

Collège de physique et de philosophie
Séance du 12 mars 2012

Bernard d’Espagnat. Michel Bitbol et Alexis Grinbaum se sont gentiment portés volontaires pour entamer la discussion. Mais avant cela je me vois malheureusement obligé, bien malgré moi, de vous donner un petit complément d’information. Et cela en raison d’un passage du bel exposé de Matteo Smerlak que vous avez lu dans le compte rendu de notre séance du 16 janvier dernier. Voici le passage en question.

[...] D’autres auteurs parlent de « non-séparabilité », comme Alain Aspect ou M.d’Espagnat dans un de ses ouvrages célèbres : « *If the notion of reality independent to man, but accessible to his knowledge is to have any meaning at all, then such reality is necessarily non-separable [...]* » Cette citation de M. d’Espagnat propose le concept de non-séparabilité, dont on peut dire que, comme la non-localité, il est pour le moins étrange. En effet, je rappelle qu’il existe bien un ensemble complet d’observables commutantes pour le système α et β , la paire de particules, qui est accessible uniquement par des mesures sur α et uniquement sur β . Ce critère, n’est-ce pas exactement la séparabilité telle qu’on peut la concevoir ? (*Exposé Matteo Smerlak, page 7*)

De mon point de vue ce passage a un grand besoin d’être commenté et complété. En effet, il affirme que, par la phrase de moi qu’il cite, je **propose** le concept de non-séparabilité. Il fait par là l’impasse sur le fait que j’en avais donné antérieurement une définition. Et ce qui est plus ennuyeux encore c’est qu’il interprète cette phrase selon **sa propre** définition de la séparabilité, celle que nous venons de lire, d’où il résulterait à l’évidence que les particules α et β de EPR sont séparables ; que, de même, après choc, deux systèmes quantiques sont toujours séparables... et que par conséquent ma phrase citée par lui n’aurait pas de sens...

Sans en vouloir le moins du monde à Matteo qui ne l’a sûrement pas fait exprès, je voudrais faire remarquer que cette substitution – involontaire, bien entendu ! – d’une définition à une autre induit gravement en erreur. Car dans mon livre *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics* (qui date de 1971 et est toujours en librairie) j’avais – bien sûr ! – pris soin de définir la non-séparabilité (sous-entendu « par la pensée »). Je l’avais fait en faisant observer que lorsque deux systèmes quantiques représentés chacun par une fonction d’onde entrent en collision puis se séparent, même après la séparation, en général ils ont perdu cette propriété d’avoir chacun sa propre fonction d’onde. Pour les représenter il n’y a plus qu’une fonction d’onde qui leur est commune, on ne peut donc plus les *penser* comme ayant chacun un ensemble complet d’observables commutantes possédant des valeurs bien définies et, disais-je, « c’est là l’essence de ce qui est parfois appelé la non-séparabilité des systèmes » (page 79 du livre cité, édition 1989). On peut aimer ou non cette définition. Mais elle a du moins le mérite d’exister et d’être cohérente avec la mécanique quantique standard. Et, vu la fréquence avec laquelle on peut estimer que des collisions entre particules se produisent, elle justifie pleinement la phrase de moi dont Matteo faisait implicitement la critique.

Bien entendu la phrase en question suppose la validité de la mécanique quantique standard, qui prend la notion d’état quantique au sérieux, et n’est valable que dans son cadre. Ce que je viens de dire n’affecte donc pas directement la théorie de Carlo, qui ne voit dans ‘l’état quantique’ qu’un outil de prédiction d’observations.

En revanche, je compte aussi soulever deux autres points qui, eux, mettent en question cette théorie. Mais nous devons d'abord entendre les interventions de Michel Bitbol et d'Alexei Grinbaum. Sur ces autres points, je m'exprimerai donc plus tard.

Roger Balian. Puis-je faire un tout petit commentaire sur ce que vous venez de dire ? La non-séparabilité est l'existence d'une corrélation en mécanique classique. Cela existerait aussi en mécanique quantique.

Bernard d'Espagnat. C'est une imbrication, qui est plus qu'une corrélation.

