisé en morceaux. D'abord, est-ce qu'il y a une réalité indépendante ? Deuxièmement, est-ce qu'elle est intelligible ? Troisièmement, est-ce que la physique la décrit ? On a appris plein de choses à partir de la fin de la physique classique. Les théories d'aujourd'hui sont probablement fausses dans le sens dans lequel la mécanique classique est fausse... Donc on sait que notre connaissance est limitée. Qu'est-ce que ça veut dire ? Ça veut dire qu'on accepte l'idée qu'on peut penser au monde avec un niveau d'incertitude et, en dépit de ça, vivre dans le monde et interagir avec le monde. Je pense que c'est là la leçon cruciale de la fin du dernier siècle, c'est-à-dire que nous avons appris que nous pouvons penser à la réalité sans nous demander où est la base de notre connaissance, mais quand même en utilisant la connaissance elle-même. Alors, qu'est-ce que c'est, la réalité ? C'est la réalité décrite par les théories physiques, avec la conscience forte qu'il y a des limitations évidentes : comme la mécanique classique de Newton est fausse, probablement celles-ci sont fausses aussi. Ce que nous avons dans la physique, c'est la meilleure façon de penser au monde aujourd'hui, maintenant, et la meilleure façon de conceptualiser le monde maintenant ; pas plus mais aussi pas moins.

Alors, dans cette théorie qui, apparemment, marche bien, la mécanique quantique, dans cette découverte du monde qui n'est pas personnelle mais communautaire, de la communauté des savants qui ont développé la science, on trouve des limitations fortes à l'idée d'une description précise et réaliste, dans un sens plus fort que celui de la mécanique classique. Il me semble qu'on se rend compte – c'est la lecture que plein de gens font – que la mécanique quantique nous dit que certaine vision de cette réalité, comme formée par exemple (je simplifie), dans l'atomisme classique ou l'atomisme de Démocrite, comme l'espace où il y a des particules qui voyagent, ne marche pas. La meilleure description que nous avons besoin de faire tient compte du fait qu'il y a des systèmes qui interagissent les uns avec les autres et c'est plus une description de la connaissance de ces systèmes, et là, Michel, je te suis à 100 %, comme tu le sais bien.

Nous avons appris que, cette réalité complexe qu'on a développée, c'est plus compliqué que ce que nous avons appris, mais nous venons de l'apprendre. Est-ce que c'est vraiment

nécessaire de savoir le rôle précis de la notion de réalité pour utiliser la notion de réalité ? Je pense que non. Celle-ci est une découverte récente de la science.

J'arrive à une question plus précise. Toi [Michel Bitbol], tu parles de Kant, du kantisme. Tu nous demandes de retourner là. Evidemment, je te suis, mais j'ai aussi une question. Je trouve deux choses dans ce que je connais de Kant. L'une, c'est le rappel fort qu'il faut prendre en compte les conditions nécessaires de la connaissance. Je ne peux pas décrire la réalité en soi, il faut que je me rappelle que ce que je décris c'est la réalité perçue par moi et qu'il y a des conditions pour la percevoir. Ça, c'est la science elle-même qui nous donne cette information parce que – maintenant, je reviens à notre point de départ – je peux me réinterpréter non pas comme le contenant de tout mais aussi comme l'objet décrit par la science, où arrivent des informations très partielles sur le monde, et qui, en tant que tel, construit des images mentales, constructions mentales qui ont à voir avec l'extérieur mais qui sont complètement séparées de l'extérieur. Je pense que Kant lui-même avait cette idée de la non-cognoscibilité de la réalité, due aux conditions concrètes. Ça, c'est Kant I, mais Kant II dit : en dépit de ça, quand même, il y a une possibilité de raisonner sur ça, qui me donne *a priori* des informations sur le monde, sur la structure possible de la réalité comme je la perçois, auxquelles je peux arriver individuellement dans la connaissance. Il me semble que le développement même de la mécanique quantique nous éloigne de ça. Nous nous sommes aperçus qu'il y a ces limites dans le réalisme, non pas en réfléchissant sur les conditions de la connaissance mais en faisant des expériences. Le monde n'est pas ce que je pensais ; les particules, c'est plus compliqué. Peut-être, pour le penser, j'ai besoin de reconstruire une description du réel de laquelle je fais partie, donc c'est une construction de relation où je suis partie, et donc tenir compte des connaissances auxquelles je n'aurais pas pu arriver *a priori*. Dans ce sens-là, il y a un éloignement du kantisme classique, du Kant de la *Critique de la raison pure*.

Dernier point, et je conclus. Si on prend cette attitude, selon laquelle on ne connaît pas le point de départ, ce qu'on sait mieux sur le monde, c'est ce que la science est en train de nous dire sur le monde, en sachant très bien qu'il y a des limites à ça et que ça va évoluer. Donc la conceptualisation que nous faisons du monde évolue elle-même, donc il n'est pas si nécessaire de s'accrocher à un point de départ central, où il y a la certitude sur ce qui existe et ce qui n'existe pas. Bien sûr qu'il y a la réalité ! Il n'y a pas besoin de questionner cela. Tout le monde est d'accord, il y a une réalité extérieure et bien sûr que tout ça est à l'intérieur de ma perception. Cela suffit pour commencer à comprendre comment ça marche.

Si je prends ce point de vue, moi, je trouve que le réalisme structurel, d'un côté, ça nous dit « regardez les structures, c'est très intéressant, il y a des choses intéressantes, peut-être qu'on peut conceptualiser les objets en termes de structures », très bien, ça m'intéresse. Ça m'intéresse beaucoup moins si c'est une suggestion de dire « ah, finalement, on a trouvé la chose finale qui ne change pas ». Non, on n'a pas trouvé la chose finale qui ne change pas. Je ne suis pas capable, dans tous les textes que j'ai lus, de comprendre ce qu'est cette structure qui ne change pas dans l'histoire de la science. Je ne vois pas, dans l'histoire de la science, une structure qui ne change pas. Je trouve au contraire que toutes les structures ont changé, il y a des objets qui ont changé très peu : le soleil est toujours le soleil, on parle toujours de soleil, de Ptolémée jusqu'à la théorie solaire moderne le soleil, c'est toujours le soleil. Il y a donc une permanence de l'objet, une permanence des structures, et il y a une faiblesse de l'objet et une faiblesse même des structures plus fortes. C'est vrai qu'il y a des lois, comme la loi de Fresnel, qui sont passées sans être trop détruites de la mécanique classique à la mécanique quantique, mais il y a bien des lois qui avant étaient bonnes et après n'était pas bonnes. Donc je ne vois pas du tout la structure comme une possible ancre finale.

Michel Bitbol. Le problème, c'est que tu as soulevé quantité de points importants dans ton intervention ! Mais je peux me focaliser sur un ou deux points. Prenons déjà ton dernier

argument, celui de la constance de certaines structures à travers l'histoire des sciences. Il y a bon nombre de philosophes des sciences contemporains, dont Bas van Fraassen, qui ont fait remarquer que les seules structures qui persistent de façon *absolument* permanente au cours de l'histoire des sciences, ce sont des structures purement empiriques, c'est-à-dire, par exemple, la trajectoire apparente de Mars, ou les calculs qui sont directement afférents à la trajectoire apparente de Mars. Oui, cela reste constant. Il y a aussi certains noyaux formels prédictifs qui restent pratiquement intacts d'une théorie à l'autre, parce que, bien entendu, il faut pouvoir, dans la théorie nouvelle, retrouver les structures prédictives efficaces de la théorie ancienne. Donc, cette constance de certaines structures n'est pas aussi surprenante qu'on le dit quelquefois, parce qu'elle ne fait qu'exprimer la pérennité des régions d'efficacité qui avaient déjà été atteintes dans le passé et parce qu'elle se limite à des structures aussi proches que possible de l'empirique. Il y a peut-être aussi certaines structures permanentes des théories scientifiques qui s'éloignent beaucoup plus de l'empirique, comme les lois de conservation ou les principes d'optimisation, mais d'autres en parleront mieux que moi.

