

Collège de physique et de philosophie
Séance du 16 mai 2011

Bernard d’Espagnat. Nous avons le plaisir d’accueillir parmi nous deux personnes qui ont accepté de participer au groupe et n’ont pu venir jusqu’ici. Je les prie de bien vouloir se présenter très brièvement.

Alexei Grinbaum. Je travaille au CEA/Larsim.

Stefano Osnaghi. Je suis au Crea de l’Ecole polytechnique.

Bernard d’Espagnat. Merci.

Lors de notre dernière séance nous avons, grâce à l’étincelant exposé de Jean-Michel Raimond, expérimentalement constaté que des systèmes physiques qui, à l’instant 0+, font preuve d’un comportement typiquement quantique, font preuve d’un comportement classique un peu plus tard. Ce qui constitue une indication très forte, pour ne pas dire une preuve expérimentale, qu’il n’existe pas deux espèces de systèmes, obéissant les uns à la physique quantique les autres à la physique classique, mais qu’au contraire la physique est une, même si, selon les circonstances, les systèmes physiques peuvent se montrer à nous sous un jour quantique ou classique. Et l’interaction des systèmes macroscopiques avec l’environnement ainsi que la décohérence qui en résulte semblent bien être la cause de ce passage progressif du quantique au classique, la mécanique classique se présentant comme dérivable, sous certaines conditions, de la quantique. Aujourd’hui, ce sont donc logiquement les aspects théoriques et surtout conceptuels de cette décohérence que nous nous proposons d’explorer ensemble.

Nous sommes plusieurs, ici, à avoir réfléchi sur ce sujet. Mais peut-être convient-il de demander d’abord aux personnes nouvellement présentes parmi nous de s’exprimer à ce propos.

[En vue d’en rendre la lecture plus confortable ce Compte Rendu a été divisé comme suit.

Section 1 – Aperçu sur une conception non standard de la décohérence présentée par A. Grinbaum et échanges à ce sujet..

Section 2 – Echanges relatifs à la conception standard de la décohérence.

Section 3 – Echange de vues pour et contre le réalisme.

Section 4 – Aspect mathématiques du conflit entre mécanique quantique et localisation spatio-temporelle.

Section 1 Aperçu sur une conception non standard de la décohérence présentée par A. Grinbaum, et échanges à ce sujet.

Alexei Grinbaum. J’ai une vue théorique peu orthodoxe de la décohérence, que je lie au problème de l’observateur. Certaines personnes ici présentes m’ont déjà entendu présenter cette idée. Pour la résumer brièvement, je pense que la décohérence apparaît, sur le plan théorique, comme un phénomène lié à l’analyse du rapport de complexité qui existe entre l’observateur et le système observé.

Pour moi, la principale caractéristique de l’observateur quantique (je résume, évidemment, avec des mots ce qui peut être décrit dans un formalisme mathématique) est qu’il doit nécessairement être beaucoup plus complexe que le système observé – et quand je

dis complexe, on peut penser soit aux degrés de liberté que l'observateur utilise pour stocker de l'information, c'est-à-dire une sorte de mémoire soit, sur un plan beaucoup plus formel, à la complexité de Kolmogorov de cet observateur, puisque pour moi, l'observateur est essentiellement un algorithme d'identification de systèmes, et donc possède une caractéristique formelle invariante de son implémentation physique, qui est sa complexité de Kolmogorov. Je laisse de côté les détails mathématiques de cette description.

Pour moi, la décohérence apparaît quand le nombre de degrés de liberté du système observé par l'observateur s'approche d'un certain seuil qui caractérise l'observateur donné. J'entends par là que chaque observateur est caractérisé par un seuil de complexité en dessous duquel il peut toujours observer le système quantique, c'est-à-dire le décrire de façon complète sans faire de *coarse graining*. Autrement dit, pour moi, la décohérence est liée à la complexité de l'observateur. Le seuil de description d'un système en tant que système quantique n'est pas le même pour deux observateurs dont l'un est beaucoup plus complexe que l'autre. Je précise les aspects mathématiques de cette approche dans mon article arXiv: [1007.2756](https://arxiv.org/abs/1007.2756).

Pour finir, tout cela découle de l'analyse que je pense nécessaire mais qui n'a pas été faite en histoire de la mécanique quantique, à savoir celle de la notion de système qui, en quelque sorte, est pré-acquise et prédéfinie : la mécanique quantique « commence » quand l'observateur et le système sont déjà mis en place. Je considère qu'il est possible, en utilisant le langage informationnel, de remonter au préalable d'une étape et d'analyser le système en termes informationnels et que, de cette analyse, pourra être tirée une explication théorique de la décohérence.

Jean-Michel Raimond. Si je puis me permettre une question, la décohérence telle que vous l'envisagez se passe donc de la notion d'environnement ?

Alexei Grinbaum. Pas nécessairement. En effet, si l'observateur observe un système dont le nombre de degrés de liberté est fixe et largement inférieur à celui de l'observateur, on parle alors, dans le langage ordinaire, d'un système clos. La mécanique quantique usuelle opère alors sans problème. Cela étant, que signifie l'affirmation selon laquelle le nombre de degrés de liberté peut croître, s'approcher d'un certain seuil ? Elle signifie que l'observateur commence à tenir compte ou tente de tenir compte des degrés de liberté autres que ceux qu'il a initialement identifiés. On peut dire qu'auparavant, ces autres degrés de libertés avaient été classés comme ceux de l'environnement.

Jean-Michel Raimond. S'il y a deux observateurs, peut-il y avoir une description objective agréant sur l'état d'un système ? Autrement dit, si deux observateurs se trouvent la salle de manipulation, que font-ils ?

Alexei Grinbaum. En effet, le résultat principal de mon article est un théorème selon lequel les observateurs dont les complexités ne sont pas très différentes – et je donne un critère mathématique de ce que cela signifie – seront d'accord sur la caractérisation des systèmes. Ce résultat sur la possibilité de l'accord entre deux observateurs me paraît très important. Entre autres, il signifie que deux observateurs qui ne se ressemblent pas, n'identifieront pas les systèmes quantiques de la même manière.

Jean-Michel Raimond. Il existe donc un système plus ou moins gros et totalement découplé de l'univers et, dans ce système, un ou des observateurs découplés de l'univers et qui interagissent entre eux ?

Alexei Grinbaum. Je n'utilise pas le terme d'univers, parce que mon langage est informationnel. Je ne prends pas de position réaliste, ni anti-réaliste, au sens du réalisme de systèmes physiques. L'observateur observe ce qu'il identifie comme système quantique. Cet observateur est un algorithme d'identification des systèmes. Il est implémenté physiquement, et peut l'être de différentes façons, mais la description informationnelle à elle seule nous donne des résultats théoriques intéressants.

Jean-Michel Raimond. Ce système quantique constitue-t-il un système parfaitement isolé, exception faite de son interaction avec l'observateur ? C'est en ce sens que je posais le problème de l'environnement, dans la vision plus standard de la décohérence.

Alexei Grinbaum. Ma vision ne part pas du théâtre de la nature comme le fait souvent la physique. Je ne dis pas qu'il y a d'abord le théâtre de la nature qui comporte des objets et que nous utilisons la physique pour en rendre compte. Mon point de vue de la mécanique quantique part du constat épistémologique, selon lequel l'observateur interagit avec les systèmes et les observe, en obtenant ainsi de l'information. Dans cette vision, « ce qui existe réellement autour de nous » n'a pas de place, et donc les notions d'univers ou de système isolé par rapport à l'environnement ne sont pas définies. C'est la raison pour laquelle je précise que ce point de vue n'est pas orthodoxe, même si, en réalité, il est proche de la position de Bohr.

Bernard d'Espagnat. L'observateur, chez vous, se distingue-t-il de l'observé par quelque trait qualitatif ?

Alexei Grinbaum. L'observateur se distingue du système qu'il observe uniquement par cette étiquette d'observateur, c'est-à-dire un trait lié à la complexité, qui n'est pas écrit en tant que tel dans la nature, mais y est implémenté sous la forme, par exemple, de la taille de mémoire. La différence entre observateur et système observé se trouve dans la caractérisation des échanges informationnels.

Bernard d'Espagnat. Votre thèse que l'observateur se distingue de l'observé par un trait qui « n'est pas écrit en tant que tel dans la nature » me fait un peu songer à Bohr: selon Niels Bohr un instrument est un instrument non pas en raison de sa composition physique, mais parce qu'on s'en sert comme instrument.

Alexei Grinbaum. Tout à fait.

Bernard d'Espagnat. Il y a donc une analogie importante entre l'approche de Bohr et la vôtre ?

Alexei Grinbaum. Absolument. Pour moi, toute l'approche informationnelle, en tout cas celle que je défends, entre dans le cadre néobohrien. C'est du « néoBohr ».

Michel Bitbol. J'apprécie votre filiation néo-Bohrienne, à laquelle je me rattache également, même si c'est sur un mode un peu différent. La caractéristique cruciale de cette famille de positions est que le processus d'observation relève d'une catégorie profondément différente de celles qui interviennent dans la description des systèmes physiques. Chez Bohr, ce saut catégoriel est représenté par la limite quantique / classique (le processus observé

relevant d'un compte-rendu quantique, et le processus d'observation d'un compte-rendu classique). Chez vous, le saut catégoriel revient à passer d'un langage quantique à un langage informationnel. Dans les positions néo-Bohriennes, la *raison* de ces sauts catégoriels n'est pas à trouver dans la physique elle-même, mais dans les nécessités de l'acte de connaître : elle équivaut à mettre en évidence des conditions de possibilité de la connaissance, sur un mode typiquement kantien. Je voudrais à partir de là préciser un peu les conséquences de votre caractérisation du saut catégoriel.

Vous avez insisté sur l'importance (en particulier pour les processus de décohérence) du degré de complexité de l'observateur. Vous avez souligné que le degré de complexité que vous avez en vue lorsqu'il s'agit de l'observateur ne porte pas directement sur sa constitution de premier ordre en tant que système physique, mais sur sa capacité d'ordre supérieur de mémoriser, d'analyser, et de conceptualiser. Est-ce que cette double caractérisation de l'observateur, en tant que système physique et en tant que dispositif de traitement de l'information, ne vous amène pas à une conception *fonctionnaliste* de l'esprit, selon laquelle au niveau de base se trouve un certain dispositif *matériel*, tandis qu'au niveau d'organisation supérieur se trouve l'équivalent d'un *logiciel* ?

Alexei Grinbaum. Je crois, précisément, pouvoir sortir du piège lié au mot « esprit ». Quand je parle de la complexité de l'observateur en tant qu'observateur, j'évoque une notion assez précise, qui est la complexité de Kolmogorov, la complexité algorithmique, c'est-à-dire une caractéristique mathématique invariante – la seule, d'ailleurs, de l'algorithme d'identification des systèmes. L'observateur identifie d'abord ce qu'est le système quantique. Il identifie le degré de liberté du système quantique, pour en tenir compte. Ce processus peut être décrit comme un algorithme dans le sens très abstrait.

Quel que soit le support physique de l'observateur, cet algorithme possède une caractéristique invariante, qui est la complexité de Kolmogorov. Le contenu physique ne joue pas de rôle, dans cette description. En effet, on sait (ces théorèmes sont démontrés) qu'à une constante près, cela ne dépend pas du contenu physique de tel système – tout comme un ordinateur peut effectuer un même programme sur plusieurs supports physiques différents.

Pour moi, la question du support ne mène pas nécessairement au dualisme, mais elle est simplement non pertinente pour cette description. Ce niveau de description n'a rien à dire sur le système physique concret qu'identifie l'observateur – qui peut être un être humain, un papillon, une planète entière etc. Dès lors qu'il identifie un système quantique, il a des caractéristiques invariantes en tant qu'algorithme identifiant les systèmes. Cela suffit.