Roger Balian. C'est plus qu'une corrélation, mais c'est de même nature qu'une corrélation classique en mécanique statistique classique.

Bernard d'Espagnat. Non. Si on prend la mécanique quantique au sérieux – je ne parle pas ici de grands systèmes mais simplement de particules –, on ne peut pas identifier une imbrication à une simple corrélation.

Roger Balian. Je ne l'identifie pas. Je fais simplement une comparaison, en indiquant que c'est l'équivalent quantique de la corrélation qui est créé si on prend deux particules indépendantes, au sens de la mécanique statistique classique. On prend deux faisceaux, on les fait interagir et ils sont corrélés.

Bernard d'Espagnat. Oui, certes.

Roger Balian. Et c'est l'équivalent d'une imbrication.

Bernard d'Espagnat. Non, justement. La différence est qu'en mécanique classique on peut penser les deux particules, une fois qu'elles se sont séparées, comme ayant chacune autant de propriétés qu'elles en avaient avant. Tandis qu'en mécanique quantique, ce n'est pas le cas. Aussi longtemps qu'on ne les aura pas perturbées en faisant sur elles des mesures portant sur un ensemble complet d'observables commutantes du type évoqué par Matteo on ne pourra pas *penser* ces particules comme possédant toutes les propriétés correspondant à ces mesures, ou d'autres en même quantité ; alors qu'avant le choc le formalisme le permettait. Il est donc plus difficile de penser les particules en question comme 'corrélées mais séparées' que cela ne l'est dans le cas de boules de billard où, au contraire, c'est naturel. C'est pour caractériser ce fait nouveau, spécifiquement quantique, que j'ai fait appel au mot non-séparabilité (je crois bien, d'ailleurs ne pas avoir été le premier à utiliser ce néologisme).

Roger Balian. Mon point était que cela ressemblait non pas à la mécanique classique, mais à la mécanique statistique classique.

Bernard d'Espagnat. Peut-être à certains égards, mais c'est là un point différent.

Matteo Smerlak. Je suis certain que nous sommes très nombreux de par le monde à avoir lu vos ouvrages – et à les avoir mal lus. C'est mon très grand privilège de vous connaître en personne, afin que vous puissiez corriger et compléter mon interprétation de cet extrait !

Bernard d'Espagnat. Au fait ; d'où avez-vous tiré ma phrase (que je ne récus pas bien sûr !) ?

Matteo Smerlak. Je pense qu'il s'agit d'une phrase qui était citée dans un article. Je l'ai citée au deuxième degré. Je pourrai le retrouver, mais je ne l'ai plus en tête pour l'instant. Et, en particulier, je n'avais pas accès au livre lui-même à l'époque, ce qui explique mon erreur. Merci pour cette clarification.

Bernard d'Espagnat. Passons aux exposés prévus. Michel Bitbol a la parole.

Section I – Exposé de Michel Bitbol

Michel Bitbol. Vous venez de remonter à l'origine de votre ouvrage *Conceptual foundations of quantum mechanics*, que j'ai lu avec un grand intérêt en 1982, et qui a été l'un des premiers livres exhaustifs qui aient été publiés en philosophie de la mécanique quantique. Pour ma part, je vais à présent vous parler de mon premier article¹ de philosophie de la physique, qui remonte à 1983 – un peu avant la naissance de Matteo ! Cet article, que vous avez d'ailleurs cité dans quelques-uns de vos travaux, tirait sa motivation de mon étonnement devant un résultat tout à fait remarquable et assez peu commenté de John Bell, obtenu en 1981. Ce résultat a été publié dans un article assez connu, très clair et très instructif². Pour l'expliquer, je vais commencer par rappeler quelques notions élémentaires sur le théorème de Bell, pour vous faire sentir quelle est la différence entre le théorème de Bell original de 1964 et le théorème de Bell ultérieur, de 1981.