Deuxième point très important : à propos de Kant et de la physique quantique. Quelle est la différence entre la démarche originale de Kant et la démarche d'esprit kantien qu'on peut adopter à propos de la physique quantique ? Eh bien, l'une des différences majeures – je pense que Jean en verrait beaucoup d'autres – c'est celle-ci : selon Kant, la constitution d'objectivité appropriée à l'univers macroscopique, à l'univers tel que le décrit la physique classique, est suffisamment efficace pour qu'on puisse se comporter à l'égard de cette physique *comme si* elle décrivait une réalité complètement indépendante de nous. C'est le fameux « comme si » kantien (*als ob*). En employant cette expression, Kant insiste entre les lignes pour dire que ce n'est justement qu'un *comme si* : l'objet de la description classique se comporte comme s'il était une réalité indépendante, mais il ne l'est pas, et on peut s'en convaincre aisément par un argument épistémologique. En effet, si l'on veut expliquer l'efficacité de la science autrement que par le fameux dispositif de la plus haute correspondance avec la réalité, que Kant jugeait hautement problématique, il faut absolument considérer que les objets *ne sont pas* des choses en soi, que les objets sont *constitués* par les procédés dont nous avons besoin pour former une connaissance qui vaille relativement à n'importe quel point de vue, pour tout le monde, à tout instant, et en tout lieu. C'est la fameuse clause intersubjectivité. Mais ce « comme si », en physique quantique, ne fonctionne plus. Il y a en effet quantité de structures des prévisions quantiques, quantité de phénomènes prévus d'ailleurs corroborés par l'expérience, qui ne s'agencent pas à la manière remarquablement structurée de la physique classique. En l'absence de ces structures-là, nous ne pouvons même plus faire *comme si* nous avons affaire à des objets complètement indépendants de nous. La différence majeure entre les deux physiques, c'est cela, c'est cette possibilité dans un cas, et cette quasi-impossibilité dans l'autre cas de faire *comme si* ce que nous étudions était radicalement séparé de nous. L'idée épistémologique de base est pourtant la même ; en physique classique comme en physique quantique, les structures de la connaissance découlent des conditions de possibilité de former un savoir communicable et partageable par tous. Mais il y a des cas où on peut oublier toute cette construction et se comporter exactement *comme si* toutes les choses étaient indépendantes de notre pouvoir de construire, et d'autres cas où on ne le peut pas. La physique quantique, c'est cela : c'est la situation scientifique ultime où Kant est obligatoire, alors qu'il était seulement optionnel en physique classique.

Bernard d'Espagnat. J'aurais tendance à caractériser cette différence dont vous parlez en disant que Kant croyait à une physique descriptive, pour décrire les phénomènes « comme si » ils existaient réellement, alors que la physique quantique me paraît essentiellement prédictive.

Michel Bitbol. Absolument

Bernard d'Espagnat. C'est ça. Je crois que l'essence de la physique quantique, finalement, c'est d'être prédictive, c'est comme ça qu'elle marche. Elle marche à tous les coups, quand on la prend sous cet angle-là.

Michel Bitbol. Absolument

Jean Petitot. Mais la mécanique classique est très prédictive.

Bernard d'Espagnat. Oui, mais elle était aussi descriptive ! Elle était les deux.

Jean Petitot. C'est même pour ça qu'elle était si paradigmatique. Elle est prédictive de façon extraordinaire.

Michel Bitbol. Exactement. Mais la mécanique classique est prédictive parce qu'elle est descriptive. La prédiction *découle* ici d'une description. En revanche, en physique quantique, la prévision est avancée en quelque sorte à l'état nu. Il n'y a aucune vraie description d'un processus spatio-temporel qui sous-tende la capacité prédictive de la théorie. La raison profonde pour laquelle il en va ainsi, c'est que les phénomènes quantiques sont entièrement suspendus aux conditions expérimentales de leur apparition, ce qui n'est pas le cas en physique classique. Ce sont des phénomènes au sens le plus évident du terme, c'est-à-dire au sens d'événements qui se manifestent au laboratoire devant tout le monde ; mais pas au sens des physiciens qui, à mon avis, confondent souvent, dans leur vocabulaire, phénomène et processus. Un processus, c'est ce qu'on reconstruit comme se passant dans le monde ; un phénomène, c'est ce qui apparaît au laboratoire, ou ce qui apparaît devant nos yeux.

Jean Petitot. Il y aurait beaucoup à dire là-dessus, parce que, tu sais, la rétine est un très joli appareil quantique. C'est un détecteur de photons admirables.

Jean-Michel Raimond. Si je puis me permettre, le principe de superposition quantique ne joue absolument aucun rôle. La difficulté de la physique quantique ne joue aucun rôle dans le fonctionnement des organismes biologiques.

Jean Petitot. . Oui, mais je veux dire que c'est un très joli appareil de mesure.

Jean-Michel Raimond. Oui, mais le fait de voir des photons uniques, ou presque, n'implique pas que le fonctionnement de la rétine repose sur tout ce qui fait la difficulté conceptuelle de la mécanique quantique.

Carlo Rovelli. Vous ne pensez pas que Penrose ait une chance...

Jean-Michel Raimond. Je ne pense pas que Penrose ait raison. Mon intuition viscérale est qu'il n'a pas raison.

Jean-Pierre Gazeau. J'ai une question à ce sujet: qu'appellez-vous réellement « descriptif » ? Que veut dire ce mot? Quelles sont les limites que vous apportez à cette notion? Pourquoi affirme-t-on que la mécanique quantique n'est pas une science descriptive ? Je n'ai pas du tout de formation philosophique mais suis très intéressé par ce genre de discussion.

Michel Bitbol. Pour aller vite, on considère qu'il existe quelque chose d'extérieur (des propriétés intrinsèques d'objets), dont on donne un compte-rendu fidèle. On dit qu'on a fait une description lorsqu'on a présenté une copie symbolique des propriétés et des processus qui existent indépendamment des expériences que nous faisons pour les connaître. Mais supposez qu'il n'y ait rien qu'on puisse traiter comme indépendant de nous, qu'il n'y ait pas de propriétés intrinsèques, qu'il y ait seulement des phénomènes expérimentaux au sens de manifestations apparentes suscitées par le fonctionnement d'un appareillage. Dans ce dernier cas, on n'a plus rien à décrire parce qu'il n'y a plus rien dont on puisse faire une copie symbolique. Il est vrai qu'on utilise des symboles en physique quantique, mais ces symboles sont simplement des prédictors de phénomènes.

Carlo Rovelli. Est-ce qu'on ne va pas trop loin, là ?

Hervé Zwirn. Nous sommes beaucoup, autour de cette table, à être d'accord avec le fait que ça n'est pas descriptif, mais on est d'accord parce qu'on partage tous un point de vue qui n'est pas si évident que ça. Il n'est pas partagé par tout le monde, notamment pas par beaucoup de physiciens qui ne se posent pas ces questions-là. Ce que tu viens de dire, Michel, suppose qu'on accepte de dire que la mécanique quantique n'est pas descriptive, qu'on a déjà adopté le point de vue selon lequel le réalisme scientifique n'est pas une position tenable. Et quand on abandonne le réalisme scientifique qui suppose qu'il y a effectivement une réalité extérieure à l'observateur et qu'est censée décrire la théorie scientifique, alors on dit « la mécanique quantique n'est pas descriptive ». Mais dire cela implique qu'on abandonne l'idée d'un réel extérieur.

Bernard d'Espagnat. On abandonne l'idée d'un réel extérieur descriptible mais on l'abandonne parce qu'on a des raisons.

Hervé Zwirn. On a bien sûr de bonnes raisons de le faire, mais ça n'est pas une position *a priori*, c'est une position *a posteriori*, quand toute tentative de maintien de l'idée selon laquelle il y a une réalité indépendante, extérieure à l'observateur se montre incompatible avec tout un ensemble de choses qui relèvent de la mécanique quantique. Ou plutôt d'ailleurs, du monde quantique au sens large. On peut prendre les théories autres que la mécanique quantique. Les expériences de non-localité, de contextualité, etc., ne supposent pas forcément qu'on soit dans le cadre de la mécanique quantique orthodoxe. Et bien, ces expériences-là montrent que tenter de préserver une attitude réaliste qu'on va dire « classique » ne marche pas. Donc on est conduit à l'abandonner après analyse, et si on l'abandonne, alors, effectivement, le discours scientifique n'est plus descriptif, parce qu'il n'y a rien à décrire, ou du moins, ce qu'on a à décrire n'est pas extérieur à nous.

Matteo Smerlak. Comme Jean-Pierre Gazeau, je suis troublé par cette affirmation que la mécanique quantique ne serait pas « descriptive ». J'ai le sentiment que ce qui sous-tend cette opinion est l'idée que les phénomènes sont suscités par l'intervention d'un appareillage. Ma question est donc la suivante. On sait que les étoiles à neutrons sont stables en raison de la répulsion quantique des fermions ; qu'entend-on par intervention d'un appareillage dans ce cas ? Répondre à cette question permettrait peut-être de préciser le sens de la notion d'intervention en mécanique quantique.

Carlo Rovelli. Il me semble que ce que la mécanique quantique nous dit c'est qu'il y a des limites à la possibilité de décrire ce qui se passe, au sens où la mécanique classique était

capable de décrire ce qui se passe. De là à dire qu'il n'y a pas de description du tout... il me semble que c'est un saut trop fort.

D'après la Wikipedia, que M. d'Espagnat nous a suggéré de lire, le réalisme, c'est l'idée qu'il y a un monde indépendant de soi. Si le réalisme veut dire la croyance, au sens limité de certitude, qu'il y a un monde extérieur à nous, je pense que nous sommes tous réalistes. Il y a un monde en-dehors de nous. Moi, je ne pense pas que la seule chose qui existe au monde c'est Carlo Rovelli. Est-ce que vous pensez que la seule chose qui existe au monde c'est Carlo Rovelli ? Je pense qu'en-dehors de Carlo Rovelli il y a d'autres choses, que j'appelle monde, même si c'est une projection de mes rêves. Voyez le rêve du papillon, le philosophe chinois se demandant au réveil s'il n'est pas le rêve du papillon. Même ça, ça ne change pas vraiment le fait que, dans mon rêve, moi, j'interagisse avec le monde, j'ai affaire avec le monde. Donc la notion de réalité est essentielle pour travailler, il me semble. Le fait qu'on mette des limites sur la forme de cette réalité, sur ce qu'on peut en dire ne veut pas dire qu'il est utile de renoncer à la notion de réalité. Entre le réalisme à la mécanique classique, ou à la Démocrite et Leucippe, et l'irréalisme complet, où nous n'avons pas besoin de penser à une réalité à l'extérieur de nous, il y a un énorme espace. Donc ce n'est pas parce qu'on s'est trouvé forcé, empiriquement, d'abandonner une descriptivité précise, forte ; de la réalité qu'il faut sauter dans le fossé, il me semble. Exemple : les étoiles à neutrons.