Bernard d'Espagnat. Un réaliste de la « vieille école » - école aux idées de laquelle personnellement je n'adhère pas mais dont je connais et ai connu nombre d'adeptes, en particulier John Bell - vous demanderait probablement si l'ensemble de votre analyse est compatible avec ses vues et peut être acceptée par lui. Les réalistes « ancienne manière » considèrent que des choses, atomes ou autres, existent en soi. Elles existent, avec toutes leurs propriétés, tout à fait indépendamment de la question de savoir s'il existe des êtres conscients qui seraient susceptibles de les connaître. Est-ce qu'on peut mettre votre conception générale dans un langage qui ne ferait intervenir que les *be-able* de John Bell ? La question se pose.

Alexei Grinbaum. En effet. De la même façon qu'un logiciel de traitement de texte peut être entièrement décrit dans le langage des atomes qui composent l'ordinateur, des transistors et de leurs états physiques – ce qui est inutile pour comprendre leur fonctionnement, un observateur peut être décrit, pour citer Einstein, dans une « théorie constructive » – mais cela n'aide pas à comprendre la mécanique quantique.

Bernard d'Espagnat. Cela n'aide pas, mais pensez-vous que c'est compatible ? C'est cela, la question.

Alexei Grinbaum. Je pense que chaque observateur, tout en étant un observateur physique, peut être décrit en tant que système physique. Cela ne nous renseigne pas sur ses capacités en tant qu'observateur quantique. De la même façon que la description d'un ordinateur en tant que système physique ne nous renseigne pas sur le traitement de texte qu'il opère.

Jean Petitot. C'est exactement la définition du fonctionnalisme dans les théories cognitives.

Alexei Grinbaum. Se pose la question du support. Qu'est-ce qui porte la fonction ?

Jean Petitot. Le support où l'on implémente l'algorithme est non pertinent pour ce que fait l'algorithme comme algorithme de traitement de l'information.

Alexei Grinbaum. Je suis d'accord sur ce point.

Jean Petitot. C'est vraiment la définition du fonctionnalisme. Nous retrouvons donc là la question posée plus haut par Michel Bitbol.

Alexei Grinbaum. Pas complètement, parce qu'il n'est pas question d'esprit.

Jean Petitot. L'esprit, c'est tout simplement que le mental fonctionne de façon fonctionnaliste par rapport au neuronal.

Michel Bitbol. Il semble bien qu'il y ait là des conceptions différentes de l'esprit. Alexei, vous craignez sans doute (peut-être à juste titre) que parler d'esprit engage nécessairement à y associer la conscience. Mais dans le paradigme fonctionnaliste, l'esprit est seulement défini en première instance comme un complexe de fonctions de traitement de l'information et de direction des actions, implémentable sur toutes sortes de supports matériels. Le mot « esprit » est utilisé spécifiquement comme marqueur d'un niveau fonctionnel et informationnel d'organisation qui s'oppose au niveau de son substrat élémentaire.

Alexei Grinbaum. L'élément qui permet de distinguer ces deux niveaux est, je pense, l'efficacité de telle ou telle description pour construire des théories. La seule raison qui peut nous pousser à faire ce pas est d'essayer d'expliquer des choses qu'on ne peut pas expliquer autrement.

Michel Bitbol. C'est très important, ce que vous dites là. Cela signifie qu'un processus aussi important pour la physique quantique que la décohérence ne peut pas s'expliquer si on décrit l'observateur seulement en tant que système physique : il faut lui assigner des propriétés fonctionnelles, des propriétés qui relèvent du logiciel plutôt que du matériel. Il faut peut-être même lui assigner des projets, des *visées*, par exemple celle d'extraire une fraction de l'apparaître et de la traiter comme un système physique

Alexei Grinbaum. Je n'irais pas jusqu'à dire « visée ».

Michel Bitbol. Tout de même, n'y a-t-il pas une forme de circularité dans votre approche ? D'un côté, pour dériver le processus de décohérence, il faut faire intervenir d'emblée un niveau de description non-physique de l'observateur (d'ordre informationnel et algorithmique). De l'autre côté, c'est à la décohérence qu'on demande de rendre compte d'un niveau d'organisation supérieur à celui que décrit la physique quantique : précisément celui qui permet une description informationnelle et algorithmique..

Alexei Grinbaum. Ce cercle fait partie des cercles explicatifs que l'on connaît ailleurs, qui apparaissent chaque fois qu'on a affaire à une théorie principielle, c'est-à-dire une théorie fondées sur quelques principes ou postulats. J'ai en tête la distinction, dont on discute depuis un siècle, et vous avez certainement beaucoup à en dire, entre la théorie principielle et la théorie constructive.

La théorie constructive commence par un niveau physique fondamental qu'on croit faire partie de la réalité, puis théorise cette réalité, tandis que la théorie principielle opère toujours par des cercles, car d'où viennent les principes que l'on pose dans son fondement ? Ils proviennent de l'analyse qui est la nôtre, des systèmes qui nous entourent. Ensuite, nous les avons « élevés », comme disait Einstein, au rang des principes. De la même façon, j'élève certaines choses au rang des principes – choses qui proviennent de l'expérience physique que nous avons tous.

Bernard d'Espagnat. De l'expérience physique que nous avons, autrement dit abstraction faite de toute préconception quant à la nature de ce qui suscite en nous cette expérience. Est-ce bien cela ?

Alexei Grinbaum. Au sens pragmatique et pas nécessairement empirique.

Bernard d'Espagnat. D'accord.

Alexei Grinbaum. Ce n'est pas pour défendre un empirisme, mais une raison pragmatique qui motive tel principe et pas tel autre.

Hervé Zwirn. Le concept de "complexité de Kolmogorov de l'algorithme qui identifie l'observateur dans le système" me semble peu clair. Il s'agit là de quelque chose qui me paraît extrêmement difficile à définir rigoureusement. On sait définir précisément la complexité de Kolmogorov d'une chaîne de caractères ou d'une chaîne de bits.

En revanche, définir ce qui caractérise un observateur en tant que système auquel on attribuerait une complexité de Kolmogorov me semble se heurter à de grandes difficultés. J'ai des doutes quant au sens même que l'on pourrait accorder à l'expression « la complexité de Kolmogorov de l'observateur ».

Alexei Grinbaum. De quelle complexité de Kolmogorov s'agit-il ? De celle de l'observateur en tant qu'algorithme qui identifie le système observé. Que signifie « identifier le système » ? L'image que je donne de ce procédé est la suivante. Imaginez un long ruban, comme dans une machine de Turing, avec tous les degrés de liberté. Cet algorithme consiste à placer des croix en face des degrés de liberté pertinents. Cette vision est évidemment très abstraite, aussi abstraite que l'est une machine de Turing.

Par exemple, un observateur humain qui indique observer un électron signifie que cet électron possède un certain nombre de degrés de liberté. Mais est-ce qu'un fullerène identifie

un système quantique, par exemple un photon, comme un homme l'identifie ? Nous discutons actuellement de ce sujet à Vienne, avec des collègues. Peut-on observer des différences au niveau thermodynamique ? Nous avons déjà exprimé quelques idées en la matière.

La mémoire de l'observateur peut constituer un certain nombre de degrés de liberté réalisés de façon diverses. Ce que fait l'observateur, en tant qu'algorithme qui identifie les systèmes, c'est indiquer quel sont les degrés de liberté qu'il s'apprête à observer. C'est cela, l'algorithme dont la complexité de Kolmogorov est un invariant, au niveau abstrait. L'homme n'identifie pas les degrés de liberté de la même façon qu'un fullerène le fait, mais un fullerène peut aussi le faire.

Hervé Zwirn. Certes, mais je crois qu'il existe une différence significative entre un algorithme qui consisterait à mettre des croix dans une liste de degrés de liberté (ce qui peut en effet être effectué par une machine de Turing avec un programme approprié) et ce que l'on entend par "observateur". Ce n'est pas la même chose. J'ai de plus un peu perdu le fil de la discussion quant à la question que l'on cherche à résoudre.

Revenons à la fin de l'exposé de Jean-Michel Raimond lors de la précédente séance. Nous avons posé le problème, non pas expérimental mais philosophique, autour de la décohérence, comme étant la nécessité premièrement d'expliquer l'apparence du monde classique pour les observateurs humains et, deuxièmement, de savoir si cette apparence classique était simplement une apparence ou si le monde était réellement – pour qui est réaliste - devenu classique. Le débat qui se posait, en tout cas tel que nous l'avions évoqué lors de la dernière séance, consistait à identifier deux questions : pourquoi le monde apparaît-il classique et est-il véritablement classique puisqu'il apparaît comme tel ?

J'ai un peu de mal à voir à quelle question répond ce que vous proposez et s'il existe des liens avec les questions que nous nous étions posées et qui sont les questions que l'on se pose habituellement lorsqu'il est question de décohérence. C'est en l'occurrence, d'ailleurs, les questions qu'avait évoquées Zurek lui-même au début de ses articles. La première position de Zurek était extrême, au sens où ce dernier avait conclu ses premiers articles en affirmant que le monde devient classique et que le problème est, de ce fait, réglé. Monsieur d'Espagnat était alors intervenu auprès de Zurek – et il n'avait pas été le seul à le faire. La seconde position de Zurek était alors celle d'une conception un peu plus modérée de la décohérence. Je le répète, j'ai du mal à faire le lien entre cela et ce que vous proposez.

Alexei Grinbaum. Je vois une ironie de l'histoire. En effet, ce que je propose correspond assez bien, même si je propose des modifications, aux travaux de Zurek qu'il a conduits bien plus tard, aux environs de 1994.

Je tenterai ici de répondre à votre première question, laissant de côté la seconde qui relève d'un autre raisonnement. Dans cette première question, vous évoquez l'observateur humain. Je n'ai pas assisté à votre précédente séance. Cela étant, je pense que la question sur l'observateur humain mérite d'être élargie. Il importe, avant tout, de se demander si l'observateur est nécessairement humain ou pas. Se pose ensuite la question de savoir quelle est sa caractérisation minimale. Comment comprendre cette notion d'observateur ? Scientifiquement, il faut chercher à donner une caractérisation informationnelle minimale de ce qu'est l'observateur. Ma réponse serait de dire que l'observateur est un algorithme d'identification des systèmes. Point barre. C'est ma définition.

A partir de là, j'essaie de conceptualiser la notion de décohérence. Tel est le schéma de mon raisonnement.

Section 2 – Echanges relatifs à la conception standard de la décohérence.

Bernard d’Espagnat. Ces recherches sur la complexité algorithmique appliquée à l’observateur sont assurément prometteuses et nous aurons l’occasion d’y revenir. Mais j’estime comme Hervé Zwirn qu’elles ne doivent pas nous faire oublier les questions que nous nous posons relativement à la conception standard de la décohérence, fondée sur la notion d’environnement. Vous avez évoqué Zurek et ses récents articles. Peut-être est-ce l’occasion pour moi de vous communiquer ce que j’ai tiré de sa lecture, en particulier de la lecture de son important article de 2003.

Jean-Michel Raimond. Celui de *Review of Modern Physics* ?

Bernard d’Espagnat. Oui, celui-là même. J’ai trois remarques à formuler concernant cet article.

Tout d’abord, Zurek écrit, en page 51 de la version ArXiv du texte, : « *many conceptual and technical issues (such as what constitutes ‘a system’) are still open* », corroborant ainsi la remarque qu’il exprime dès la page 4 et selon laquelle il faut *admettre* l’existence de l’environnement, autrement dit, la distinction entre système et environnement. Cela montre que cet article ne prétend pas résoudre le problème qui, dans nos précédentes séances, nous a paru plus ou moins à tous rester ouvert, celui de l’existence des systèmes.