Vous savez tous que le théorème de Bell de 1964 montre qu'aucune théorie à variables cachées locales ne saurait être compatible avec les prévisions de la mécanique quantique portant sur des corrélations du type Einstein-Podolsky-Rosen. Autrement dit, la mécanique quantique exclut la conjonction de deux hypothèses : le réalisme à propos des propriétés des particules, et la localité de chacune de ces propriétés (le fait qu'il n'y a pas de signaux les faisant instantanément communiquer). Notons que les hypothèses conjointement exclues, de réalisme et de localité, portent explicitement sur des *propriétés*. Mais, dans ses nouvelles réflexions, Bell accroissait nettement la portée de ses conclusions puisqu'il montrait que la mécanique quantique exclut la conjonction de deux hypothèses plus vastes : le réalisme au sujet des *événements expérimentaux* et la localité de ces *événements*. Un saut qualitatif important a donc été effectué entre le théorème de 1964 et celui de 1981.

Il reste à partir de là à déterminer laquelle des deux hypothèses dont la *conjonction* est exclue par les prévisions quantiques, doit être rejetée. Tant que les hypothèses portent sur les propriétés des particules, les deux options de rejet semblent ouvertes. On peut renoncer à la localité des propriétés, mais on peut aussi renoncer au réalisme portant sur les propriétés. Il n'est pas invraisemblable qu'on ne puisse pas décrire des propriétés intrinsèques des systèmes physiques, mais seulement le fruit de la relation entre ces systèmes et un appareil de mesure. Mais lorsque les hypothèses mises sur la sellette portent sur les événements expérimentaux macroscopiques, observables à l'œil nu au laboratoire, un seul choix semble s'imposer. L'unique moyen de s'en sortir apparaît être de rejeter la localité des événements expérimentaux. L'autre option, celle qui consiste à rejeter le réalisme des événements expérimentaux, semble beaucoup trop outrée pour être retenue. Qui oserait nier la réalité de ce qui est visible et tangible à l'échelle de l'expérimentateur ? C'est sur le caractère impensable de cette dernière option que tablait John Bell pour rendre impératif de renoncer à la localité.

¹ M. Bitbol, « An analysis of the Einstein-Podolsky-Rosen correlations in terms of events », Phys. Lett., 96A, 66-70, 1983

² J.S. Bell, « Bertlmann Socks and the nature of reality », J. Physique, Colloque C2, suppl., 42, C2: 41-62, 1981

Rejeter le réalisme des événements expérimentaux heurte de front le réalisme le plus minimal que l'on puisse concevoir, à savoir celui des empiristes : les empiristes ne croient à aucune réalité, sauf celle des événements visibles. Ils ne croient pas, en particulier, aux entités construites de la physique théorique. Il font le tri entre ce à quoi ils acceptent d'attribuer une réalité (les objets et événements macroscopiques) et ce à quoi il n'acceptent pas d'attribuer une réalité (les entités théoriques). Est-il permis d'être encore plus anti-réaliste que les empiristes ? Est-il permis d'être encore plus sceptique que les empiristes, en allant jusqu'à mettre en doute la réalité avérée, tangible, visible, macroscopique des événements expérimentaux constatables au laboratoire ? Peut-on aller jusqu'à ne pas accorder crédit aux expérimentateurs Alice et Bob qui nous affirment qu'à l'instant initial de leur mesure locale, ils avaient déjà observé une certaine valeur du spin de la particule qu'ils mesuraient, et que la corrélation était donc déjà réalisée à cet époque, bien avant le moment de la comparaison ? Or, pour que cette corrélation soit déjà réalisée à ce moment-là, il faut bien invoquer quelque forme de non-localité ! Voilà le problème. Je le pose jusqu'à ce que sa tension interne devienne excessive, jusqu'à ce qu'on voie clairement pourquoi Bell pensait qu'il était impossible d'ignorer la non-localité.