Plus que ça, il me semble que la mécanique quantique – je mets un peu les pieds dans le plat, maintenant – ne nous dit pas du tout que mes observations sur un phénomène sont la seule chose dont je peux parler. La mécanique quantique ne parle pas seulement de ce qui se passe dans le laboratoire. Elle parle de ce qui se passait à l'autre bout de l'univers, de ce qui se passe dans l'astrophysique, de ce qui se passe dans les atomes quand on ne les observe pas, de la couleur de la lumière, témoignée par l'équation de Schrödinger, même sans qu'on la regarde. J'en suis convaincu, de cela. Elle parle des interactions, elle parle de ce qui se passe dans un système quand il interagit avec d'autres.

On peut penser à la mécanique quantique sans nécessairement faire référence à la conscience de l'expérimentateur, lorsqu'on parle des étoiles à neutrons, par exemple, mais en renonçant à la descriptivité du réel. Donc on abandonne la possibilité de décrire la réalité aussi précisément que la mécanique classique, mais on parle quand même d'une réalité où il y a des interactions, où il y a des choses que je peux décrire.

Hervé Zwirn. Je crois que, dans ce débat sur le réalisme, Bas van Fraassen donne une bonne description, volontairement, caricaturale de ce que c'est que le réalisme scientifique. Il dit : il faut prendre la théorie au pied de la lettre. Au pied de la lettre, ça veut dire quoi ? Ça veut dire que, quand il y a une théorie comme la mécanique quantique, qui dit qu'il y a des électrons, qu'il y a des atomes, qu'il y a des particules, qu'il y a des forces, il faut la comprendre comme étant « il y a des électrons, il y a des atomes, il y a des particules, il y a des forces », dans le même sens que celui qu'on entend « il y a un livre sur la table, et, ça, c'est un micro ». Ça, c'est le réalisme scientifique, au sens fort du terme, tel que le décrit van Fraassen, et il insiste là-dessus : ce ne sont pas des métaphores, ça doit être compris au pied de la lettre.

Si on va dans ce sens-là, eh bien, cela ne marche pas. Quand on dit, par exemple, que la mécanique quantique parle d'autre chose que des expériences de laboratoire, par exemple du Big Bang ou du début de l'univers, ou de choses comme ça, ça n'est qu'une histoire qu'elle reconstruit pour agencer correctement et de manière cohérente les observations que nous faisons, mais la mécanique quantique n'a aucun moyen de parler directement du Big Bang. Tout ce qu'elle fait, c'est qu'elle invente un certain nombre de choses comme le Big Bang, qui sont cohérentes dans un cadre formel qui nous permet ensuite de rendre compte de nos perceptions d'aujourd'hui dans les laboratoires, mais elle ne parle pas directement du Big Bang. Elle parle simplement de ce que nous percevons.

Quand elle parle des étoiles à neutrons, elle parle des observations que nous faisons, par différents moyens, avec des appareils, de ce que nous percevons au loin et que nous interprétons ensuite de manière cohérente par le formalisme algébrique de la mécanique quantique qui reconstruit ensuite tout ce qu'il faut pour rendre compte de nos observations. Mais, là encore, ce que fait la mécanique quantique, ce n'est rien d'autre que mettre en ordre nos observations. Et postuler qu'en fait il y a réellement des étoiles à neutrons, ou qu'il y a réellement eu le Big Bang, ou qu'il y a réellement des quarks, cela, c'est un postulat supplémentaire, que fait le réalisme scientifique, et qui pose un certain nombre de problèmes quand on le pousse jusqu'au bout. C'est ce qu'on veut dire quand on dit qu'en fait la réalité extérieure, au sens fort du terme, ne peut pas être conçue comme ça. Ça ne veut pas dire qu'il n'y a pas de réalité.

Carlo Rovelli. Le même discours pourrait être tenu pour la mécanique classique.

Hervé Zwirn. Oui, bien sûr.

Michel Bitbol. Oui, sauf que, en mécanique classique, on pouvait encore faire « comme si »...

Carlo Rovelli. Oui, d'accord, en mécanique classique, on pouvait faire « comme si » le monde était exactement comme ça et, en mécanique quantique, on ne peut pas faire « comme si », mais sans jeter nécessairement la notion de réel. Si on voit un réel voilé, c'est un réel qu'on ne voit pas complètement, c'est un réel dont on peut dire certaines choses mais pas d'autres, mais on n'a pas besoin de jeter l'enfant avec l'eau du bain.

Hervé Zwirn. Je ne l'ai pas jeté totalement puisque, justement, ce qu'on essaie de faire, c'est de reconstruire la réalité sous une forme qui est différente du réalisme scientifique habituel, en disant qu'elle n'est pas constituée de manière spatialement extérieure, avec des objets à prendre au pied de la lettre qui sont l'ontologie d'une théorie. C'est autre chose. Ce sont des tentatives de reconstruction de quelque chose d'extérieur, sinon on est solipsiste et, effectivement, on dit qu'il n'y a que Carlo Rovelli, ou Hervé Zwirn. Comme on refuse ça, on essaie de reconstruire ce qui est compatible avec le postulat minimal selon lequel : « il existe quelque chose d'autre que mon propre esprit ». C'est le postulat minimal et, à partir de là, qu'est-ce qu'on peut reconstruire qui soit compatible avec la mécanique quantique ou, au sens large, parce que je crois que c'est plus large que ça, avec tout ce qui touche au cadre quantique et qui déborde de la mécanique quantique ? Les expériences de non-localité ou de contextualité, ne présupposent pas la mécanique quantique orthodoxe. Elles sont, à la limite, indépendantes de la mécanique quantique. Ce que nous apprennent ces expériences, c'est que le réalisme, disons le réalisme scientifique habituel, pose un problème quand on veut le prendre au pied de la lettre, comme dit van Fraassen. Donc il faut trouver autre chose, et, si on veut qu'il y ait autre chose pour éviter de postuler qu'on est seul au monde, et bien, qu'est-ce qui est cohérent avec ça ? Ce sont des tentatives qui cherchent à construire la chose minimale qui est compatible à la fois avec le monde quantique et le fait qu'on ne peut pas être solipsiste.

Bernard d'Espagnat. Oui, mais quand on essaie de faire ça, de construire une description de cette « autre chose » qui n'est pas nous, il me semble que, finalement, on n'y arrive pas. C'est pour cette raison que je disais que la mécanique quantique est essentiellement prédictive, parce que si vous essayez de remplacer des particules, des petits grains, etc., par des fonctions d'onde, de dire que c'est la fonction d'onde qui est réelle, eh bien, ça ne marche pas. Ça ne marche pas, parce que, si vous dites que ce qui est réel dans une particule c'est la fonction

d'onde, alors dès que vous avez une collision entre deux particules, après elle vous n'avez plus une fonction d'onde pour chacune des deux particules, vous avez simplement une fonction d'onde globale. Et dès que se produit une troisième collision il n'y a plus comme fonction d'onde que celle des trois particules. Et - comme tout cela se produit depuis très longtemps ! - finalement, vous n'avez plus, comme réalité, que la fonction d'onde de l'univers, idée quelque peu difficile à avaler. Alors vous pourriez changer votre fusil d'épaule et dire : « ah, non, ce qui existe vraiment, ce n'est pas la fonction d'onde, c'est la matrice-densité ! » Effectivement, après une collision vous pouvez bien associer une matrice densité à chacune des particules. Mais si vraiment vous dites que la réalité des particules est décrite rien que par leur matrice-densité, après un phénomène de collision entre deux particules la seule réalité, à vos yeux, de cette paire de particules ne peut être constituée que des matrices-densité de chacune d'elles. Or la donnée de ces deux matrices ne révèle aucunement la corrélation due au choc, laquelle pourtant est bien là. Il en résulte que la description par matrices-densité ne peut être une description complète de la réalité, puisque qu'elle suggère une absence de corrélation, alors que vous voyez très bien, par expérience, qu'il y a des corrélations. Autrement dit, la matrice densité n'est pas non plus une description satisfaisante de la réalité physique. Finalement, quand on essaie de faire une description, on se cogne tout de suite à ce genre de problèmes, alors que quand on a décidé une fois pour toutes que ce serait uniquement prédictif, prédictif d'observations, tout marche. Il n'y a qu'à faire des calculs et des expériences, il n'y a rien d'autre que ça. Si on fait une expérience, c'est vérifié à tous les coups.