Jean-Michel Raimond. A cela près que si on renonce à cette existence, on a un petit problème...

Bernard d’Espagnat. Oui certes, puisque c’est sur la distinction en question qu’est fondée la décohérence et donc, finalement, la résolution théorique du paradoxe du chat. Mais sur ce premier point je désire seulement noter ici que selon moi dans le cadre de la mécanique quantique standard l’existence des systèmes est une apparence pour nous, qu’il ne faut pas les concevoir comme existant en soi, et que je trouve dans l’article de Zurek lui-même une sorte d’écho à cette thèse puisqu’en page 4, il écrit : « *einselection delineates how much of the Universe will appear classical to observers who monitor it from within using their limited capacity to acquire, store, and process information* » (c’est moi qui souligne).

C’était là ma première remarque, qui revient à souligner qu’apparemment nous ne sommes pas capables de connaître le réel en soi. Que nous pouvons seulement connaître des apparences valables pour tous. Les deux autres vont dans le même sens.

La deuxième concerne la manière dont, implicitement, Zurek apporte une sorte de solution au problème « conceptuel » que certains d’entre nous avons soulevé la dernière fois, à savoir le passage du « et » au « ou », et plus précisément au passage à un « ou » vraiment compris comme le *choix* d’une des éventualités parmi plusieurs. Comment, et où, fait-il cela? Il le fait à l’endroit où, dans le but de prouver la règle de Born, il s’intéresse aux probabilités. Il montre d’abord (à partir des principes quantiques n’impliquant pas les probabilités) que le résultat d’une mesure d’une observable ne peut être qu’une des valeurs propres de cette observable. Ensuite (p.37), il s’intéresse au cas où plusieurs résultats sont possibles, et en particulier aux cas où les coefficients des différentes composantes de la fonction d’onde du système développée selon les vecteurs propres de l’observable mesurée sont égaux en valeur absolue. Il continue, bien sûr, à parler au singulier du résultat de la mesure, car il admet implicitement (mais c’est selon moi le point essentiel !) l’évidence qu’une mesure n’a qu’un résultat. Que si deux résultats sont possibles il faut, par conséquent, que ce soit l’un *ou* l’autre. Et il montre, cette fois explicitement, que dans le cas considéré ce sera avec 50/50 de

probabilité. Comme vous le voyez, pour ce passage du « et » au « ou » (et je le souligne encore une fois, au « ou » compris au sens fort, c'est à dire comme impliquant un vrai choix fait par le hasard entre diverses éventualités), la notion de mesure en tant que telle, c'est à dire impliquant l'idée que le résultat est nécessairement unique, joue, dans l'article, un rôle essentiel. Pour ma part, je ne vois pas par quoi, dans une telle visée, l'on pourrait remplacer cette notion de mesure effectuée par un agent.

Ma troisième remarque concerne les notions d'événement et d'histoire, pour laquelle Zurek introduit celle de « *relatively objective past* ». Il écrit « *when many observers can independently gather compatible evidence concerning an event, we call it relatively objective. Relatively objective history is then a time-ordered sequence of relatively objective events.* » Il me semble qu'on retrouve là l'interprétation antiréaliste bien connue. Dire que tel événement s'est produit à tel moment signifie que nous sommes nombreux à disposer de documents mentionnant la chose et ne veut dire que cela.

Comme vous le voyez, tout cela conduit à ce que, maintenant, on appelle parfois « l'objectivité faible ». Zurek l'appelle « objectivité relative », mais ce n'est qu'une question de mots. Comme l'écrivait Pascal (dans les *Provinciales*) : « je ne discute jamais du nom pourvu qu'on m'avertisse quel sens on lui donne ». Ainsi donc Zurek, en dépit d'apparences contraires, car à le lire rapidement, on éprouve parfois l'impression qu'il veut revenir au réalisme traditionnel, ne revient pas vraiment à ce réalisme là ni ne vise, au fond, à y revenir.

Telle est ma conception. Il me semble qu'à certains égards celle d'Alexei Grinbaum n'est pas très loin.

Alexei Grinbaum. J'essaie de faire un pas de plus, tout en acceptant le raisonnement de Zurek. Quand il dit qu'on ignore ce que signifie la notion de système et que la question reste ouverte, il utilise l'argument algorithmique, la complexité de Kolmogorov pour étudier le changement d'état du système. Il pose, lui, la question de savoir quelle est la complexité de cet algorithme, qui passe de tel état à tel autre. C'est là qu'il emploie les idées algorithmiques.

Pour ma part, je pense qu'en amont, avant de parler des états du système quantique, dans le même courant de pensée que Zurek, il faut appliquer ce raisonnement algorithmique à la question qu'il pose concernant la notion de système. Pour le reste, je pense qu'on peut tout à fait suivre Zurek et qu'il n'est pas question de réalisme au sens de Bell, par exemple, ou au sens encore pratiqué par plusieurs physiciens à Oxford aujourd'hui.

Le mot clé, chez Zurek, est « *relatively* » : tout est relatif à l'observateur.

Bernard d'Espagnat. C'est cela, tout est relatif à l'observateur.

Jean-Michel Raimond. La contribution importante, me semble-t-il, de ce papier, est de bien expliquer qu'il y a une objectivité relative à plusieurs observateurs indépendants, qui sont tous parts de l'univers et qui tous partagent une partie de l'environnement. Toutes ces parties de l'environnement leur fournissent la même information sur le système si celui-ci est dans un état pointeur. Il y a donc une réalité objective commune pour ces observateurs.

Alexei Grinbaum. Absolument.

Jean-Michel Raimond. C'est une remarque intéressante.

Alexei Grinbaum. A ce moment-là, comme j'essaye de le montrer dans mon article, on peut parler d'objectivité par rapport à une classe d'observateurs. La question est celle des frontières de cette classe pour que l'objectivité partagée ait un sens.

Jean-Michel Raimond. A votre sens, un seul spin de l'environnement n'est pas un observateur recevable, parce qu'il n'est pas assez complexe pour avoir une information non ambiguë et classique sur l'état du système ?

Alexei Grinbaum. En effet. Par exemple, jusqu'où peut-on aller tout en conservant la même notion d'objectivité ?

Bernard d'Espagnat. Il me semble qu'il y a de nombreux progrès techniques et même conceptuels dans ce qui a été fait par beaucoup de gens – Zurek, vous-même et beaucoup d'autres. Mais il me semble aussi que, finalement, au point de vue philosophique, tout cela se rapproche plus de la ligne de Bohr que de celle des réalistes traditionnels.

Alexei Grinbaum. Oui.

Jean-Michel Raimond. Si tous les observateurs de l'univers, quels qu'ils soient, pourvus qu'ils soient suffisamment complexes, j'agréerai sur ce point, sont d'accord sur une réalité, cette réalité prend quand même une objectivité qui me paraît plus forte que faible.

Bernard d'Espagnat. Je l'ai appelée « faible » dans mes textes pour la raison qu'à elle seule elle n'est pas capable de conférer un sens à une assertion aussi évidente en apparence que : « le Soleil existerait même si aucun observateur n'avait jamais existé » ; et parce qu'il me fallait dès lors un adjectif pour la distinguer de l'objectivité – possiblement illusoire ! - du réalisme conventionnel, lequel considère l'assertion en question comme sensée et même comme allant de soi. Essentiellement, mon but était de bien faire voir qu'il existe deux conceptions possibles de l'objectivité et non une seule comme on le croit communément et que c'est une erreur de les identifier. Et dans cet esprit j'ai donné le nom d'objectivité forte à l'objectivité de ce réalisme conventionnel. Zurek qualifie de « relative », sous-entendu à l'observateur, l'objectivité que j'appelle faible. C'est très bien. Pour la lisibilité c'est peut-être même meilleur, dans la mesure où, comme vous le faites observer, cette objectivité est quand même extrêmement forte.

Olivier Rey. J'éprouve simplement une difficulté, si l'on parle de l'objectivité à partir d'un accord entre observateurs et si, d'un autre côté, on élargit la classe des observateurs à énormément de choses, y compris jusqu'à des molécules : comment constate-t-on ou établit-on un accord avec une molécule ?

Alexei Grinbaum. Je ne pense ni que cet accord soit acquis ni qu'il soit une évidence à démontrer. Je pense qu'il faut d'abord poser la question de savoir si l'on peut caractériser les classes d'observateurs pour qui s'établira cet accord. Franchement, je pense moi-même qu'en tant qu'observateur, un fullerène ne génère pas la même notion d'objectivité que l'observateur humain.

La question que je me suis posée ensuite consistait à savoir si l'on pouvait imaginer une expérience physique qui pourrait corroborer cette vision du fullerène en tant qu'observateur. C'est ce que j'ai essayé de faire – mais ce n'est pas le sujet. En tout cas, l'accord entre les différents observateurs n'est pas un accord entre tous les observateurs, mais entre certaines classes d'observateurs.

Bertrand Saint-Sernin. Je me permets d'intervenir plutôt pour vous demander des informations ou un conseil. Je dois, demain matin, parler devant l'Association française de biologie végétale de la différence entre nature et artifice, à propos du problème particulier des

organismes génétiquement modifiés (OGM). Vous savez qu'il existe une spécificité française, qui est le refus des OGM. Or un des arguments utilisés touche précisément à la notion de réalisme. Au fond, le problème est le suivant : est-ce qu'un corps obtenu par synthèse ou à la suite de modifications effectuées en laboratoire peut avoir les mêmes propriétés et être considéré comme identique à un corps qui a évolué sous l'effet de causes dites naturelles ?

Le problème n'est donc pas celui de l'observateur, mais de l'utilisateur. On s'aperçoit d'une chose tout à fait singulière : les anti-OGM qui ont un cancer, un problème cardiaque ou encore du diabète n'éprouvent aucune difficulté à utiliser l'insuline ou des fluidificateurs du sang etc. En revanche, il existe une crispation sur les problèmes de nourriture.

La première question que je souhaite poser est celle-ci. Quel est le point de vue du chimiste quant aux corps obtenus par synthèse, comme il en existe, d'après ce que j'ai entendu dire, 22 millions depuis 1928 ? Lorsqu'on reproduit une substance naturelle (par exemple, l'insuline humaine fournie aux diabétiques constitue des levures génétiquement modifiées – et l'utilisateur les admet), est-ce que vous feriez entrer cela dans la catégorie du réalisme ? Pratiquement, c'est bien ce que demandent les utilisateurs. Ils veulent être rassurés, savoir que si on leur donne de l'insuline génétiquement modifiée, elle a les mêmes propriétés que l'insuline naturelle que leur organisme ne fabrique pas en quantité suffisante. Il en est de même pour de nombreux autres corps.

A mon avis, le problème du réalisme se pose d'abord dans un domaine pratiqué sur une énorme échelle au point de vue quantitatif dans la population du monde. La question est de savoir comment donner des justifications théoriques pour leur dire soit vous avez raison d'être réalistes, soit vous avez tort de l'être. Ont-ils raison dans le domaine de la chimie ? Ont-ils raison dans le domaine biologique ? Je n'en sais rien.

Olivier Rey. Il faut distinguer les situations. Dans le cas de l'insuline pour les diabétiques, ce n'est pas l'OGM qui est absorbé, mais uniquement son produit. C'est-à-dire qu'on a recours à des levures génétiquement modifiées, cultivées en laboratoire et qui n'en sortent pas, pour produire des molécules d'insuline exactement identiques à celles élaborées directement par le corps humain. Dans le cas des OGM alimentaires en revanche, le maïs par exemple, ce qu'on mange est l'organisme génétiquement modifié en lui-même, qui a une composition moléculaire différente du maïs traditionnel puisque son ADN est différent. Ensuite, l'incidence de cette différence chez le consommateur ou dans l'environnement est une autre question.