Pourtant, aussi audacieux (ou insensé) que cela puisse paraître, j'ai tenté dès 1983 d'explorer la possibilité alternative consistant à rejeter l'hypothèse de la réalité intrinsèque des événements expérimentaux, y compris des événements attestés rétrospectivement par des observateurs, et à maintenir au contraire l'hypothèse de localité. Par la suite, j'ai été influencé par Monsieur d'Espagnat, qui avait lu attentivement mon article avant sa publication, et qui m'avait fait remarquer qu'il semblait manipuler deux philosophies diamétralement opposées : l'une qui était absolument empiriste voire anti-réaliste et l'autre qui était ultra-réaliste, celle d'Everett. Cette remarque judicieuse de Monsieur d'Espagnat (dont je le remercie encore aujourd'hui) a trotté dans ma tête durant des années et je me suis rendu compte qu'il y avait effectivement quelque chose d'étonnant dans cette conjonction de deux philosophies sans commune mesure, mais que je pouvais lui rendre une forme de cohérence. Pour y parvenir, j'ai identifié deux stratégies à première vue diamétralement opposées permettant de construire une théorie ne supposant pas la réalité intrinsèque des événements expérimentaux, après quoi j'ai montré qu'elles avaient un point commun majeur et généralement inaperçu. Ces deux stratégies sont les suivantes :

1) L'une est ce qu'on pourrait appeler un « empirisme radical », par référence à W. James³. C'est-à-dire la restriction de l'engagement ontologique au seul contenu de l'expérience vécue immédiate, ici et maintenant (en clair, on déclare que seule *existe* l'expérience vécue au présent). De ce point de vue, il est évident que les événements expérimentaux passés n'ont pas de réalité « en eux-mêmes », mais seulement relative à l'expérience immédiate. De ce point de vue toujours, il est évident que ces événements relatés *a posteriori* ne doivent pas être tenus pour existant intrinsèquement dans le passé, mais seulement *à présent* en tant que traduction exacte d'un état de la mémoire des observateurs. Ici, les événements dépendent à chaque instant d'une procédure de reconstruction et de comparaison, à partir des données de l'expérience actuelle. On ne peut pas dire qu'ils « existent », mais seulement qu'ils sont (re) constitués *ex post facto*. Dans mon article de 1983, cette stratégie était formulée plus prudemment, en cherchant à éviter des tonalités trop ouvertement idéalistes. Je me contentais alors de remarquer que la comparaison entre deux événements expérimentaux survenus à distance l'un de l'autre dans le passé supposait elle-même un événement présent. C'est uniquement au sein de cet événement présent de confrontation, que les deux événements passés sont rétrospectivement *constitués* en tant que comparables l'un à l'autre. Une autre manière de présenter les choses consisterait à remplacer

³ James W. (2005) *Essais d'empirisme radical*, Paris : Agone

l'expérience présente de l'événement par l'accord intersubjectif présent au sujet de l'événement. Elle substitue à un idéalisme extrême quasi-solipsiste une pragmatique du langage et donc de la communauté de parole.

2) L'autre stratégie semble être aux antipodes de la première. Elle table sur un « réalisme scientifique radical » des entités de la théorie physique. En mécanique quantique, cela équivaut à soutenir un réalisme des vecteurs d'état. Il n'est pas question ici d'événements discontinus (les fameuses « réductions du paquet d'ondes »), mais d'évolution continue, conforme à l'équation de Schrödinger, de ces vecteurs d'état. Encore faut-il trouver un moyen de raccorder un tel formalisme sans événement à quelque chose qui soit *reconnaissable* par un observateur *comme* événement expérimental. Une manière fascinante d'obtenir ce raccord a été exposée dans l'« interprétation des états relatifs », proposée par H. Everett en 1957. Everett attribue un vecteur d'état à l'observateur, et introduit une notation pour le contenu de la mémoire de ce dernier. Sa mémoire contient, entre autres, le souvenir *d'avoir été témoin* de tel ou tel événement expérimental. La conclusion surprenante qu'on tire de cette lecture « radicalement réaliste » de la mécanique quantique est qu'il *n'existe pas* d'événement expérimental « en soi » ; mais que *relativement* à chaque contrepartie de l'observateur, de son point de vue partial, un événement expérimental bien défini *apparaît* s'être produit.