Jean Petitot. Dans ce genre de discussion, j'ai toujours tendance à réintroduire la question des mathématiques. Les difficultés dont nous parlons me paraissent pratiquement insolubles sur un plan conceptuel si l'on ne prend pas en compte ce qui, à mon avis, est une caractéristique fondamentale des théories physiques, pas seulement de la mécanique quantique mais de toutes les théories physiques modernes, à savoir la possibilité de faire ce que certains appellent une synthèse computationnelle des phénomènes, une reconstruction mathématique de la réalité phénoménale.

Nous avons souvent eu cette discussion, mais je trouve que vous passez un petit peu vite sur la question en disant : « on fait les calculs ». Je pense qu'il y a énormément de philosophie dans les calculs et j'ai tendance à considérer que la véritable philosophie de la physique est, justement, plutôt dans les calculs. Et pourquoi veut-on absolument réintroduire, en plus des calculs, une philosophie conceptuelle, classique, où il y aurait des bonnes vieilles substances comme autrefois, des entités un peu métaphysiques comme des objets et des relations, y compris dans le réalisme structurel ? Le vieux Kant dont on parlait disait qu'il n'y a de science « proprement dite » que lorsqu'il y a des mathématiques. Sinon il n'y a que des mises en ordre classificatoires, taxinomiques, comme en botanique, etc., doublées d'une analyse conceptuelle. Toutes les sciences font de la science dans ce sens-là. Elles récoltent une foule de données empiriques et utilisent nos capacités cognitives pour mettre tout cela en ordre, pour classer, catégoriser, introduire des relations de cause à effet, faire de l'analyse conceptuelle, trouver des concepts plus fondamentaux que d'autres, etc. On fait ainsi des théories sociologiques, des théories anthropologiques, etc.

La physique fait quand même beaucoup plus : elle fait des calculs et elle utilise la puissance générative extraordinaire des mathématiques pour reconstruire une énorme diversité empirique à partir de quelques principes. Cette générativité a un sens très précis. C'est, par exemple, la différence qu'il y a entre une équation différentielle et ses solutions. Les équations différentielles, en général, vont exprimer seulement des principes généraux mais les solutions vont pourtant coller au détail des données empiriques. Il y a là quelque chose de

spectaculaire : les principes donnent des générateurs infinitésimaux et les modèles de la réalité dérivent de l'intégration associée.

Je crois que certains des débats que vous avez eus avec votre collègue Roland Omnès portaient sur le rôle des mathématiques et sur la question de savoir si l'on peut décaler la réalité vers les équations fondamentales de la physique. Je serais pour ma part assez d'accord avec cette idée que la réalité en physique est formulée par les lois et les grandes équations.

Bernard d'Espagnat. Est-ce que vous croyez au réalisme platonicien ? Les calculs, c'est nous qui les faisons.

Jean Petitot. Effectivement, j'ai décalé le problème du réalisme physique vers le problème du réalisme mathématique. Est-ce que les mathématiques sont simplement une création cognitive ? Ou bien est-ce qu'il y a quelque chose de plus, dans les mathématiques, que simplement notre activité cérébrale ? C'est un problème extrêmement délicat, parce que les mathématiques sont quand même du calcul et il faut tenir compte de ce que disent certains logiciens et certains informaticiens sur ce qu'est un calcul. Je crois qu'on peut vraiment soutenir la thèse qu'il existe des aspects fondamentalement objectifs dans les calculs. J'avais cité Alain Connes lors de notre dernière réunion. Il n'est pas du tout un platonicien, mais, en même temps, il a énormément insisté, par exemple dans son débat avec Jean-Pierre Changeux, sur le fait que tous les critères d'objectivité sont réunis par les mathématiques.

Michel Bitbol. Les mathématiques sont objectives *au sens kantien*...

Jean Petitot. Oui, tous les critères d'objectivité, au sens le plus strict, sont satisfaits par les mathématiques. Et pourtant les mathématiques ne sont pas ontologiques. Elles sont la preuve qu'il y a une objectivité non ontologique. Beaucoup de philosophes, pas seulement Wittgenstein, ont essayé de comprendre pourquoi les mathématiques expriment la transcendance par excellence tout en étant purement humaines. C'est pourquoi je trouve intéressant de décaler les paradoxes de la physique vers le paradoxe des mathématiques, en utilisant le fait que les mathématiques sont fondamentales dans la physique.

Jean-Paul Baquiast. Je crois que, si on dit cela, ça pose le problème de la façon dont fonctionne notre cerveau. Je vous avais envoyé un papier...

Jean Petitot. Oui, mais il n'est pas évident que les mathématiques n'existent pas.

Jean-Paul Baquiast. Justement, est-ce que les mathématiques existent en soi...

Jean Petitot. Non!

Jean-Paul Baquiast. ...ou est-ce que ce sont des créations du cerveau humain en situation ?

Jean Petitot. Non, elles ne sont pas non plus une création ! Elles sont objectives.

Jean-Paul Baquiast. Laissez-moi juste dire un mot. Il me semble que les physiciens s'intéressent beaucoup aux instruments, aux réalités éventuellement derrière, mais ils ne s'intéressent pas du tout à l'instrument que représente leur cerveau. Je crois que les roboticiens, cognitivistes, tous ces gens-là, qui réfléchissent à la façon dont les connaissances

émergent dans le monde biologique et dans le monde des robots travaillant en relation, que nous pourrions être, sont amenés à considérer le concept de système cognitif, et le système cognitif humain, comme celui de beaucoup d'animaux, d'ailleurs, repose sur le fonctionnement du cerveau, qu'on connaît très mal. Vous savez qu'il y a des expériences sur le [cognosystème ?], et on commence seulement à modéliser un certain nombre de relations entre neurones pour représenter des choses tout à fait élémentaires. Je pense que si on poussait cette réflexion sur la façon dont le cerveau humain, dont le scientifique en général se représentent le monde, sur la validité de ses représentations... Dans un système cognitif robotique, il n'y a pas de validité en soi, le robot tombe du bord de la table ou il ne tombe pas, et nous n'avons pas de raisons de considérer que nous ne sommes pas, nous, dans cette même situation face à un monde beaucoup plus vaste. Donc je pense que réfléchir – ça pourrait intéresser ce groupe, mais je m'avance peut-être un peu – sur la façon dont vous, physiciens, formalisez, exprimez progressivement vos représentations du monde soit par des concepts soit par des mathématiques, parce que les mathématiques, encore une fois, effectivement, ont une puissance génératrice considérable, ça avancerait beaucoup, non pas sur la représentation de la réalité mais sur la façon dont nous nous représentons la réalité. Si nous revenons sur l'idée que le cerveau est votre instrument, vous devriez l'examiner tout autant qu'un canon à électrons. Ça veut dire qu'il faudrait mettre beaucoup plus d'argent dans les modélisations du fonctionnement des neurones, d'abord dans le cortex, puis dans le corps tout entier, et, finalement, dans le corps en situation sociale. J'en parle beaucoup dans la revue *Automates intelligents*, dont je m'occupe. C'est un point de vue qui émerge en permanence du dialogue d'un certain nombre de disciplines.

Je suis navré d'avoir été un peu long.

Bernard d'Espagnat. Il faudra effectivement inviter, quelque jour, des neurologues. Mais Jean-Michel Raimond a quelque chose. à nous dire.

Jean-Michel Raimond. Oui, je suis désolé de faire un *non sequitur* par rapport à ce qui précède, mais j'ai, depuis le début, un problème avec cette idée de réalisme, qui rejoint la remarque de mon jeune collègue [Matteo Smerlak]. Je comprends bien dans quelle mesure les prédictions de la mécanique quantique sont liées à un appareil de mesure, etc. Il n'empêche que, quand on fait, par exemple, une expérience de collision, comme vous l'évoquiez à l'instant, le résultat de la prédiction est très dépendant de savoir si les particules qui se rencontrent ont un spin entier ou demi-entier, ce qui me semble être l'archétype de la propriété intrinsèque et de la réalité intrinsèque d'une particule. Alors je comprends les problèmes de conception mentale, etc., je comprends tout à fait qu'on puisse se dire « il n'y a pas de réalisme ; de toute façon, tout existe dans le champ de la conscience et dans le consensus auquel aboutissent nos consciences » – je dois préciser que je suis très ignorant en philosophie –, mais j'ai quand même du mal à comprendre comment on peut totalement renoncer à toute réalité objective et indépendante de l'appareil de mesure sur un certain nombre de propriétés des objets que manipule la théorie. J'ai besoin de savoir la charge, la masse et le spin d'un électron pour faire quoi que ce soit avec en physique quantique. Est-ce que cela n'est pas quand même un élément de réalité ?

Bernard d'Espagnat. Personnellement, je n'éliminerais pas systématiquement les choses du genre charge de l'électron ou constante de Planck, des choses comme ça, de la collection de ce qui pourrait constituer des éléments de ce qu'on appelle la réalité indépendante : *mind-independent reality*. Donc je vous suivrai dans ce sens, mais je pense que, d'abord, c'est conjectural et, d'autre part, même si c'est vrai, même si ces éléments sont vraiment des briques constitutives de la réalité indépendante, leur connaissance ne suffit pas, à elle seule,

pour reconstruire la réalité indépendante. Voilà, c'est là ma petite contribution, qui n'épuise pas, évidemment, la question.