Bertrand Saint-Sernin. Oui certes mais la question que je pose est seulement celle-ci. A-t-on raison d'affirmer que les molécules chimiques obtenues par synthèse et dont on a pu établir qu'elles sont identiques à des molécules que l'on trouve dans la nature, ont les mêmes effets que celles-ci ? Est-ce que ce raisonnement vaut, ou est-ce que la mécanique quantique modifie la perspective ?

Jean-Michel Raimond. Une molécule qui a la même composition chimique et la même conformation est la même molécule. La mécanique quantique ne dit rien de différent. A moins d'être animiste, une molécule qui a été produite par quelque moyen que ce soit (OGM, synthèse organique explicite ou synthèse naturelle) a exactement les mêmes fonctions et propriétés.

Bertrand Saint-Sernin. C'est admis en Amérique, mais pas en France.

Bernard d'Espagnat. Jean-Michel Raimond a, bien entendu, tout à fait raison. Mais je voudrais préciser le rapport entre la question de Bertrand Saint-Sernin et les matières que

nous débattons aujourd'hui. Je dirai que, dans la terminologie à laquelle nous étions arrivés voilà quelques minutes, si l'on croit que la mécanique quantique est une théorie universelle le réalisme auquel se réfèrent aussi bien les chimistes que les pro- ou les anti- OGM renvoie nécessairement à l'objectivité que j'appelais « faible » et que Zurek appelle « relative ». Tous les phénomènes, aussi bien cette table que tous les éléments présents dans cette salle, sont des apparences qui sont les mêmes pour tous les êtres humains et probablement pour tous les êtres conscients. Ils font partie de cette réalité relative à la notion d'observateur. Ce que j'avance en ce domaine c'est seulement qu'au vu des principes constitutifs de la mécanique quantique standard ils ne peuvent pas être considérés comme objectifs au sens que j'ai qualifié de « fort », c'est à dire au sens que le réalisme courant attribue au mot « objectif ».

Par conséquent je ne crois pas, moi non plus, que la mécanique quantique ait quelque chose de particulier à dire concernant le problème que vous soulevez. C'est ma première conclusion, ma seconde, qui s'en suit, étant, je le répète, que sur ce point là je pense être tout à fait d'accord avec Jean-Michel Raimond. Il n'y a pas de différence.

Hervé Zwirn. Si l'on revient aux questions que nous nous étions posées la dernière fois, je voudrais exposer un point de vue très simple et voir si nous le partageons ou pas. Il concerne la description du problème telle que nous l'avions arrêtée à la fin de la dernière réunion.

Nous nous étions posé la question de savoir si le problème de la mesure (qui consiste à ne pas être capable, en mécanique quantique orthodoxe hors décohérence, de sortir de ce chaînage de superpositions successives qui intervient à chaque nouvelle interaction entre le système initial, puis un appareil de mesure, puis l'observateur etc., et qui semble indiquer que l'observateur se retrouve dans un état superposé), est résolu par la décohérence qui permet de briser ce chaînage. Nous nous étions demandé s'il faut un observateur conscient ou pas et si ce à quoi on aboutit peut être interprété comme étant réel au sens du réalisme fort, ou bien s'il faut considérer qu'au-delà des apparences, le monde reste profondément quantique. Telles sont les questions que nous nous étions posées.

Jean-Michel Raimond avait alors énormément insisté, à juste titre, en disant que de toute façon, la mention « *for all practical purposes* » signifie que l'on peut considérer que tout se passe comme si c'était classique. Le débat que nous avons eu à un moment donné consistait à dire que nous étions évidemment d'accord sur ce côté pratique, tout en nous demandant s'il était possible d'affirmer, philosophiquement parlant, que la conclusion est que le monde est classique ou pas.

J'ai une proposition à vous faire. Elle est très simple. Je voudrais simplement vous demander si nous sommes d'accord sur le processus suivant. Lorsqu'un système se couple à un appareil de mesure puis à un environnement, on aboutit à un grand système S+A+E comprenant le système lui-même, l'appareil de mesure et l'environnement. Ce grand système est dans un état superposé et son opérateur densité contient des éléments non diagonaux. Les règles habituelles de la mécanique quantique prescrivent que si un observateur fait une mesure en s'abstenant de mesurer les degrés de liberté concernant l'environnement (une telle mesure concerne des observables hors de portée de l'observateur), le système S+A sera décrit en faisant la trace partielle sur l'environnement de l'opérateur densité du grand système et le calcul montre que, en général, les éléments non diagonaux de cette trace deviennent très vite très petits (c'est le "temps de décohérence") et le restent extrêmement longtemps. Pratiquement la description du système S+A est donc finalement équivalente, pour un observateur qui ne fera pas les mesures qui sont infaisables, à celle donnée par un opérateur densité diagonal. La dernière fois, nous avons eu un débat sur les éléments non diagonaux, qui peuvent éventuellement redevenir non négligeables au bout d'un temps qui, de toute façon, est hors de portée – mettons donc ce sujet de côté.

Puisque l'opérateur densité qui décrit le système tel qu'il est accessible à l'observateur est pratiquement équivalent dans toutes ses conséquences observables à un opérateur densité diagonal, sommes-nous d'accord pour dire qu'en réalité, au sens fort du terme, le monde reste quantique et peut être superposé, mais que cela n'a aucune importance parce qu'on ne peut pas s'en rendre compte ? C'est un peu l'équivalent, en termes de situation, à ce qui se passe en relativité : le monde n'est pas un monde classique, c'est un monde relativiste. Mais, aux faibles vitesses, les effets relativistes étant totalement invisibles, le monde nous apparaît classique. On aurait là une situation qui serait exactement la même : le monde est en fait quantique, mais les effets quantiques étant, à notre échelle, pour ce type de mesure, invérifiables, il nous apparaît classique.

Nous pourrions donc concilier les points de vue énoncés lors de la discussion que nous avons l'autre fois, en considérant que le monde est quantique et que jamais il ne devient classique au sens ancien du terme, mais que cet aspect quantique n'a aucun effet visible – le monde nous apparaissant donc classique. L'un des problèmes, me semble-t-il, dans cette discussion philosophique, vient de ce que très souvent, on pense que parce que quelque chose est qualifié de quantique, cela doit avoir un effet visible étonnant, qui soit différent du monde classique. En réalité, ce que montre la décohérence, c'est qu'un système peut être totalement quantique tout en ayant un comportement qui nous apparaît classique, sans que cela pose le moindre problème.

Pourrions-nous être d'accord sur ce point, ou pas ?

Bernard d'Espagnat. Votons ! Pour ma part, je suis pour.

Jean-Michel Raimond. Je dois dire que je n'aimerais pas une théorie qui nécessite la conscience pour définir l'observateur. Que l'observateur doive être un système complexe, que l'observateur puisse être une partie de l'environnement me paraît une approche raisonnable. Auquel cas, cette partie de l'environnement peut être les quelque 60 x 3 degrés de liberté d'un fullerène ou peut être un thésitif normalement constitué. N'importe quoi entre les deux me paraît constituer un observateur raisonnable.

Effectivement, j'ai l'impression que vous proposez une approche « décohérence plus Everett ». Nous savons bien que tout est superposé. Nous savons bien que nous sommes dans la fonction d'onde de l'univers. Mais, moi observateur, vous observateurs observant le même phénomène et tout observateur raisonnable observant toutes les copies disséminées dans l'environnement du même phénomène seront d'accord sur le fait que ce phénomène a une réalité objective et que l'observable mesuré a une valeur objective.

Bernard d'Espagnat. Relative.

Jean-Michel Raimond. Dans notre univers, nous sommes tout à fait d'accord sur tout. Moyennant quoi, si tout, dans l'univers, est d'accord pour dire que le spin de l'électron est plus, pourquoi ne pas dire que c'est la vraie réalité ?

Bernard d'Espagnat. C'est une question de convention. Effectivement, pourquoi ne pas dire que quand tout ce qui, dans l'univers, possède la qualité d'observateur est d'accord sur une certaine constatation, ce qui est ainsi constaté est une « vraie » réalité ? C'est ce que beaucoup, dont je suis, appellent la « réalité empirique », dans laquelle tous les vivants sont immergés et que nombre de philosophes appellent « réalité » tout court. Cela étant, il est bon de faire la différence entre cette notion là et celle d'une réalité « en soi » qui existerait même si n'existait aucun observateur. A priori il est concevable que ces deux notions aient le même champ de référence mais ceci est un postulat, non une vérité d'évidence. Et un postulat

difficile à concilier avec la mécanique quantique standard, même complétée par la décohérence.

Jean-Michel Raimond. Si je puis me permettre, la notion très « zurekienne » de l'existence d'un environnement complexe qui se partage en plusieurs parties qui toutes sont d'accord sur ce qu'est l'état du système (c'est ce que Zurek dit, assez justement je crois, dans ses papiers des années 2000) veut quand même dire que ce n'est pas défini en tant qu'il y a un observateur, mais que c'est l'univers dans son ensemble qui est d'accord pour considérer que cette sous-partie de l'univers est dans tel état. Il n'est pas besoin de définir un observateur ou une conscience. C'est tout l'univers qui est d'accord.

Bernard d'Espagnat. La notion zurekienne dont vous parlez apparaît comme une conséquence de sa démonstration, effectivement très éclairante, du fait que la non isolation des systèmes macroscopiques entraîne l'existence, publiquement connue, d'observables robustes, au sens que, une fois qu'elles ont été mesurées par quelqu'un, tous les observateurs savent qu'ils pourront les re-mesurer, éventuellement en alternance, sans modifier leurs valeurs. Et cela, même en ne faisant que des mesures indirectes portant sur des objets intermédiaires, d'où cet accord universel que vous évoquez. Il est indéniable en tout cas que celui-ci est de nature à donner aux observateurs en question un très fort *sentiment* de la réalité de ce qu'ils observent. Mais le problème du passage du « et » au « ou » n'est pas résolu pour autant car c'est une question plus fondamentale, qui se pose en amont. Zurek la résout implicitement par l'appel qu'il fait à la notion de branche d'univers, autrement dit à la théorie d'Everett (« Distinct memory states label and 'inhabit' different branches of the Everett's 'Many Worlds' Universe », p.5). C'est effectivement une solution possible mais personnellement je n'arrive pas à croire à cette théorie des mondes multiples, en laquelle je vois une tentative d'explication métaphysique comparable par sa précision à nombre de tentatives métaphysiques antérieures et, comme elles, manquant de crédibilité précisément pour cette raison.

Hervé Zwirn. Sur ce point précis, il existe une bifurcation dans le raisonnement.

On peut soit dire que la décohérence se fait "à la Everett", c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une seule fonction d'onde avec coexistence de toutes les possibilités. Ou bien on peut dire qu'il existe à un moment donné, un choix dans le « ou » de tous les états possibles, sans cette coexistence – qui pose quand même un grand nombre de problèmes –. Il y a donc là une première bifurcation. On peut faire l'un ou l'autre choix. Chacun pose des problèmes de nature différente.

Par ailleurs, même si l'on prend la définition « à la Everett », où tout coexiste et où chaque branche d'univers correspondant à un choix est en accord avec elle-même, ce n'est pas pour autant que la réalité décrite devient objective – cela nous ramène à notre discussion de la dernière fois. Tout simplement parce que reviennent sur le devant de la scène, ces éléments non diagonaux qui sont pour nous hors de portée mais ne sont pas rigoureusement nuls. On peut alors penser qu'il y a une différence entre le fait que le spin est rigoureusement en haut tout court et le fait qu'il est pratiquement en haut avec des éléments non diagonaux qui vont (même dans très très longtemps) redevenir importants. Il y a là une nuance. Le débat que nous avons eu la dernière fois sur les probabilités faibles reprend tout son sens : ou bien on considère que les probabilités faibles n'ont pas de sens et qu'à partir d'un certain seuil, il y a

un *cut-off* et on les met à zéro ; ou bien on considère qu'aussi petites soient-elles, elles gardent un sens.