Assez curieusement par conséquent, lorsqu'ils sont poussés jusqu'à leurs formes extrêmes, l'empirisme et le réalisme se rejoignent sur un point crucial. Selon l'un et l'autre, un événement expérimental n'« est » pas dans l'absolu, mais *relativement* au point de vue de celui qui en porte témoignage. Dans l'empirisme radical, l'événement « est » relativement au point de vue de l'observateur ultime que représente la « conscience transcendante présente » ; et dans le réalisme radical des vecteurs d'état de la mécanique quantique l'événement « est » relativement à une contrepartie d'un observateur naturalisé lui-même associé à un vecteur d'état. John Bell a très bien pressenti cette convergence, lorsqu'il a caractérisé la vraie nouveauté de l'interprétation d'Everett : « La répudiation du concept du passé, qui peut être vue comme appartenant à la même tradition libératrice que la répudiation du concept de simultanéité par Einstein ». Plus précisément, dans la théorie d'Everett, « il n'y a pas d'association d'un présent particulier avec un passé particulier [...] et cela n'a pas d'importance du tout. Car nous n'avons pas accès au passé, nous avons seulement nos souvenirs et nos enregistrements »⁴. Bell considère cette description de l'interprétation d'Everett comme sa « *reductio ad absurdum* » (lorsqu'il conclut qu'elle revient à un solipsisme radical du présent). Mais rien n'empêche de l'assumer philosophiquement !

La résurgence récente de l'option consistant à rejeter le réalisme plutôt que la localité dans le traitement des corrélations EPR, montre en tout cas que sa mise à l'écart au nom du bon sens ne va plus de soi. Nous avons écouté la version relationnelle de cette option, avec l'exposé de Matteo et de Carlo. Il commence à y en avoir d'autres, comme par exemple un très récent article d'Andrei Khrennikov⁵, qui affirme qu'on peut se passer de la non-localité si on accepte jusqu'au bout les conséquences de la contextualité en mécanique quantique, si on fait du « tout contextuel », si on accepte que toute détermination quelle qu'elle soit (singulière ou de comparaison entre deux déterminations singulières) est relative à un contexte. Si on accepte cela, on peut peut-être alors se passer de la non-localité. C'est ce que re-propose Khrennikov dans son article de 2011, après Matteo et Carlo.

Section II – Discussion

⁴ J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1987, p. 118, 136

⁵ A. Khrennikov, « Bell argument: Locality or Realism ? Time to make the choice », ArXiv, 1108 0001v3, 23 décembre 2011

Roger Balian. J'ai été surpris par cette histoire de réalisme expérimental. En réalité, dans les expériences de Bell, on met ensemble des expériences qui ne peuvent pas être faites en même temps, incompatibles. On trouve donc des choses contraires à la logique du bon sens habituel, bien qu'il s'agisse de choses tout à fait raisonnables en mécanique quantique – mais qui dépendent du contexte expérimental.

Michel Bitbol. Absolument. Je pense que la façon dont vous l'avez exprimé – vous allez peut-être ne pas être d'accord avec moi – est extraordinairement bohrienne. Vous dites, en effet, qu'on ne peut pas mettre ensemble dans une même formule des expériences qui n'ont pas pu être faites simultanément.

Roger Balian. Je ne sais pas si c'est bohrien, je suis très peu philosophe ! Mais c'est terre à terre.

Michel Bitbol. C'est un peu comme cela que Bohr a répondu à Einstein : en disant qu'il était excessif de demander à la mécanique quantique de décrire des situations qui exigeraient, pour être mises en évidence, d'effectuer deux ensembles de mesures incompatibles.

Carlo Rovelli. Michel Bitbol, dans la première partie de votre exposé vous formulez le problème comme une tension entre localité et réalisme. Dans la seconde vous montrez que deux solutions extrêmes sont possibles, dans lesquelles la notion de réalité est mise en cause. Il me semble que, même dans ces deux solutions, la localité est affaiblie dans un certain sens. Dans la solution de l'empirisme radical, il existe encore une forme de localité, mais de façon un peu gratuite : dès lors que l'expérience est liée à l'observateur, elle est nécessairement locale – ce qui me convient très bien. Dans la solution du réalisme radical, aujourd'hui à la mode en Angleterre, la localité me semble perdue de façon brutale : la physique qui devient réaliste dans le sens du vecteur d'onde n'est pas une physique dans l'espace-temps. Il y a donc de la non-localité féroce. De ce point de vue, si le problème est celui de la tension entre les deux, la seconde solution me semble bien pire.