Jean-Pierre Gazeau. . Je ne sais pas si je peux continuer dans cette contribution, mais je pensais à la physique classique, à l'évolution de ce qu'on appelle une grandeur physique. Une grandeur physique, d'après les définitions du Bureau international des poids et mesures, c'est quelque chose qui peut être distingué qualitativement et mesuré quantitativement.

Si on prend l'exemple de la vitesse instantanée, c'est un concept impossible, certainement, avant le XVIII^e siècle. C'est devenu, grâce aux mathématiques, une grandeur physique à part entière, qui est cataloguée dans les tables. Je me réfère, encore une fois, au Bureau international des poids et mesures. Cette grandeur physique peut parfaitement franchir le cap quantique, c'est-à-dire qu'on va retrouver le même nom pour la grandeur physique qu'on va maintenant analyser dans un cadre quantique, comme l'énergie, comme des quantités qui étaient auparavant identifiées dans un cadre classique et qu'on va continuer d'identifier dans un autre cadre. On va donc les décrire, encore, dans un cadre quantique. Je ne sais pas, personnellement, si on pouvait mieux les décrire dans un cadre classique. Qu'est-ce que c'est que la longueur de cette table ? Est-ce qu'il y a des limites naturelles ? Une impossibilité de définir, concrètement, la longueur d'un objet ? Comparez simplement avec des unités, etc., il y a des limites impossibles à franchir à un moment donné.

Je ne sais pas, j'ai du mal à faire la distinction entre quelque chose qui est descriptif dans le cadre d'une théorie et qui ne l'est plus dans le cadre d'une autre théorie. Je pense que les mathématiques sont là justement pour nous aider.

Moi, il me semble qu'en physique quantique on parle beaucoup de spectre : le spectre d'une grandeur physique. C'est par le spectre qu'on va identifier une grandeur physique. Le spectre, on le trouve aussi bien dans le cadre de la physique classique. Simplement, le spectre est différent, il est même infinitésimal, beaucoup plus idéalisé dans le cadre classique que dans le cadre quantique. Dans le cadre quantique, il y a beaucoup de grandeurs, finalement, pour lesquelles l'identification passe par un spectre discret, beaucoup plus facile à atteindre, finalement, que les éléments du spectre continu « classique », comme ce qui se passait dans la physique classique, avec la notion de longueur. Vous voyez.

Bernard d'Espagnat. On peut essayer de répondre partiellement à ce que vous dites. Vous parlez de la vitesse. On peut parler aussi de l'impulsion, c'est pareil. Si on essaie vraiment de construire une théorie dans laquelle des grandeurs physiques telles que la position, ou l'impulsion, ne soient pas des inventions, des manières de décrire notre expérience, mais collent vraiment à la réalité, telle qu'elle est, cela veut dire qu'on cherche une théorie ontologiquement interprétable, et le modèle de la théorie ontologiquement interprétable, c'est la théorie de Bohm. D'ailleurs, il ne faut pas dire « la théorie de Bohm », c'est en fait la théorie (ou plutôt *l'une* des théories) de Louis de Broglie, que Bohm a reprise et développée ; c'est une grande injustice que l'on commet quand on parle de « théorie de Bohm », mais passons.

Il faut donc prendre la théorie de Bohm qui reproduit toutes les prédictions de la mécanique quantique et qui, en même temps, permet d'interpréter la position d'un électron comme étant vraiment une réalité en soi. Selon elle cette position n'est pas une manière que nous avons de décrire les choses, de décrire notre expérience, c'est une réalité en soi. A ce moment-là, si on passe à l'impulsion, la théorie de Bohm définit effectivement l'impulsion par une formule tout à fait précise, mais cette impulsion, elle, on ne peut pas la mesurer. Les impulsions qu'on mesure, c'est autre chose. On peut mesurer une quantité qui, dans les livres, s'appelle impulsion et qui correspond d'ailleurs à ce que nous appelons l'impulsion en mécanique classique, mais, cette quantité-là, ce n'est pas l'impulsion telle qu'elle ressort de la théorie de

Bohm. L'impulsion prédite par la théorie de Bohm, on ne peut pas la mesurer ; quand vous mesurez une impulsion, vous mesurez automatiquement une autre chose, pas cette chose-là. Il y a donc vraiment des difficultés qui ne se présentaient pas en physique classique qui se présentent maintenant.

Hervé Zwirn. Je voudrais essayer de répondre aux deux objections, qui ne sont pas tout à fait les mêmes mais qui vont un peu dans le même sens.

J'aimerais d'abord revenir sur la notion de la longueur qui est présente en mécanique classique et qu'on retrouve aussi en mécanique quantique, comme la notion de vitesse. Par rapport à la notion de description, ce n'est pas parce qu'on a des observables, des propriétés, qui peuvent être assimilables ou qui ressemblent, en mécanique quantique, à ce qu'on avait en mécanique classique que, pour autant, on retrouve une description. Parce que la notion de longueur et la notion de vitesse à laquelle tu faisais allusion, ce sont des propriétés qu'on retrouve effectivement, on utilise les mêmes mots et ça veut dire intuitivement un peu la même chose, mais, pour qu'on puisse dire « nous avons retrouvé une description », il faudrait que l'on puisse affecter ces propriétés-là à des objets. Or, le problème que nous avons en mécanique quantique, ce n'est pas qu'on ne peut pas reparler des mêmes grandeurs ; on a les mêmes observables en mécanique quantique, et beaucoup de choses qui sont similaires à ce qu'on avait déjà en mécanique classique. La grosse différence, c'est qu'on ne peut plus, la plupart du temps considérer que la propriété est directement affectée à la particule, que ce soit en mécanique quantique ou dans la théorie de de Broglie-Bohm. Alors qu'en mécanique classique on pouvait considérer que ces grandeurs avaient des valeurs définies pour les particules, en mécanique quantique on ne peut plus, parce que ces valeurs ne se déterminent qu'après la mesure. Supposer que la mesure n'est là, comme en mécanique classique, que pour constater leur valeur, ça ne marche pas. Donc, à partir du moment où on ne peut plus considérer qu'on décrit quelque chose qui existe, qui a des valeurs et qu'on va se contenter de les observer par des instruments, la notion de description perd une grande partie de son sens. Le problème qu'on a en mécanique quantique vient de là, il ne vient pas du fait qu'on ne peut plus penser aux mêmes grandeurs. On y pense, mais on n'a plus le droit de considérer que ces grandeurs s'appliquent, comme en mécanique classique, à des objets et qu'on va constater, qu'on va décrire ce qu'il y a, parce qu'on ne décrit pas ce qu'il y a ; si on essaie de penser comme ça, ça ne marche pas.

Jean-Michel Raimond. Il y a quand même une chose sur laquelle la physique, y compris quantique, repose. C'est la capacité, le postulat qu'on est capable de définir proprement ce qui est un sous-système de l'univers, sans quoi on bute, comme le disait M. d'Espagnat tout à l'heure, sur la fonction d'onde de l'univers, on se met un entonnoir sur la tête et on part à Sainte-Anne, ce qui est à peu près la seule solution.

Décrire un sous-système, ça veut dire que je suis capable, pour tout propos pratique – je suis d'accord que ce n'est pas un point de vue de philosophe –, de dire « en ce moment, je travaille avec un système qui est constitué de trois ou quatre électrons, qui font des choses, qui interagissent de manière locale et quantique ». J'ai une prédictibilité compliquée mais je suis quand même capable de dire que mon raisonnement, ma théorie s'appliquent à un sous-système défini. Il faut quand même, à un moment, que je sois capable de dire ça. Ce sous-système est défini, il est composé d'entités qui, elles-mêmes, ont, dans des limites qu'on comprend tous, je pense, un certain nombre de propriétés établies, que j'aurais tendance, moi, parce que, peut-être, je suis complètement ignorant, à appeler réalité.

Carlo Rovelli. Je suis d'accord avec les deux. Il me semble que vous êtes en réalité en train de focaliser le problème en disant deux choses complémentaires qui ne sont pas en contradiction. On est un peu au centre de la discussion. D'un côté, j'entends : « il y a les choses du réel qui ne sont pas définies jusqu'au moment où tu les observes ». De l'autre côté, j'entends : « oui, mais, quand même, il y a les choses du réel qui semblent être définies, en tout cas, on peut faire la liste ». Il me semble que c'est là qu'on est.

Moi, je serais tenté, pour faire avancer un peu cette discussion, de chercher une position qui ne soit pas nécessairement de dire « vu que certain réalisme, dans lequel je peux imaginer une description précise, dans un certain sens, de la réalité, est clairement bloqué par la mécanique quantique... » Cela a été bloqué de façon empirique. Vu ça, est-ce qu'on est forcé, dès lors, d'abandonner la notion de réalité ? Et la notion de description ? Est-ce qu'il n'y a pas une façon plus faible de parler de description ? Est-ce qu'il n'y a pas une façon plus faible de parler de réalité ? Laquelle ?