Jean-Michel Raimond. Du point de vue des observateurs, les deux possibilités (soit il y a une fonction d'onde globale et on est dans une de ces branches, soit il y a eu effectivement un choix) sont indistinguables. La question qui se pose, bien sûr, est de savoir si on peut trouver des expériences discriminantes pour vérifier ce point de vue. Il y a eu nombre de propositions sur des mécaniques quantiques stochastiques ou autres, qui effectuent elles-mêmes une réduction du paquet d'ondes, qui ne sont pas dans l'état actuel décelables expérimentalement, mais qui peuvent le devenir. Pour l'instant, non.

Alexei Grinbaum. La décohérence fait partie de la physique.

Hervé Zwirn. Nous sommes bien d'accord.

Alexei Grinbaum. Ensuite, on peut coller n'importe quelle interprétation de la mécanique quantique parmi toutes les interprétations que nous connaissons depuis plusieurs dizaines d'années : chacune vit très bien avec l'existence de phénomènes de décohérence. Aucune n'est vraiment effacée de la carte. Je pense qu'il y a une confusion chez Zurek – et pas seulement chez lui, mais aussi chez Gell-Mann et Hartle, par exemple. En effet, pour moi, leur description du phénomène physique et leur interprétation philosophique de la mécanique quantique sont trop rapprochées. Ce qu'énonce Zurek est son interprétation de la physique quantique. Ce n'est pas quelque chose qui est exigé par l'existence du phénomène de décohérence. Par conséquent je ne suis pas certain qu'il faille chercher un accord entre nous : chacun peut avoir son interprétation préférée.

Hervé Zwirn. Pour répéter ce que j'ai dit, je voulais simplement savoir si nous étions d'accord sur le fait que le mécanisme de décohérence, tel que je l'ai décrit de la manière simple tout à l'heure, donne une explication de l'*apparence* du monde pour un observateur humain. C'est une première étape. De nombreuses autres questions se posent ensuite. Simplement, sur la question de savoir pourquoi le monde nous apparaît tel qu'il nous apparaît, qui, hors décohérence, posait problème (de nombreuses hypothèses, y compris celle de la réduction du paquet d'ondes par la conscience, sont maintenant plus ou moins abandonnées par la plupart des physiciens), est-ce que nous sommes d'accord pour considérer que ce problème-là est quasiment réglé par le mécanisme de décohérence ? Bien sûr, cela n'apporte pas pour autant une solution définitive au problème du réalisme.

Alexei Grinbaum. A condition que nous soyons d'accord pour considérer que ce problème de l'apparence ou de l'apparition du monde tel que nous le voyons n'est pas la même chose que le problème de la mesure. Le problème de la mesure, pour moi en tout cas, n'est pas résolu par la décohérence. Le problème de comprendre ce qui se passe *for all practical purposes* est résolu par la décohérence. Mais ce n'est pas la même chose que le problème de la mesure, qui n'est pas pour autant résolu. Le choix de la base préférée, le passage de « et » vers « ou » etc., toutes ces reformulations du problème de la mesure, ne sont pas...

Hervé Zwirn. ...le choix de la base préférée est réglé.

Alexei Grinbaum. Oui. Le choix de la base préférée qui dépend de l'observateur...

Jean-Michel Raimond. ... qui dépend de l'environnement.

Alexei Grinbaum. Qui dépend de l'environnement, mais...

Jean-Michel Raimond. ... je crois que l'idée, non idiote, du papier de Zurek est de dire que l'observateur n'interagit jamais directement avec le système. Il y a l'environnement entre lui et le système, l'observateur n'étant en fait qu'une partie de l'environnement, qui interagit de manière indirecte avec le système. C'est la dynamique de l'interaction système/environnement qui fixe la base préférée. D'une part, c'est expérimental et, d'autre part, je pense que *for all practical purposes* cela répond à la question de la base préférée.

Hervé Zwirn. Le problème du « ou » au choix final reste ouvert. Sauf si on reste dans le modèle d'Everett où on dit que tout coexiste, mais qu'on s'en fiche.

Jean-Michel Raimond. C'est la méthode qui consiste à « cacher la poussière sous le tapis »...

Bernard d'Espagnat. Comme je le disais tout à l'heure, je pense pour ma part que l'usage de la notion d'observateur conscient permet de faire mieux.

Section 3 – Echange de vues pour et contre le réalisme.

Michel Bitbol. J'ai une question à vous poser collectivement, surtout aux spécialistes de la décohérence. Nous avons évoqué deux traits distincts du problème de la mesure : (1) nous avons parlé du statut *for all practical purposes* de la disparition des termes diagonaux dans la matrice densité, et (2) nous avons aussi parlé de la capacité ou plutôt de l'incapacité de la théorie de la décohérence à résoudre la question dite « et/ou », c'est-à-dire le passage d'une superposition d'états propres d'une observable à une disjonction de valeurs singulières de cette observable. La question que je vous pose est la suivante : y a-t-il un lien, ou pas, entre les deux ?

Pour formuler mon interrogation de façon plus précise, je vous demanderai ceci : est-ce que *si* la décohérence était capable de faire réellement disparaître les termes non-diagonaux de la matrice densité, si elle imposait à ces termes une valeur rigoureusement égale à zéro, considèreriez-vous que le problème « et/ou » est résolu, ou pas ?

Jean-Michel Raimond. Je suis très pragmatique et très *for all practical purposes* (parce que si on n'est pas dans un labo très *all practical purposes*, on est très mal). Je répondrais que pour tout propos pratique, la décohérence répond au problème du « et/ou ». Pour tout propos pratique et pour toute expérience concevable par l'homme ou par n'importe quel extraterrestre normalement constitué, elle répond au problème du « et/ou ». Elle affirme que la matrice densité est, pour tout propos pratique, diagonale.

Michel Bitbol. Attention, je poussais le problème à la limite, en vous disant « admettons que la matrice densité soit *réellement* diagonale, qu'elle ne le soit pas seulement en pratique, à des valeurs négligeables près, mais *strictement* diagonale ». Votre réponse à la question « le problème et/ou est-il résolu ? » serait-elle positive ? Je me permets de vous réinterroger à ce sujet.

Jean-Michel Raimond. Cela ne résout clairement pas le problème du choix.

Hervé Zwirn. Nous sommes d'accord.

Jean-Michel Raimond. On peut tout à fait tenir un raisonnement « à la Everett » dans lequel toutes les branches sont résolues. Soit dans l'univers tout entier, s'il n'y a pas d'interprétation « à la Everett », soit dans chacune des branches, tout le monde est d'accord sur ce qui s'est passé.

Michel Bitbol. Nous sommes clairement tous d'accord sur ce point. Notez simplement que pour moi, le problème du « ou » ne se distingue pas vraiment de ce que vous appelez le problème du choix. En effet, si l'un « ou » l'autre des résultats possibles de la mesure d'une observable est obtenu, cela signifie qu'il y en a un seul, choisi entre tous, qui est réalisé bien que nous ne sachions pas encore lequel.

Bernard d'Espagnat. Je me suis demandé, comme je vous l'indiquais tout à l'heure, comment Zurek résoudrait ce problème. Finalement, dans son article de 2003 déjà cité il le résout sans le dire par cette constatation évidente – à condition qu'on introduise la notion d'observateur et celle de mesure – qu'une mesure n'a qu'un résultat. Quand il y a N possibilités, ce qui est le cas au vu de la matrice densité une fois qu'on l'a diagonalisée, Zurek dit explicitement ceci : vu que le résultat de la mesure ne peut être que l'une des valeurs propres de l'observable, il est nécessairement identique à l'une *ou* à l'autre si $N = 2$ (ou à l'une d'elles dans le cas général) avec des probabilités égales entre elles lorsque les coefficients dans la fonction d'onde sont égaux. C'est sa première étape dans sa tentative de démonstration de la règle de Bohr.

Je trouve que ainsi présenté le raisonnement est juste. Mais je constate aussi qu'il est fondamentalement inspiré par la notion de mesure en tant que telle. Sauf – admettons – un recours (quelque peu gênant !) à Everett aucune interaction « purement physique » ne vous donnera cela me semble-t-il. Il faut la mesure.

Michel Bitbol. Je voudrais juste ajouter un point pour vous faire comprendre quelle était ma motivation lorsque j'ai posé ma question sur la résolution (ou la non-résolution) du problème du choix par la décohérence. Cette question a l'air presque naïve lorsqu'elle est prise isolément, mais elle prend une tout autre allure lorsqu'on la rapporte à une certaine idée probabiliste du statut du formalisme quantique. Supposons donc que le formalisme quantique, à travers la théorie de la décohérence, aboutisse à une matrice densité rigoureusement diagonale (avec des termes non-diagonaux strictement nuls). Dans ce cas, le formalisme quantique se réduit très exactement à la théorie classique des probabilités avec son axiomatique kolmogorovienne. Or il est évident que personne n'a jamais demandé à une théorie classique des probabilités de désigner le choix qui est effectivement constaté au laboratoire ; on ne lui demande même pas de justifier qu'un choix particulier est fait parmi tous ceux qui sont possibles car cela est tenu pour évident à partir du moment où l'on admet que l'un *ou* l'autre est réalisé ; on lui demande seulement de fixer la probabilité *a priori* de chacun des choix possibles. Il est donc étonnant que, même à cette limite où la théorie quantique se confond avec la théorie classique des probabilités, on se sente encore en droit de lui demander de justifier par elle-même qu'un choix particulier est fait. Tel est mon motif de perplexité.

Jean-Michel Raimond. Je pense que cette vision des choses donne à la mécanique quantique exactement le même statut que la physique statistique ordinaire. On sait bien qu'il y a une infinité de réalités microscopiques pour le même état macroscopique. On ne sait pas

laquelle est réalisée, mais on sait qu'une seule est réalisée. Je crois qu'on pourrait s'en tirer en suggérant simplement d'ajouter à tous les postulats de la mécanique quantique un postulat amont qui dit que si tous les observateurs de l'univers sont d'accord sur une réalité physique, cette réalité est unique. Point.

Bernard d'Espagnat. Votre 'postulat amont' me plaît d'autant plus que c'est celui qu'ont fait tous les philosophes antiréalistes à commencer par... Schrödinger. Simplement ils ajoutaient que dans ces conditions il n'y a nul besoin, pour faire de la science de façon rigoureuse, de tacitement rajouter (rien que par l'emploi d'un mot, 'réalité' dont l'implication commune est telle) le postulat, métaphysique, invérifiable et source, maintenant, de difficultés (non-séparabilité), selon lequel cette réalité physique existe 'en soi', c'est à dire existerait telle que nous l'appréhendons même si aucun observateur n'existait et n'avait jamais existé.