Michel Bitbol. D'abord, il faut revenir sur un aspect crucial de mon exposé. Au fond, les deux solutions (la solution empiriste radicale et la solution réaliste radicale) ont un point commun : elles sont antiréalistes au sujet des événements. Ainsi, le réalisme radical est réaliste au sujet des entités mathématiques (les vecteurs d'état, par exemple), mais pas au sujet des événements. L'événement, pour un Everettien, est juste un constat fait par une contrepartie d'observateur représentée par un certain vecteur d'état dans la superposition. L'événement n'existe donc pas, tout comme pour l'empirisme radical. C'est cela, le point commun entre les deux possibilités. Vous dites par ailleurs que ce réalisme formel, ce réalisme des entités mathématiques de la mécanique quantique, entretient une forme de non-localité extrême. Je pense plutôt pour ma part qu'il n'entretient aucune thèse sur la localité. Il est a-local. Il ne se préoccupe pas de la localité. Mais en même temps, il permet d'attribuer à ses objets des coordonnées spatiales à partir des valeurs que les diverses contreparties d'observateurs ont mesurées pour les observables X, Y ou Z. Si l'on accepte cette version du réalisme radical, ce réalisme formel des entités mathématiques de type vecteur d'état, on peut dire qu'il suppose d'un côté une a-localité (l'a-localité de l'entité vecteur d'état qui se déploie dans un espace de Hilbert plutôt que dans l'espace ordinaire), et d'un autre côté l'absence de nécessité de perdre la localité au sens traditionnel du terme, c'est-à-dire au sens d'une non-communication instantanée entre les diverses positions telles qu'elles sont mesurées lorsqu'on évalue les observables coordonnées spatiales. Dans cette forme de réalisme, les deux sont

vrais à la fois : une a-localité formelle, et une comptabilité avec la localité au sens banal, spatial du terme.

Bernard d'Espagnat. Il y a un autre moyen, je crois, de retrouver le réalisme radical. Je pense ici à la discussion qui a eu lieu entre John Bell d'une part et, d'autre part, Shimony, Clauser et d'autres – qui disaient qu'on peut éviter d'avoir une violation des inégalités de Bell si l'on suppose que, contrairement à ce que, intuitivement, nous pensons tous, le positionnement des différents instruments ne procède pas s'une décision vraiment libre de notre part. Si l'on postule le réalisme absolu et le déterminisme absolu, on doit dire que tout est déterminé, y compris nos actions que nous croyons libres, y compris donc le positionnement en question. Ces auteurs ont pu montrer que sous cette hypothèse la démonstration de Bell ne fonctionne pas. Bell n'a pu se défendre que, *grosso modo*, en donnant de très bons arguments de plausibilité pour rejeter cette hypothèse de déterminisme absolu appliquée au positionnement des instruments.

Michel Bitbol. C'est parfaitement exact. À ce sujet, je signale que Peres et Zurek ont écrit un excellent article en 1982 (intitulé « Is quantum theory universally valid ») sur le fait qu'on devait choisir entre deux options : le déterminisme absolu et la possibilité de donner sens à la science. Pour donner sens aux données scientifiques, il faut en effet admettre que l'observateur est libre de choisir ses conditions expérimentales, et qu'il n'entre donc pas lui-même dans le domaine strictement déterminé.

Alexei Grinbaum. Mais le déterminisme absolu reste tout à fait vivant, avec notamment le super-déterminisme que le physicien Gerard 't Hooft défend depuis des années. C'est tout à fait cohérent, même si j'ignore qui, au-delà de lui, y croit.

Michel Bitbol. Cela prouve qu'en poussant un peu les hypothèses métaphysiques on peut avoir des interprétations remarquablement différentes de celle de Bell lui-même. Bell s'interdisait certaines options, comme le déterminisme absolu ou le solipsisme du présent – il a même dénoncé, vous l'avez vu, cette dernière option. Mais si l'on ne se fixe pas les mêmes interdits que Bell, il existe un assez grand nombre de solutions « exotiques » du paradoxe EPR. Souvent, en physique, le champ des solutions est artificiellement limité par le poids excessif du « surmoi métaphysique ».