Il me semble que, dans toute cette discussion, et dans la mécanique quantique, il y a quand même des choses sur lesquelles on peut s'appuyer, non pas pour construire une philosophie à partir de rien. Dans l'image du monde offerte par la mécanique quantique il y a quand même des aspects réalistes qui restent. On utilise toujours la notion de sous-système qui semble fonctionner très bien et qui, en même temps, est celle qui crée tous les problèmes, parce que le vrai problème de la mécanique est celui des limites de la notion de sous-système. Si j'ai une particule, je peux penser qu'il y a une fonction d'onde, mais, en même temps, si je considère un système plus grand, je sais que cette fonction d'onde n'a pas toutes les informations nécessaires sur les corrélations avec le reste. Il me faut la fonction d'onde des deux.

Il me semble que, si nous voulons trouver un « néoréalisme », c'est de l'autre côté. Nous continuons à dire : « nous mesurons ça ». Qu'est-ce que cela veut dire ? Cela veut dire qu'il y a un appareil ou quelqu'un qui interagit avec le système, et l'appareil lui-même subit, reçoit, est affecté par l'interaction. Le résultat de cette mesure, c'est la chose dont parle la mécanique quantique, à la Heisenberg. La chose prédite par la mécanique quantique, écrite sur le papier, ce n'est pas l'état mais l'effet de l'interaction.

Si je prends l'ensemble de ces « résultats de mesure », comme ma notion de réalité, j'ai encore une difficulté, parce que je me rends compte que ce qui est mesuré pour moi peut devenir, pour quelqu'un qui me considère en système quantique, seulement un morceau de ma fonction d'onde, par opposition avec un autre moi dans une autre branche de la fonction d'onde. Donc j'ai encore une difficulté, je n'ai pas résolu le problème. Je n'ai pas résolu le problème tout simplement à la Heisenberg, en disant « l'électron, je le vois là, je le vois là et je le vois là et je ne me demande pas où il est ailleurs mais je ne vois que ça ». Je n'ai pas résolu le problème mais, tout de même, il me semble, si je me rappelle que la description de la réalité que je veux doit être beaucoup plus faible qu'avant, que la mécanique quantique est en train de me dire que ces résultats de mesure sont une disposition qui doit être attachée au système qui a été affecté. Donc si j'imagine que tout système de l'univers, tout sous-système de l'univers, comme il interagit avec les autres systèmes, réalise les résultats des mesures, je peux penser au monde sans nécessairement utiliser le *mind*, c'est-à-dire sans... penser à une réalité qui est *mind-independant*, où il y a des sous-systèmes en interaction et, par rapport à chaque système, il y a des éléments de réalité qui sont réels. Mais réels par rapport à ce système-là. Alors, ça, je peux lire ça comme une théorie de la connaissance, comme une description très partielle du monde.

Je reviens à ce que vous dites. Quand Newton a introduit le concept de force, l'Europe entière a dit : « non, non, non, ça, c'est de l'irréalisme ! La critique la plus forte contre les *Principia* par la France, l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne était que c'était trop antiréaliste : le réalisme devait être fort, à la Descartes, ou comme l'atomisme des Anciens. Les interactions devaient exister seulement pour des choses qui se touchent. La notion de force, c'est de l'irréalisme.

Après, les siècles ont passé et nous sommes tous devenus newtoniens et, pour nous, maintenant, la notion de force fait partie du réalisme. Nous avons changé complètement de conception de la réalité.

Il me semble que ce que nous devons chercher c'est une reconceptualisation de la réalité, plus faible, dans laquelle, il me semble que la clé essentielle est de se focaliser sur le résultat de la mesure et de se rendre compte que ce résultat est relatif au système observé. Je pense qu'on peut le faire sans nécessairement parler de conscience, sans nécessairement parler de *mind*, en restant dans la physique, en parlant quand même de description, mais évidemment une description au sens faible, de la mécanique quantique. Il me semble que c'est notre idée de réalité qui doit évoluer pour s'adapter à la mécanique quantique.

Bernard d'Espagnat. Il me semble que vous basez pas mal votre argumentation sur la notion de sous-système. Pour ma part je pense que, en fait, la notion de sous-système est une création de notre manière de voir. Dire qu'on a une particule qui se désintègre en deux, donc que l'on a deux sous-systèmes, c'est dire que quand vous observerez vous verrez deux sous-systèmes. Mais tant que vous n'avez pas observé du tout, vous ne pouvez pas vraiment dire que vous avez affaire à deux sous-systèmes, me semble-t-il. Ce serait les interpréter comme des en-soi ; ça ne me paraît pas possible.

Jean-Michel Raimond. Je sais bien que ces deux particules sont corrélées, mais je veux pouvoir parler de ces deux particules qui ne sont pas chacune un sous-système indépendamment du reste de l'univers.

Bernard d'Espagnat. Vous en parlez parce que vous savez que, quand vous les observerez, vous observerez deux choses à deux endroits différents, mais vous parlez de vos observations futures, vous ne parlez pas d'une chose existant tout à fait indépendamment de vous.

Michel Bitbol. Juste un point pour préciser ce que dit M. d'Espagnat. Un grand physicien nommé Asher Peres a écrit un livre de théorie quantique dans un esprit intégralement empiriste (*Quantum theory, concepts and methods*, Kluwer, 1995). Selon lui, ce que nous appelons un système physique est seulement une manière de traduire une classe de préparations expérimentales. Lorsqu'on dit, par exemple, qu'il y a un système physique composé de deux particules, ça veut simplement dire qu'on a fait une préparation expérimentale telle que la valeur associée à la valeur de l'observable « Nombre » est 2. Le vocabulaire habituel, suivant lequel on « prépare un système », est pour ainsi dire redondant ; car le mot « système », selon Peres, est le nom que l'on donne aux potentialités partiellement contrôlées que la préparation rend disponibles.

Carlo Rovelli. Et l'étoile à neutrons de Matteo ?

Matteo Smerlak. On a toujours ce problème de l'appareillage qui interviendrait sur le système.

Michel Bitbol. Mais je n'ai pas besoin que l'appareillage intervienne tout de suite. La mécanique quantique permet de prévoir que jamais vous n'observerez une étoile à neutrons qui se brise spontanément. Vous tâchez d'associer un vecteur d'état à une étoile à neutrons et il vous permet de prévoir que la probabilité d'observer, dans le futur de l'expérimentation, un effondrement spontané de ce système, est proche de *zéro*.

Matteo Smerlak. Comment puis-je préparer une étoile à neutrons ? Vous définissiez un sous-système par une procédure de préparation.

Michel Bitbol. Effectivement, le problème, c'est que, là, la préparation n'est pas contrôlée, mais on peut évidemment définir une préparation qu'on qualifie par exemple de Big Bang, ou autre processus qui joue exactement le même rôle. Mais je reconnais que ce n'est pas encore la bonne réponse.

Carlo Rovelli. Dès que je me permets de faire ça, je peux penser le monde comme quelque chose qui était préparé et que j'étudie. Donc la notion de préparation n'est pas si essentielle, après tout.

Michel Bitbol. Utiliser la notion de préparation peut simplement revenir à dire qu'on circonscrit les conditions de notre expérimentation, c'est-à-dire qu'on met en place des instruments nous permettant de sélectionner un certain nombre d'objets, par exemple les étoiles à neutrons. Une fois qu'on a fait cela, nous pouvons peut-être associer une fonction d'onde à ces objets sélectionnés... Le problème que tu [Matteo Smerlak] poses, c'est cela : en général, on associe un vecteur d'état à un système en s'appuyant sur la connaissance que nous avons d'une préparation préalable. Par exemple, je peux associer à un électron un vecteur d'état $\rightarrow +\frac{1}{2}\rangle$, vecteur propre d'une composante du spin, et je dis : « je lui associe ce vecteur d'état parce que je l'ai fait passer par un appareil de Stern-Gerlach qui servait de préparation, et que j'ai sélectionné le faisceau supérieur d'électrons ». Dans le cas de l'étoile à neutrons, le problème c'est que je n'ai pas cette capacité de contrôle...

Ajout ultérieur

À la suite de cette discussion, je me suis rendu compte que ma réponse à l'objection de Matteo Smerlak était incomplète et insatisfaisante. Une conception plus convaincante était pourtant prête à être formulée, mais je n'y ai pensé qu'après-coup. J'ai donc envoyé à Matteo une lettre visant à clarifier ce qu'il faut entendre par « préparation d'un système physique ». Une fois cette clarification admise, rien n'empêche d'étendre la notion de préparation, et l'attribution d'un symbole prédictif associé, à des systèmes non-contrôlés au laboratoire comme les étoiles à neutrons. Voici ma lettre :

« Cher Matteo,

J'ai réfléchi hier soir (et inconsciemment pendant la nuit) à ton intéressante objection de l'étoile à Neutron. Maintenant, il me semble que je tiens la réponse. En résumé, elle s'appuie sur une définition *informationnelle* de la préparation, plutôt que sur l'idée standard qui fait de la préparation une opération matériellement maîtrisée au laboratoire. Il est amusant que je n'aie pas percuté tout de suite sur ce point évident; cela prouve que je traîne encore quelques restes de réalisme malgré mes efforts!