En revanche je suis moins convaincu de l'identité de statut que vous venez juste d'évoquer à la suite de Michel Bitbol et dans le cadre de la supposition qu'il évoquait. Même dans ce cadre là je ne la vois pas réalisée, et cela à cause du réalisme 'ontologique' implicitement postulé dans beaucoup de présentations de la physique statistique classique (mais à l'exception me semble-t-il des présentations à la Gibbs). Certes rien n'empêche de concevoir une mécanique qui serait à la fois réaliste (alias: ontologiquement interprétable) et fondamentalement indéterministe. Dans une telle théorie certains événements seraient affectés d'une probabilité intrinsèque. Ainsi par exemple, lors d'une opération de mesure et pour certains états du système mesuré le pointeur aurait, indépendamment de toute considération d'environnement et de décohérence, une certaine probabilité de se déplacer, « tout d'un bloc » vers la droite et la probabilité complémentaire de se déplacer, « tout d'un bloc » vers la gauche (c'est un peu l'idée de la "propensité"). Dans une telle théorie il n'y aurait évidemment aucun besoin d'expliquer le « ou » en faisant appel aux notions d'observateur, de mesure etc. Il n'y en aurait nul besoin car dans la théorie que j'invente ici le « ou » est introduit en quelque sorte « à la main », comme partie intégrante de l'axiomatique. Seulement voilà: cette théorie là n'est conforme ni à la mécanique quantique ni à l'expérience (vos expériences indiquent qu'à l'instant $0+$ il serait impossible d'attribuer au pointeur une position ni même une forme déterminée). Avec la mécanique quantique nous avons en fait affaire à une théorie toute différente, dans laquelle il est, en principe, toujours possible de reculer le « ou » (*alias* l'indéterminisme), et en même temps l'attribution d'une forme crédible au système, jusqu'à l'étape où un observateur fait une mesure. Et il n'est donc pas surprenant que le problème du « ou », inexistant dans une théorie qui pose ce « ou » dès le départ, soit dans une théorie ayant de telles caractéristiques, un problème réel, et, qui plus est, lié à la mesure.

Jean-Michel Raimond. Il faut qu'il y ait choix sans déterminisme.

Bertrand Saint-Sernin. Puis-je faire une observation ? Historiquement, le philosophe du 19^{ème} siècle qui a été le premier à expliciter la notion de réalisme à partir des expériences de la chimie de synthèse était un théoricien des probabilités. Lui pensait, précisément, que la contingence était une chose qui faisait partie de la constitution de la nature. Ce n'était pas du tout un déterministe. Il a des critiques sur le démon de Laplace absolument effrayantes.

Alexei Grinbaum. Dans cette optique, Jean-Michel, il est tout à fait vrai qu'il n'y aurait pas de différence entre la physique statistique et la mécanique quantique avec des éléments non diagonaux égaux à zéro. Cela étant, ce qui est différent, c'est que quand on dit « physique statistique », on pense « système à plusieurs composants ». On ne pense pas au gaz à une seule molécule, qui est un cas poussé à l'extrême, qu'on peut étudier d'ailleurs – et qui est étudié, c'est même assez intéressant. Tandis que quand on dit « mécanique quantique », on

a aussi envie d'étudier, non pas l'aspect statistique des choses, mais le photon unique (qui est le cas du système unique). Et là, il y a un frottement non pas physique, parce que la mécanique marche, mais conceptuel : dire que la mécanique quantique est une théorie statistique est, pour moi, un peu dans l'esprit des années 1920 ou 1930. Aujourd'hui, quand on utilise la mécanique quantique pour décrire les systèmes uniques, on a envie de dire qu'il y a des choses probabilistes et non statistiques.

Jean-Michel Raimond. Je suis bien d'accord. Je passe ma vie à manipuler des systèmes uniques ! La décohérence donne des probabilités qui ne sont pas de la nature des probabilités de la physique statistique, parce qu'elles ne portent pas, effectivement, sur un grand nombre d'ensemble de systèmes, mais éventuellement sur la description d'un système unique ou d'un objet unique, mais dont le statut conceptuel – ou philosophique, si vous préférez, si tant est que j'y comprenne quelque chose, ne me paraît pas différent de celui de la probabilité de la physique statistique, qui est une probabilité d'ignorance. Cela peut porter sur un spin, cela peut porter sur un photon, cela peut porter sur une molécule.

Alexei Grinbaum. Oui, mais ce qui est intéressant, c'est que quand vous considérez les systèmes uniques en mécanique quantique, cela mène à des paradoxes. En mécanique quantique, les paradoxes (qui ne sont pas des paradoxes logiques, mais des phénomènes très étranges, contre-intuitifs) sont liés à la post-sélection. Vous avez des choses comme le paradoxe de Hardy, par exemple, ou les travaux de Wheeler. La nature de ces paradoxes est différente des problèmes conceptuels que pose, par exemple, la considération d'un gaz à une molécule.

Jean-Michel Raimond. La plupart de ces paradoxes sont quand même liés à une description non triviale d'expériences non triviales où on suppose que le comportement est complètement quantique et où, à la fin, on analyse les mesures. On réalise une mesure avant et on n'en prend connaissance qu'à la fin. Mais enfin, cela repose simplement sur des comportements quantiques compliqués. Je ne dis pas que les comportements quantiques ne sont pas compliqués. Je dis simplement que si on introduit la décohérence, à un certain moment, apparaissent des probabilités qui n'ont pas de rôle conceptuellement différent de celles de la physique statistique. Je ne dis pas que la mécanique quantique est une physique statistique.

Jean Petitot. Oui. Surtout pas une physique statistique.

Olivier Rey. En fait, il existe deux manières de concevoir la physique statistique dans un cadre classique. Une approche consiste à essayer de bâtir une théorie physique à partir de ce que l'on peut connaître du réel pratiquement. Une autre consiste à penser que tout est déterminé dans le réel, mais que le nombre d'élément nous contraints à un traitement statistique. Il y a donc deux manières de concevoir la physique statistique, qui conduisent au mêmes résultats, mais qui sont philosophiquement tout à fait différentes.

L'hypothèse du déterminisme sous-jacent n'est pas nécessaire pour élaborer la physique statistique. Jean Bricmont, récemment, a plaidé pour une formulation dite « bayésienne » de la physique statistique. La question dominante est alors : qu'est-il le plus rationnel de penser du réel compte tenu des informations dont on dispose.

Alexei Grinbaum. Ce que l'on peut faire, aussi, avec la mécanique quantique.

Olivier Rey. Oui, justement. L'approche « bayésienne » se trouve beaucoup plus en continuité avec la physique quantique que ne peut l'être une approche statistique qui suppose un déterminisme intégral, et déploie l'arsenal statistique à partir de cette hypothèse.

Michel Bitbol. Si je puis faire une petite remarque, je trouve amusant et paradoxal que ce soit précisément Jean Bricmont qui ait avancé cette conception de la physique statistique. Elle suppose apparemment qu'on élabore une description stochastique globale en suspendant toute préoccupation concernant d'hypothétiques processus microscopiques sous-jacents. Or, par ailleurs, Jean Bricmont s'est fait l'avocat de l'interprétation « ontologique » de Bohm, celle-là même qui prétend déployer des mécanismes supposés sous-tendre les probabilités quantiques...

Olivier Rey. Il s'inscrit dans une tradition.

Jean-Michel Raimond. Je vais être encore outrageusement *for all practical purposes* ! Il me paraît qu'on peut quand même être d'accord sur le fait qu'indépendamment de tout, tous les observateurs dans l'univers peuvent se mettre d'accord sur le fait qu'il y a des réalités objectives dans le monde physique, qui sont unes, uniques et indivisibles. Il faut peut-être mettre cela en facteur commun de toutes les théories physiques qu'on tente de faire, que ce soit la physique statistique ou la physique quantique. Autrement dit, il existe une réalité objective. Il ne faut pas demander aux théories physiques de l'extraire de leur propre formalisme – en tout cas pas aux théories physiques qu'on a maintenant.

Bernard d'Espagnat. Avec quand même une petite réserve quant à l'expression « il y a », qui évoque un peu trop l'« en soi » à mes yeux. Ce que vous avez défini est une objectivité relative à l'ensemble des observateurs possibles ou des êtres conscients possibles.

Jean-Michel Raimond. Et même à l'ensemble des fractions de l'environnement possibles.

Bernard d'Espagnat. Je ne suis pas sûr quant à ce dernier point. Tout dépend de ce que l'on entend par « fractions de l'environnement ». On a tendance, quand on parle de l'environnement, à malgré tout conserver dans l'arrière de son esprit la notion physicaliste d'une réalité faite je ne sais comment, peut-être d'atomes liés par des forces, ou quelque chose de plus compliqué mais d'un peu similaire (faite, par exemple d'objets et de champs existant par eux-mêmes et répartis ça et là dans l'espace). Il faut écarter cette image pour le moins contestable (non séparabilité). En fait, si l'on tente de dépasser le « *for all practical purposes* » - qui suffit à la science, nous sommes d'accord sur ce point – on ne dispose d'aucune représentation mentale valable de ce que pourrait être un « environnement en soi » pourvu de « fragments ». Et puisque nous nous référons volontiers ici à Zurek je dirai que la citation de lui déjà donnée, où il parle de ce qui, de l'Univers, « apparaît comme classique à des observateurs qui l'appréhendent de l'intérieur en usant des capacités limitées qui sont les leurs... » montre que c'est bien aussi ce qu'il pense.

Hervé Zwirn. En outre, me semble-t-il, l'accord obtenu par les observateurs porte sur les phénomènes. Le problème du réalisme est de se mettre d'accord sur l'existence en soi de quelque chose qui fait que nous sommes d'accord sur les phénomènes. Il n'est pas de contester le fait que nous sommes tous d'accord sur les phénomènes. On peut adopter le vocabulaire qu'on veut. Pour ma part, j'appelle cela la réalité non pas empirique mais

phénoménale : nous sommes tous d'accord sur les phénomènes tels qu'ils nous apparaissent et cela constitue pour moi la réalité phénoménale.

Le problème du réalisme se pose après. Etant donnée cette réalité, que j'appelle phénoménale (mais qu'on appelle parfois réalité empirique), y-a-t-il derrière, une réalité en soi qui en est "la cause" ? C'est cela, le problème du réalisme. Quant au fait qu'il existe des phénomènes sur lesquels tout le monde est d'accord, je crois que personne ne le nie.

Jean-Michel Raimond. Le lien entre la phénoménologie et la réalité en soi me paraît échapper quelque peu au débat physique.

Hervé Zwirn. C'est de la philosophie.

Jean-Michel Raimond. Je ne suis pas sûr qu'il soit différent entre n'importe quelle science, en particulier entre la physique classique et la physique quantique.

Hervé Zwirn. Il semble, et c'est tout le débat que nous avons ici, que pour des raisons liées à tout ce que nous évoquons, le lien relativement facile (sans mentionner d'autres problèmes) qui peut exister entre les deux en physique classique est plus complexe à mettre en œuvre quand on est dans le formalisme quantique. Les raisons que nous avons évoquées sont entre autres, la non localité, la contextualité etc. C'est cela l'enjeu du débat. Est-ce que le formalisme quantique, ou la mécanique quantique au sens large, rend possible ce passage ou pas ?

Jean-Michel Raimond. Ce que l'on dit, quand même, depuis tout à l'heure, c'est que le formalisme et la décohérence *modulo* leurs insuffisances notoires rendent à la physique quantique un statut de physique de probabilité classique – et donc rendent ce lien plus facile.

Hervé Zwirn. Il est très vraisemblable que la décohérence fait faire un grand pas en avant par rapport aux discussions des débuts de la mécanique quantique (avec les débats des pères fondateurs) jusqu'avant l'invention de la décohérence et lors desquelles des physiciens parmi les plus grands ont émis pour régler ce problème des hypothèses pour le moins farfelues. Le pas est-il définitif ? Dans ce cas là, considère-t-on que les problèmes philosophiques qui permettent de faire le pont entre les deux sont réglés ou pas ?

Jean-Michel Raimond. Ils ne sont pas mieux ni plus mal réglés que dans les autres branches de la physique.

Hervé Zwirn. Voilà. Cela se rapproche. Bien sûr.