Roger Balian. Je voudrais faire une parenthèse sur les inégalités de Bell. Parmi les multiples modèles que nous avons étudiés, il en existe un qui permet de faire l'image de l'objet dans l'appareil, d'une certaine façon. Dans les mesures idéales, les images sont totalement corrélées : quand l'appareil dit up, c'est up, quand il dit down, c'est down. Avec ce modèle, il y a moyen de fabriquer un dispositif dynamique qui réalise des mesures dans lesquelles on obtient une image probabiliste de ce que dit l'appareil par rapport à ce que dit l'objet. Ce qui est amusant, c'est que quand on regarde les corrélations des mesures effectives (ce qu'on lit sur les pointeurs), les inégalités de Bell ne sont absolument pas violées, tout simplement parce que l'image classique sur les pointeurs des corrélations existant en mécanique quantique se met à se ratatiner de telle façon que les inégalités de Bell se mettent à être satisfaites sur les résultats de mesure. Mais ce qu'on infère depuis les résultats de mesure sur l'appareil quand on fait la théorie de la dynamique de l'interaction appareil/objet nous redonne les inégalités de Bell. C'est une remarque un peu terre à terre qui montre bien que les objets macroscopiques n'obéissent pas aux mêmes lois que les microscopiques, mais qu'ils sont malgré tout parfaitement corrélés dans un cadre totalement quantique.

Alexei Grinbaum. Si vous me permettez de compléter votre intervention en une phrase, la théorie de la discordance quantique – qui n’est pas la même chose que l’intrication – étudie ces corrélations qui ne violent pas les inégalités de Bell, mais qui constituent quand même des ressources précieuses.

Bernard d’Espagnat. Je pense qu’il est temps de vous laisser la parole pour votre exposé.

Section III. Exposé d’Alexei Grinbaum

Alexei Grinbaum. J’ai le sentiment que cette discussion sur l’empirisme radical pourrait nous amener à parler des contrefactuels, ou des questions que se posait Specker, mais je voudrais aujourd’hui parler de tout autre chose — et j’ai le privilège de vous parler d’articles publiés après la naissance de Matteo Smerlak !

J’aborderai deux sujets. Le premier est un travail un peu historique. Dans son article de 1995 sur la mécanique quantique relationnelle, Carlo Rovelli essaie de proposer un développement formel, mathématique, de ses idées et, toujours dans le cadre de la philosophie relationnelle, de dériver à partir de principes informationnels, les éléments du formalisme de la mécanique quantique. Cette démarche était esquissée dans l’article de Carlo et, pour ma part, j’ai essayé de la développer il y a 8 ou 10 ans. A l’époque, ce travail utilisait les idées de la logique quantique. Je ne souhaite pas entrer ici dans le détail, mais simplement noter que cela nous a permis de comprendre les limites de cette tentative.

Dans son texte de 1995, Carlo Rovelli propose deux axiomes. Le premier est qu’il y a une limite maximale à la quantité d’information pertinente à propos d’un système. Le second est qu’on peut toujours obtenir de l’information nouvelle à propos d’un système. C’est à partir de là que j’ai essayé, en utilisant la logique quantique, de dériver la structure des espaces de Hilbert et des éléments du formalisme mathématique de la mécanique quantique. Au passage, je me suis aperçu qu’il fallait ajouter beaucoup de principes supplémentaires à ces axiomes. En effet, même s’ils captent quelque chose d’essentiel en considérant qu’il existe une limitation maximale mais aussi une possibilité de toujours renouveler notre « cache » d’information, notre mémoire, il est nécessaire d’y ajouter d’autres postulats pour obtenir la mécanique quantique. Il faut en particulier ajouter une structure qui introduit la continuité des transformations entre états purs comme un axiome postulant directement le corps numérique réel, complexe ou quaternionique. Il faut donc de nombreux éléments pour que le programme de Rovelli puisse mener à un espace de Hilbert. A partir de là, je me suis demandé quel était le problème. En exigeant un certain nombre d’axiomes supplémentaires, les mathématiques indiquent clairement que la philosophie sur laquelle se fonde l’approche de Rovelli réalisée par un formalisme de logique quantique n’est peut-être pas suffisante. Il se peut qu’elle ne soit pas encore assez comprise, puisque le « coût » des présupposés qu’il faut y ajouter est grand. Il n’existe pas encore dans cette version de 1995 de correspondance naturelle entre les postulats conceptuels et leurs traductions mathématiques.