1. Dans la conception standard (amorcée par H. Margenau en 1937), une préparation est une opération de filtrage de systèmes physiques, contrôlée au laboratoire.
2. A la suite de cette opération, et en fonction du type de filtre utilisé, on associe un vecteur d'état aux systèmes. Exemples très classiques: émission de photons par une ampoule et passage par un polariseur vertical, émission d'atomes d'argent par un four suivie d'un Stern-Gerlach et sélection de l'une des deux trajectoires, émission d'électrons par un filament chauffé, accélération par un champ électrique, et interposition d'un écran percé d'un trou. Les vecteurs d'état associés sont respectivement: deux états propres d'une composante du spin, et

- un état propre d'une observable position spatiale.
3. Ce qui compte dans ce procédé d'association d'un vecteur d'état à une préparation n'est pas le contrôle instrumental des systèmes a priori, mais l'**information** rendue disponible par ce contrôle. Preuve de cela: les "*delayed choice experiments*", qu'on n'est pas forcé d'interpréter dans le style métaphysique débridé de Wheeler. Dans la toute première expérience de pensée de ce type, celle du microscope de Heisenberg revue et améliorée par Von Weiszacker, c'est particulièrement évident. Le vecteur d'état de l'électron éclairé par un photon n'y dépend pas de ce qui a été fait au départ à l'électron, ni de l'impulsion qui lui a été transmise par le photon, mais de la position de la plaque photo au voisinage de l'oculaire du microscope. Or, ce qui change selon cette position de la plaque, c'est seulement que l'information obtenue est optimale *soit* sur la variable position *soit* sur la variable impulsion. Si l'information est optimale sur la position, on assigne à l'électron un vecteur d'état presque identique à un vecteur propre de l'observable « position spatiale », et si l'information est optimale sur la quantité de mouvement, on assigne à l'électron un vecteur d'état presque identique à un vecteur propre de l'observable « quantité de mouvement ».
 4. Par extrapolation, on peut parfaitement parler de "préparation d'un système" même si celui-ci n'est absolument pas contrôlé en laboratoire (comme c'est le cas d'un objet astronomique!). **La "préparation", dans ce cas, n'est rien d'autre que l'opération de discrimination à distance entre diverses classes d'objets, qui permet d'obtenir une certaine information initiale à leur propos.** Sélectionner une étoile à neutrons dans le ciel sur des critères spectraux et / ou gravitationnels, cela revient à rendre disponible une information initiale sur elle, c'est-à-dire (dans le sens étendu du terme) à la "**préparer**". C'est sur la foi de cette information initiale qu'on pourra (au mieux) lui attribuer un vecteur d'état, ou (au pire) un opérateur densité.
 5. Il est vrai qu'on peut aussi ne pas attribuer un vecteur d'état à l'étoile à Neutron, et utiliser des stratégies plus globales pour montrer sa stabilité. Il en va ainsi, pour prendre un exemple plus courant, lorsqu'on prouve la stabilité des atomes en général en se servant des inégalités de Heisenberg. Dans ce cas, cela veut simplement dire qu'on s'intéresse à une classe entière de préparations plutôt qu'à une préparation singulière; mais même ici, de l'information initiale est rendue disponible par ce que l'on pourrait appeler une "préparation générique"; et on retombe donc sur le cas standard.

Je confirme en définitive que la mécanique quantique est un procédé formel permettant de dériver un instrument de prévision probabiliste à partir d'une information initiale rendue disponible par une opération appelée "préparation". Cet instrument de prévision probabiliste peut être révisé au fur et à mesure des informations nouvelles obtenues (c'est la "réduction de l'état"!) ». Le cas de l'étoile à Neutron ne remet pas en question ce schéma général opérationnel très simple d'interprétation de la mécanique quantique.

Suite du C.R. du 31.1.11

Matteo Smerlak. Mon exemple visait à montrer les limites de cette idée, très peresienne en l'occurrence, de préparation d'un sous-système. Cet opérationnalisme est pertinent au laboratoire, où sont menées des expériences sur des atomes, des systèmes qu'on peut maîtriser dans un notre voisinage immédiat. Mais la mécanique quantique est plus vaste. Il me semble

que ce genre de point de vue pose problème dans un cadre astrophysique

Hervé Zwirn. Il y a effectivement une difficulté avec la préparation dans le cadre astrophysique, mais qui doit se régler autrement.

Michel Bitbol. Le problème, c'est toujours : qu'est-ce qu'on fait pour attribuer un vecteur d'état à quelque chose ? Effectivement, quand on attribue un vecteur d'état à un électron dans un laboratoire, on sait ce qu'on fait : on prépare, on fait passer l'électron dans un Stern-Gerlach, on sélectionne ceux qui sont en haut, par exemple, et pas ceux qui en bas, donc on peut attribuer le vecteur d'état. Qu'est-ce qu'on fait concrètement – ce serait intéressant que tu [Matteo Smerlak] nous le dises – pour attribuer un vecteur d'état à une étoile à neutrons ?

Matteo Smerlak. Ce que j'avais en tête, c'est plutôt la physique statistique. Les propriétés d'une étoile à neutrons sont celles d'un très grand nombre de neutrons, qu'on ne cherche pas à décrire individuellement ; c'est une différence importante. La mécanique quantique dont on parle, dans ce genre de discussion épistémologique, c'est la mécanique quantique d'un système individuel préparé et mesuré.

Michel Bitbol. Ça y est, j'ai compris : c'est d'un système générique, pas d'un système individuel, que tu parles. Effectivement, il n'est pas préparé, mais tu te représentes une classe de systèmes, avec une préparation hypothétique possible, et tu dis « à cette classe de systèmes, j'associe, disons, tel opérateur densité ρ ».

Hervé Zwirn. Quand on observe une étoile à neutrons, on n'est pas dans le même cas que quand on observe un neutron individuellement. On a une propriété macroscopique qui émerge indépendamment, pour laquelle il n'y a pas besoin d'une préparation, parce qu'on est dans une sorte de propriété thermodynamique globale. Ce qui émerge, c'est une statistique. C'est exactement la même chose que lorsqu'on regarde une table.

Matteo Smerlak. Voilà. Je voulais pointer le fait que la mécanique quantique est décisive aussi dans ce cadre, qui n'est pas celui de la physique atomique. Je pense que, si on garde en tête cet autre aspect de la mécanique quantique, son aspect statistique, les questions peuvent se poser légèrement différemment.

Hervé Zwirn. Est-ce que c'est un contre-argument à ce que nous disions avant ou pas ? Parce qu'on pourrait très bien dire que, indépendamment du fait que tout neutron d'une étoile à neutrons ait une existence individuelle, et même si on refuse l'attribution de propriétés précises à chaque neutron pris individuellement, la mécanique quantique montre que les propriétés collectives de cet ensemble de neutrons, macroscopiquement, sont toujours les mêmes. Donc ça marche. Cet argument m'a posé un problème, tout à l'heure, mais, en fait, ça n'est pas un contre-argument au fait de dire qu'on refuse une existence individuelle à chaque neutron.

Matteo Smerlak. Je suis entièrement d'accord.

Hervé Zwirn. Oui, complètement. Parce que c'est macroscopique et, du coup, ça émerge sans avoir besoin d'un appareil de mesure.

Je voudrais poser une question à Carlo par rapport à ce qu'il a dit tout à l'heure. Pourquoi dire, si j'ai bien compris, que, quand deux sous-systèmes interagissent, on n'a pas besoin

d'avoir l'intervention d'un observateur pour dire que la mesure est faite ? L'interaction de deux systèmes ne donne pas une mesure !

Carlo Rovelli. Si, je pense que si. Je disais cela de façon rhétorique. Imagine que tu fais des mesures. Quelqu'un les fait à Pékin. Il y a le même Stern-Gerlach ici et là-bas, mais imagine que le scientifique chinois était sorti. Les mesures ont donc été faites sans qu'il soit là. Est-ce que les mêmes mesures ont été faites ? Je pense que oui. Ce qui s'est passé n'a donc rien à voir avec le *mind*.

Hervé Zwirn. Si, parce que, toi, tu as fait la mesure. Dans ce cas, les deux systèmes, tant qu'on n'a pas fait de mesures, sont considérés comme n'en formant qu'un seul. Ils sont intriqués. On est dans le cas EPR. C'est le même système. Qu'est-ce que tu entends par mesure non lue ?

Carlo Rovelli. Non, non, ce n'est pas EPR !

Hervé Zwirn. Donc le Chinois est sorti, et il n'a pas regardé ?

Carlo Rovelli. Il y a quand même une tache blanche, mais lui n'a pas regardé. Il n'y a rien, dans la physique quantique, qui me dise que je dois faire une distinction entre les deux cas. Donc je pense qu'il n'y a rien à voir avec le *mind*, il y a à voir avec autre chose, avec une interaction entre l'électron et l'appareil de mesure, mais, si ce n'était pas un appareil de mesure, s'il y avait là un champ magnétique et des neutrons, je pense que quelque chose se passerait exactement de la même façon. Alors, moi, je suis convaincu, en étudiant la mécanique quantique, qu'il n'y a rien qui parle du *mind*, qui parle directement de la conscience. Au contraire, il y a fortement quelque chose dans la mécanique quantique qui me force à dire que le fait que la tache est là, je ne peux pas le prendre comme une propriété du réel absolu, je dois me référer à quelque chose, par exemple à mon point de vue, par exemple à quelqu'un, par exemple à un autre homme.