Bertrand Saint-Sernin. Historiquement, le problème du réalisme est lié à une question théologique très classique : le problème de la garantie divine. Autrement dit, la première définition du réalisme, celle que l'on trouve dans l'Antiquité, est « avons-nous accès à la raison divine lorsqu'elle a créé le monde et lorsqu'elle l'entretient ? ». Le problème du réalisme change de nature à partir du moment où on se dit qu'il faut construire une science sans garantie divine. Les fondateurs de la science moderne, que ce soit Descartes, Newton ou Leibnitz etc., pensent que nous pouvons accéder à une sorte de vision en Dieu, plus ou moins difficilement. Mais c'est à partir du 18^{ème} siècle que le problème change complètement de nature. Que signifie créer une science par des moyens strictement humains et sans se référer à l'idée d'un esprit infini avec qui nous aurions une communication ? A partir de ce moment-là, la notion de réalisme change assez profondément de nature.

Jean-Michel Raimond. J'aimerais bien qu'on se passe autant de Dieu que de la conscience pour faire de la physique.

Bertrand Saint-Sernin. Bien sûr. Mais, historiquement, c'est ce qui s'est passé. C'est tout.

Jean-Michel Raimond. Je ne sais pas ce qu'est la conscience, mais le fait qu'il faille faire intervenir des objets pensants dans la description physique du monde me déplaît beaucoup.

Hervé Zwirn. C'est un point central de notre discussion. Nous cherchons tous à éliminer ce recours à la conscience, qui ressemble au recours à Dieu d'une certaine manière. Dieu a été éliminé et plus personne ne soutient les idées qui avançaient que la réduction du paquet d'ondes était due à une action directe de la conscience sur le système. Il n'empêche qu'il me semble qu'il est possible de prendre en compte la conscience au sens suivant : la conscience n'a aucune action physique pour réduire un système, mais ce que nous observons se fait, dans un sens kantien, à travers tout un ensemble de « filtres » qui font que ce que nous observons ne peut pas être totalement indépendant de ce que nous sommes. Cela me semble quelque chose à considérer et c'est quand même moins gênant que le recours à une idée divine ou une conscience ayant une action directe. Les nouvelles théories qui font intervenir la théorie de l'information sont proches de cette idée.

Jean-Michel Raimond. J'espère que, s'il faut faire intervenir une conscience, c'est plutôt un degré de complexité minimum de ce qui observe.

Hervé Zwirn. Permettez-moi de rappeler une citation de Zurek, tirée d'un de ses articles de 2003 sous la forme d'une refonte de papiers plus anciens. « *Hence, the ontological features of a state vectors – objective existence of the einselected states – is acquired through the epistemological information transfer.* » Cela signifie qu'il lie l'aspect ontologique du vecteur d'état à quelque chose qui est de l'information épistémologique. Or l'information épistémologique...

Alexei Grinbaum. ... Le mot clé, dans « *objective existence* », c'est « *objective* », pas « *existence* ». L'existence, pour Zurek, c'est un terme philosophique. Ce qui le préoccupe, c'est d'établir l'objectivité de la description.

Pour reprendre ce que disait Jean-Michel, je pense qu'on peut poser exactement la même question d'observation d'un système quantique pour un fullerène. On ne dit pas qu'un fullerène a une conscience, ce qui serait un peu étrange, mais on peut bien se demander comment une molécule assez complexe, comme C₆₀, observe des photons. Résultats à l'appui, je peux vous montrer qu'un fullerène peut observer jusqu'à 10 photons et garder en mémoire cette information. Il n'y a aucune raison, à mon avis, de penser qu'il y ait une différence fondamentale entre ce fullerène et un humain en tant qu'observateurs quantiques.

Bernard d'Espagnat. Sauf, peut-être, dans le cas où vous considérez des événements probabilistes et décidez d'exclure tout déterminisme caché (de type Bohm). A ce moment-là, je crois qu'il y a quand même une différence. Si vous traitez votre fullerène comme un système purement physique mais quantique, à ce moment-là je crois qu'il n'arrivera pas tout seul à vous dire qu'il y a *une* réponse unique, autrement dit : qu'une certaine observable, qui

pouvait prendre tout un choix de valeurs différentes, a en fait pris l'une d'entre elles et non les autres. Je crois que pour que cela soit possible il faut que vous décidiez de considérer votre fullerène comme classique, de même que Bohr considérait ses instruments, par *fiat*, comme classiques, parce qu'ils étaient *utilisés* en tant qu'instruments.

Alexei Grinbaum. En indiquant « n'arrivera pas à vous dire », vous présumez un problème de communication ou d'interaction entre les observateurs. Ce n'est pas le même cadre.

Bernard d'Espagnat. Mais les deux problèmes sont liés car vous, observateur conscient, savez qu'il n'y a (ou plutôt, selon moi, « êtes obligé par les structures mentales humaines d'exiger qu'il n'y ait ») qu'une seule réponse. Au vu des seuls principes quantiques on ne voit pas par quoi le fullerène, simple système quantique, pourrait être amené à un tel « choix ».

Hervé Zwirn. Qu'est-ce que cela veut dire ? Quel sens donnez-vous à ce que ressent un fullerène quand il observe un spin en haut ou en bas ?

Jean-Michel Raimond. Il ne sent rien. Mais quand mon ordinateur enregistre un résultat de manip, il le stocke dans une ram. Dans une ram moderne, pour stocker un bit d'information, il faut 12 électrons. Ces 12 électrons portent l'information sur ce que j'enregistre dans mes expériences. Ce n'est ni très grand ni très petit devant un fullerène. C'est du même ordre. C'est cela qui, finalement, porte la réalité objective. Autant de consciences qu'on veut peuvent aller regarder ces 12 électrons qui finalement, jusqu'à ce que j'appuis sur le bouton « marche » inopportunément, contiendront toute cette information. Si on réfléchit bien au fonctionnement d'un ordinateur moderne, ce qui porte toute l'information de manière objective et vérifiable, c'est un petit ensemble de particules quantiques.

Michel Bitbol. C'est exact, mais aussi longtemps que vous n'avez rien observé sur ce système d'électrons qui porte l'information dont vous parlez, vous êtes quand même obligé de le décrire par un opérateur densité *non* diagonal.

Jean-Michel Raimond. Ou complètement diagonal, parce que ces 12 électrons sont très violemment couplés à un environnement très compliqué qui leur interdit totalement d'être dans une superposition.

Michel Bitbol. Monsieur d'Espagnat vous répliquerait « certes, diagonal, mais seulement *for all practical purposes* (on en revient toujours là !) ».

Alexei Grinbaum. Je pense que ce n'est pas exact, car vous ne pouvez pas savoir quel résultat a lu le fullerène. Evidemment. En revanche, je pense que vous pouvez monter une expérience qui vous montrera qu'il a agi en tant qu'observateur. Le résultat de la mesure ne vous est pas accessible, parce que vous vous trouvez à l'extérieur de ce couple observateur-système observé. En revanche, vous pouvez observer les conséquences thermodynamiques du fait que le fullerène a longuement agi en tant qu'observateur.

Michel Bitbol. Cette facilité que vous avez à tenir une molécule pour un observateur me trouble. Que signifie exactement être un observateur ?

Alexei Grinbaum. C'est garder quelque chose en mémoire.

Michel Bitbol. Garder quelque chose en mémoire... Mais qu'est-ce exactement que la *mémoire* ? Que signifie garder en mémoire ?

Jean-Michel Raimond. Cela veut dire être corrélé classiquement à l'état du système mesuré. C'est la corrélation classique entre l'état du système mesuré et l'état du mètre, c'est-à-dire une corrélation purement classique, sur une superposition probabiliste classique d'états intriqués classiquement.

Alexei Grinbaum. Un problème se pose avec les photons, qui sont absorbés – donc plus là.

Jean-Michel Raimond. Certes, d'accord.

Michel Bitbol. Pourquoi parlez-vous d'états intriqués « classiquement » ? C'est l'adverbe « classiquement » que je ne comprends pas ici.

Jean-Michel Raimond. Je veux dire décrit par une alternative probabiliste : ou bien cet état dans lequel l'aiguille est dans telle position, ou bien cet état dans lequel l'aiguille est dans telle autre position.

Michel Bitbol. ... Le problème est qu'ici l'alternative est en droit de type quantique, c'est-à-dire que les termes non diagonaux peuvent bien extrêmement petits, ils ne sont pas rigoureusement nuls.

Jean-Michel Raimond. Oui, d'accord. Mais les *for all practical purposes*, personne ne les verra jamais, même pas l'univers tout entier.

Michel Bitbol. Je vous l'accorde, bien sûr. Mais ce que je voulais dire, c'est que le problème demeure. L'alternative n'a pas basculé, comme le dit Alexei, du côté d'une détermination stricte. Un *vrai* observateur verrait un résultat unique, strictement déterminé, alors qu'une molécule de fullerène reste en droit dans un état superposé, intriqué (plus ou moins intensément) avec son système corrélé.

Jean-Michel Raimond. Le problème est le même qu'il s'agisse d'un fullerène, des électrons dans une ram ou d'un post-doc.

Olivier Rey. Vous conviendrez que c'est une définition quand même très physicienne de l'acte d'observer. Ce n'est pas l'acception courante du mot, qui a tendance à supposer qu'il y a un sujet de l'observation.

Jean-Michel Raimond. Oui.

Olivier Rey. Les mots ont un certain sens.

Jean-Michel Raimond. Je n'aimerais pas que les résultats de mes expériences dépendent de mon état de conscience, de savoir quelle conscience regarde ou de savoir si cette conscience a abusé du whisky avant ou pas !

Olivier Rey. Ce que je voulais juste souligner, c'est qu'il faut prendre garde... On a tendance, pour des raisons pratiques, lorsqu'on fait de la physique, à utiliser des mots du vocabulaire courant plutôt que d'en créer de nouveaux. Du coup, on peut facilement croire que la physique vise toujours la même chose que le langage ordinaire alors que, les mots ayant pris pour elle un autre sens, elle parle d'autre chose. La définition que vous venez de donner de ce qu'est une observation ne figure pas dans le *Petit Robert*, par exemple.

Jean-Michel Raimond. D'accord. Pour moi, l'observation est un enregistrement classique, quelque part. C'est cela, l'observation, pour moi.

Bernard d'Espagnat. Nous avons tous, me semble-t-il, quelque peu l'impression que nous frôlons l'accord sans pleinement le tenir encore, et que par conséquent la discussion n'est pas finie. Et cela est d'autant plus vrai que nous n'avons pas, jusqu'ici, abordé de front les aspects spécifiquement spatio-temporels de la décorérence alors que ceux-ci soulèvent des problèmes particuliers que Jean Petitot se propose, je crois, de nous préciser maintenant.

Section 4 – Aspects mathématiques du conflit entre mécanique quantique et localisation spatio-temporelle.

Jean Petitot. J'ai préparé une remarque sur le lien entre ces problèmes de décohérence et celui de ma localisation spatiotemporelle – c'est mon côté géomètre ! – et plus généralement sur le conflit entre mécanique quantique et localisation des mesures. Pour nous, observateurs humains, la caractéristique du monde macroscopique est sa localisation spatiotemporelle. Dans un des textes de l'ouvrage *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, cette question est abordée ainsi par Joos (2^{ème} éd., p.63) : une des caractéristiques fondamentales des objets macroscopiques est qu'ils sont bien spatiotemporellement localisés. Joos cite notamment le débat entre Born et Einstein, dans lequel Einstein met en garde quant au fait que la localisation spatiotemporelle (ou le fait qu'il y ait un paquet d'ondes *narrow*, très bien localisé et qui ne se disperse pas, « *with respect to the macro coordinates* », c'est-à-dire les macro coordonnées d'espace-temps, les positions, les impulsions etc.) est contradictoire avec les axiomes de la mécanique quantique. J'aimerais revenir un peu sur cette question, en reprenant des réflexions mathématiques déjà un peu anciennes, autour des travaux de l'école de Gelfand, de Naimark, de Segal, puis de Mackey, qui ont essayé de comparer les formalismes mathématiques de la mécanique classique et ceux de la mécanique quantique, pour vraiment « pointer » la différence fondamentale. Je m'inspire d'une présentation de Jerry Marsden dans *Applications of Global Analysis in Mathematical Physics*.

En mécanique classique, l'espace des états est un espace de phases (les coordonnées p , q de la mécanique hamiltonienne). Il existe une variété différentiable (appelons la P , pour espace de phases) des états. Les observables, quant à elles, sont des fonctions définies sur cet espace de phases P qui prennent leur valeur dans un corps de valeurs. En général, ce sont des fonctions à valeurs réelles, c'est-à-dire des fonctions à valeurs complexes égales à leurs conjuguées (en mécanique quantique elles deviennent des opérateurs auto-adjoints). La mesure d'une observable f sur un état qui est représenté par un point x de l'espace de phases P est tout simplement la valeur de la fonction $f(x)$. C'est l'évaluation. Or $f(x)$ est égal à la valeur sur f de la distribution delta de Dirac en x . C'est dire qu'on a une dualité entre espace et fonction : on a des points (les états) dans un espace de représentation ; les observables sont des fonctions dessus ; mais on peut tout aussi bien partir des fonctions et récupérer les points

comme des mesures de Dirac, c'est-à-dire comme certains opérateurs linéaires sur l'algèbre commutative des observables.

Mathématiquement, il est extrêmement important de noter – c'est le cœur de la théorie de Gelfand – qu'il existe une identité parfaite entre l'espace où on peut localiser les phénomènes et les observables et des propriétés algébriques, en particulier le fait que les points sont en correspondance bijective avec les idéaux maximaux de l'algèbre commutative des fonctions, c'est-à-dire les idéaux des fonctions qui s'annulent en un point particulier. C'est une propriété fondamentale des algèbres commutatives qui disparaît complètement dans les algèbres d'observables non commutatives qu'on trouve en mécanique quantique.

En mécanique quantique, on sait que la situation est tout à fait différente : on a comme espace d'états un espace de Hilbert H ; on a une algèbre non commutative d'opérateurs pour les observables ; et puis on a la mesure des observables : si A est une observable, i.e. un opérateur, et si ψ est un état, on leur associe le produit scalaire dans H $\langle A\psi, \psi \rangle$.

Le problème est de comparer la physique statistique classique avec ce schéma de la mécanique quantique.

Très tôt, je crois que cela remonte aux années 1930, Koopman avait essayé de trouver un formalisme hilbertien et opératoire pour la mécanique hamiltonienne, de façon à pouvoir bien comparer mécanique quantique et mécanique hamiltonienne. Il avait proposé d'essayer de formuler la mécanique hamiltonienne de la façon la plus proche de ce qu'on trouve en mécanique quantique. C'est assez facile : on prend des états statistiques (on a donc une distribution sur l'espace des phases P , un état ψ étant maintenant une distribution sur l'espace des phases), dont on tire une mesure (au sens mathématique) pour les valeurs de la mesure (au sens physique) des observables. Le formalisme est alors exactement le même. La différence fondamentale vient du fait que la mesure, qui est essentiellement le carré du module de ψ , $|\psi|^2$, multiplié par la mesure de Liouville dans l'espace des phases, a un groupe qui la laisse invariante absolument énorme : vous pouvez multiplier ψ par $\exp(i\alpha(x))$ où $\alpha(x)$ est une fonction quelconque sur l'espace de phases P . Donc vous avez un énorme groupe, et le quotient de l'espace de Hilbert H (qui est l'espace L^2 des fonctions sur l'espace de phases) redonne l'espace de phases P . Et comme c'est cet espace de phases qui garantit la localisation, la localisation est liée au fait qu'un énorme groupe opère sur l'espace de Hilbert des états. L'incohérence de la mécanique classique, c'est-à-dire sa décohérence, est fondamentalement liée à ce type de « localisabilité ».

En mécanique quantique, le groupe d'invariance est au contraire minuscule : c'est le groupe $U(1)$. Le quotient du Hilbert H par ce groupe est tout simplement le projectivisé de H , ce que l'on appelle les rayons, les *rays*. C'est cela qui, dans cette perspective, formule la cohérence, la possibilité d'interférences, etc. Bref, c'est la grandeur du groupe d'invariance, dans un formalisme hilbertien de la mécanique classique, qui explique les caractéristiques de la mécanique classique. Dans une telle approche, il devient facile de démontrer (cela remonte déjà à Von Neumann) le fait qu'il est impossible d'avoir des théories de variables cachées locales dont l'idée est d'essayer de récupérer le formalisme de la mécanique quantique en ajoutant un espace où on pourrait localiser les choses de façon un peu analogue à ce qui se passe en mécanique hamiltonienne.

Ce théorème, revu par Mackey, remonte à Von Neumann : tout formalisme de ce genre qui essaie d'enrichir la mécanique quantique en disant que par-dessous il y a une variété, quelle qu'elle soit, qui permette de localiser les mesures est obligatoirement commutatif. C'était un premier résultat fondamental d'impossibilité qui montrait l'obstruction que l'on rencontre en essayant de rendre la mécanique quantique complète de cette façon.

Je considère qu'il est intéressant de voir qu'au niveau des fondements mathématiques mêmes, le problème de la « localisabilité » des mesures constitue une obstruction fondamentale. Or comme cela a été très bien vu par nombre de philosophes (dont Husserl), si

la localisation spatio-temporelle ne peut plus être un principe d'individuation, alors on fait sauter le monde classique. Une caractéristique du monde classique est que la localisation spatio-temporelle y est individuable. Or elle est vraiment contradictoire avec la non commutativité des observables en mécanique quantique. A ma connaissance, seule la géométrie non commutative essaie aujourd'hui de résoudre ce problème.

Voilà la remarque un petit peu mathématique que je souhaitais faire. Si on essaie de « coincer » la différence irréductible entre le classique et le quantique, elle est essentiellement liée à cela. Peut-on, ou non, « en dessous » du formalisme hilbertien, introduire des substrats géométriques permettant de localiser les phénomènes et leurs mesures ? Je pense que cela peut être intéressant d'en débattre philosophiquement.

Evidemment tout cela n'empêche absolument pas les fonctions d'ondes d'être définies sur un espace-temps. Ce dont j'ai parlé a rien à voir avec cet aspect là.

Alexei Grinbaum. Mon premier commentaire est que le théorème de Von Neumann est faux, comme on le sait. Le théorème des variables cachées de Von Neumann a besoin d'être modifié.

Michel Bitbol. Il n'est pas faux. Simplement, il est très partiel, très incomplet. Il ne prouve pas, contrairement à ce que déclarait Von Neumann, qu'*aucune* théorie à variables cachées n'est compatible avec la mécanique quantique. Il exclut seulement un certain type très particulier (mais à l'époque le plus vraisemblable) de théorie à variables cachées. Tous les théorèmes ultérieurs (Bell, Kochen et Specker, Leggett etc.) sont de ce type : ils conduisent à exclure des classes de plus en plus larges de théories à variables cachées, sans interdire *toutes* les théories de ce genre.

Jean Petitot. Je parlais de la démonstration de Mackey, qui est juste. (Ceux qui sont intéressés trouveront un très bon résumé des travaux de Mackey par Varadarajan à <http://www.math.ucla.edu/~vsv/mackey.pdf>. La section 7 est consacrée aux variables cachées et au théorème de Mackey-Gleason.)

Alexei Grinbaum. La question a été posée à plusieurs reprises, surtout depuis la résurgence des approches des algèbres C-étoile...

Jean Petitot. Absolument. Tout ce dont j'ai parlé, de la théorie de Gelfand à celle de Connes, s'exprime en termes de C-star algèbres.

Alexei Grinbaum. Le problème devient plus compliqué quand on pense à la théorie des champs. Le problème général est le suivant. Vous avez une algèbre C-étoile : comment savoir si elle est classique, quantique ou autre chose ? Dans la littérature, on a proposé des systèmes d'axiomes pour comprendre comment une algèbre extrêmement générale devient quantique, en précisant les contraintes qu'il faut ajouter. C'est tout un domaine de recherche très actif.

En 1927, au congrès Solvay (je vous recommande, à cet égard, le livre qui est sorti récemment et qui reprend tous les actes et toutes les notes des participants à ce congrès) Schrödinger pose ce même problème, au début de son intervention, sans le langage mathématique. Il indique qu'on a fait de la mécanique en trois dimensions, puis de la mécanique en quatre dimensions (en ajoutant le temps), puis en $3N$ dimensions – on ne sait pas précisément ce que cela signifie (c'est avant l'espace de Hilbert, avant von Neumann). Que veut dire ce glissement ? Pourquoi passer de 3 dimensions aux $3N$, c'est-à-dire d'un

espace euclidien à un espace au sens abstrait du mot ? C'est la raison pour laquelle je pense que le terme « localisation » change de sens. A propos de la discussion de tout à l'heure, pour moi, le problème de la localisation consiste à savoir comment se passe la décohérence avec la variable position. C'est vraiment le niveau de base. Mais quand on dit « localisation » dans ce langage, on pose plutôt le problème de la composition des systèmes : dans le langage algébrique, comment peut-on concevoir le fait qu'il y ait un lien géométrique entre deux systèmes ? C'est un problème immense, pour les approches algébriques.

Jean Petitot. Oui. L'individuation et la séparation des systèmes sont fondamentalement liées à la localisation au sens où j'en ai parlé

Alexei Grinbaum. Je souhaite quand même faire une distinction. Il y a le problème algébrique, fascinant, qui est le problème de séparation. Ce n'est pas la même chose que la question plus terre-à-terre de l'espace euclidien. On se sert de l'espace euclidien, qui en fait n'a rien à voir avec cette histoire, pour comprendre un aspect algébrique de la structure de la mécanique quantique. L'espace euclidien, qui n'a rien à faire avec tout cela, a servi, quelque sorte, de point d'entrée.

Jean Petitot. C'est ce que j'ai dit. L'impossibilité de localisation n'empêche pas les fonctions d'ondes d'être des fonctions sur l'espace-temps.

Bernard d'Espagnat. Problème du « et/ou », « impossibilité de la localisation »... L'objectivité du monde classique ne serait-elle que « faible » (ou « relative ») ? Sur cette question philosophique nous n'avons, comme prévu, pas atteint l'accord mais nos vues respectives sur elle se sont néanmoins affinées. Chacun de nous en voit mieux, maintenant, les contours. Et je ne doute pas que nous aurons des occasions d'y revenir

Cette réunion est la dernière mais seulement de l'année universitaire. Nous nous retrouverons à l'Automne, fin septembre probablement. Et notre séance de rentrée sera consacrée, comme vous le savez, à une vieille théorie, qui n'est pas de nous, celle de Louis de Broglie et David Bohm. Il ne s'agit pas de la théorie de la double solution, mais de celle que Louis de Broglie a présentée dans les rapports du congrès Solvay de 1927 et qui a été redécouverte, en fait, par David Bohm.

C'est une théorie qui a cette caractéristique d'être ontologiquement interprétable, tout comme la physique classique. Elle a été snobée par les physiciens depuis sa naissance, mais il existe tout de même des gens, encore maintenant, qui disent « finalement, cette théorie, que lui reprochez-vous ? De ne pas être relativiste etc. ? ». Je crois, honnêtement, que nous devons examiner la question.

Franck Laloë a très gentiment accepté, bien qu'il ne soit pas un adhérent à cette théorie, de nous en faire un exposé. C'est lui que nous attendons pour cette réunion de début Octobre.