Michel Bitbol. Quelque chose m'étonne beaucoup de ta part, Carlo. J'ai l'impression qu'en ce moment tu n'es pas fidèle à ton interprétation relationnelle. Tu dis qu'il n'y a pas de différence entre le cas où le Chinois a regardé et le cas où le Chinois n'a pas regardé. Mais oui, bien sûr, qu'il y a une différence ! C'est que, dans un cas, *relativement* au Chinois qui n'a pas regardé, l'ensemble du système est encore dans un état de superposition, alors que, *relativement* au Chinois qui a regardé...

Jean-Michel Raimond. Non !

Michel Bitbol. D'après Carlo il en va ainsi. D'après son interprétation, il y a une différence entre la description relative au Chinois qui a regardé et à celui qui n'a pas regardé ! Carlo, relativement au Chinois qui a regardé, tu dois dire que...

Carlo Rovelli. Je pense que la physique quantique me force à dire que, relativement à l'écran, la mesure a été faite.

Hervé Zwirn. Non, parce que l'écran et l'électron sont dans un état superposé et rien dans la théorie quantique ne permet de dire qu'il a une tache à un endroit donné.

Carlo Rovelli. On est au cœur...

Jean-Michel Raimond. On en vient à la fonction d'onde de l'univers !

Carlo Rovelli. Je change un peu. Toi [Hervé Zwirn], tu fais la mesure ; moi, je suis dehors. Toi, tu es dans une boîte, tu vois ce qu'il y a ; moi, je suis dehors et j'ai des appareils très très précis qui me permettent de voir des corrélations quantiques très très fines. Pour moi, aucune mesure ne s'est passée. Par rapport à toi, quelque chose a été mesuré ; par rapport à moi, quelque chose n'a pas encore été mesuré.

Michel Bitbol. Ça, c'est du Rovelli !

Carlo Rovelli. Donc, par rapport à l'écran, la mesure a été faite. Par rapport à toi, la mesure a été faite. Par rapport à moi, la mesure n'a pas encore été faite. Si on accepte cet affaiblissement du réel, on peut encore parler de réalité, on peut encore parler d'élément de réalité. C'est très fort, et on n'a pas besoin d'avoir du *mind*, les choses se passent par rapport à d'autres systèmes physiques, pas par rapport à des consciences.

Jean-Michel Raimond. A cela près que pour détecter les corrélations subjectives qui vous prouvent que votre ami n'est pas dans une superposition d'état, il faudrait un appareil pour tout propos pratique irréalisable parce qu'il utiliserait des énergies plus grandes que celle de l'univers. Donc il faut aussi, peut-être, à un moment – c'est philosophiquement non correct et politiquement incorrect – dire « *for all practical purposes*, on n'en a rien à faire, la mesure est faite ». L'un connaît le résultat, l'autre ne le connaît pas, mais la mesure est faite.

Carlo Rovelli. Oui, mais je crois que, si on garde la distinction, on peut sauver certaines propositions pour résoudre certains paradoxes qu'on ne comprend pas. Je suis d'accord, mais, si on garde dans la tête que c'est seulement *for all practical purposes* qu'on peut faire ça, on a quand même cet affaiblissement du réel, mais de l'autre côté on gagne le fait que certains paradoxes sont résolus, et l'on n'a pas besoin de faire référence à la conscience humaine. Dans l'univers, les humains ne font rien de particulier. Seulement, ils sont capables de collecter les informations sur le monde et peut-être d'autres choses, d'interagir.

Michel Bitbol. Il y a en tous cas quelque chose que font les êtres humains, c'est d'être capables de comprendre qu'ils ne font pas tout dans le monde, comme tu le fais de manière très forte, Carlo, lorsque tu nous dis « les humains ne font rien de particulier, si ce n'est collecter de l'information ». Cette capacité-là est très importante ; en elle réside notre pouvoir d'objectiver, notre pouvoir de poser un domaine d'existence que nous puissions considérer comme non entièrement contrôlé par nous. En même temps quand tu soulignes que les êtres humains ne font rien de particulier, c'est une reconstruction que tu es en train d'effectuer maintenant, avec tes pouvoirs intellectuels humains ! Il a bien fallu partir de quelque part pour délimiter un domaine où les humains ne font pas grand chose, et ce quelque part d'où il a fallu partir n'est autre que notre point de vue humain... Les êtres humains ont aussi cette formidable capacité de définir des conditions dans lesquelles ils puissent considérer qu'ils n'interviennent pas.

Carlo Rovelli. Je te suis à 100 %.

Hervé Zwirn. Pour aller dans ce sens, je crois que tout le monde est d'accord pour dire que, sur le plan pratique, effectivement, la mesure est faite, parce que, pour se rendre compte qu'il

existe toujours une superposition, il faudrait des appareils de mesure qui sont complètement hors de notre portée. D'un point de vue pratique, c'est « comme si », on est bien d'accord.

A partir du moment où, pour se rendre compte qu'en fait, « en réalité », le système est toujours dans un état superposé, il faudrait des appareils qui sont hors de portée pour nous. En tant qu'être humains, on peut considérer que la mesure a été effectuée, "pour nous". En tant que physiciens, on n'a pas besoin de se poser plus de questions et on peut continuer à faire de la physique, mais, quand on est philosophe, on fait une distinction entre le « pour nous » et le « en soi ».

Jean-Michel Raimond. Cette mesure est hors de portée de l'univers dans son ensemble.

Hervé Zwirn. Elle est hors de portée si on conçoit les appareils de mesure comme étant faits par des êtres humains mais, en toute rigueur, tant qu'on n'a pas réduit la matrice densité par l'opération de trace partielle liée au fait qu'on ne regardera pas certains degrés de liberté (et ça, c'est dû à notre limitation à nous), cette matrice densité reste non diagonale. Donc si on veut raisonner non pas sur un niveau lié à l'homme, mais sur un plan philosophique, en toute rigueur, on ne peut pas dire que la matrice densité est diagonale et donc la mesure n'est pas faite.

Jean-Michel Raimond. Dans ce cas, si on veut raisonner sur ce plan philosophique, il est urgent que nous arrêtons de raisonner sur la physique quantique, puisqu'elle dit que, depuis l'origine de l'univers, toutes les particules sont dans un état intriqué dont nous faisons partie. Donc il n'y a pas de raisonnement possible sur tout ça, et on est reparti dans la fonction d'onde de l'univers.

Soit il y a un « pour tout propos pratique » qui est philosophiquement étayable, je ne sais pas pourquoi, avec un sous-système qui est réduit et qui n'est plus dans une superposition d'états, soit ce sous-système continue à faire fuir ces superpositions d'états dans l'univers tout entier, l'univers tout entier est dans une grande fonction d'onde, j'en suis une partie, et je ne sais plus rien.

Hervé Zwirn. Même si on dit que le fait que tout reste dans un état superposé a comme conséquence que le système global n'est pas accessible à la mesure, ce que le calcul montre, on peut s'intéresser à des choses qui sont hors de notre portée à tout jamais mais dont on peut philosophiquement imaginer l'intérêt.

Plaçons-nous dans un état de l'univers dans 10^{1000} ans. Personne ne sait quel sera l'état de l'Univers dans 10^{1000} ans. Des théories disent certaines choses, d'autres disent l'inverse. Mais si on suppose que le système est toujours dans un état superposé, on peut faire des prédictions qui montrent que peuvent apparaître dans 10^{1000} ans un certain nombre de corrélations qui auraient disparu si la fonction d'onde avait été réduite. Certes 10^{1000} ans est un temps hors de portée pour nous. Il n'empêche que, de fait, les prédictions à 10^{1000} ans, ne sont pas les mêmes si on suppose que la fonction d'onde est réellement réduite par rapport au cas où on suppose qu'elle ne l'est pas vraiment. C'est ça qu'on veut dire quand on dit que ce n'est pas la même chose.

Jean-Michel Raimond. Parce que les récurrences de Poincaré sur l'ensemble de l'univers, de la fonction d'onde de l'ensemble de l'univers, sont très très au-delà de 10^{1000} ans, probablement plus proche de 10 puissance factorielle 10^{1000} .

Le point serait d'arriver à un statut philosophique qui se tient un peu au « *for all practical purposes* », parce que, là, on est en plein dedans. On est en train de discuter de choses qui ont

peut-être encore moins de sens que le sexe des anges, dont l'université française s'est occupée trois siècles avec des succès conceptuels considérables mais dont l'intérêt pratique est faible.

Bernard d'Espagnat. Mes chers amis, il est tard. Je crois que nous allons être obligés de mettre un terme provisoire à cet échange de vues. Sans cela, on nous mettrait dehors. La prochaine séance, je vous le rappelle, c'est le 14 mars. Jean-Michel Raimond nous parlera de la décohérence.

Jean-Michel Raimond. Sur un plan « *for all practical purposes* » !

Bernard d'Espagnat. Sur un plan expérimental, ce qui revient un peu au même. Nous nous permettrons ensuite d'essayer de dégager collectivement la signification de l'expérience en question. Ce sera intéressant et extrêmement important.

[fin de la séance]