Je me suis donc demandé quelle était cette imperfection conceptuelle que je pourrais, peut-être, aider à éclaircir. Il m’a alors semblé que cette imperfection pourrait être lue dans l’utilisation absolue – et par conséquent non-relationnelle – de la notion de système. Voici deux citations. La première est de Carlo Rovelli : « Tout système peut être observateur pour un autre système. L’information n’est que corrélation ». La deuxième, opposée, est celle d’Asher Peres : « Personne ne dirait que deux électrons dans l’état fondamental de l’atome d’hélium sont observateurs l’un pour l’autre ou se mesurent l’un l’autre. »

Carlo Rovelli. La phrase est évidemment fautive ! Il dit « Personne ne dirait que ... », tandis que voilà juste ici quelqu'un qui le dit ...

Alexei Grinbaum. Ainsi que j'ai déjà eu l'occasion de l'indiquer, je considère que la question de l'observateur et de son choix du système observé est toujours sans réponse. L'observateur est-il, ou non, une notion universelle, c'est-à-dire tout système est-il observateur en mécanique quantique ou bien l'est-il sous quelques conditions seulement, et si oui, alors lesquelles ? Pour parler d'information et d'observateurs, j'ai souhaité reprendre deux idées à mon compte. La première, même si elle a été exprimée antérieurement, a été portée par Briloin dans les années 40 : il faut exclure de l'analyse de l'information les éléments humains, comme la conscience. La seconde est exprimée par Everett, qui dit que ce qui importe, chez les observateurs, c'est la mémoire.

Pour ma part, je souhaite vous esquisser brièvement un programme de recherche – ayant, à ce jour, peu de chance d'être financé – qui compte trois composantes : une composante mathématique, une composante expérimentale et une composante logique/informatique.

Un cube de glace est-il un système susceptible d'être décrit par la mécanique quantique ? Il est clairement un système physique. Mais, lorsqu'il commence à fondre, jusqu'à quel point continue-t-il à être un système – pas nécessairement quantique, mais simplement identifié en tant que système « cube de glace » ? Il est clair qu'au sein d'une discipline donnée, par exemple, la mécanique des corps solides, il cesse d'être un système à tel ou tel moment. Pourquoi ? Parce que les degrés de liberté qu'on associait à un « cube de glace » ont disparu. Dans l'état liquide après la fonte, les degrés de liberté sont complètement différents. En conséquence, il est essentiel pour un observateur au sein d'une théorie physique de maintenir l'identification du système qu'il observe. Autrement dit, l'observateur maintient l'information sur les degrés de liberté pertinents. Pour donner une formulation succincte : identifier un système, c'est maintenir l'identification des degrés de liberté pertinents à ce système.

Qu'est-ce qu'un degré de liberté pertinent ? Pour répondre à cette question, je propose un schéma qui est aussi abstrait que la machine de Turing est le schéma abstrait d'un ordinateur. Je propose de considérer que l'observateur est un algorithme. Quel que soit son support physique, c'est cet aspect algorithmique qui permet de distinguer l'observateur de n'importe quel amas de degrés de liberté physiques. Au niveau abstrait, l'observateur dispose d'une sorte de ruban devant lui, avec de nombreux degrés de liberté – et il le parcourt en plaçant une croix devant chaque degré de liberté pertinent. Évidemment, ce n'est pas une réalisation physique empirique, tout comme la machine de Turing n'est pas un ordinateur réel. Mais tous les observateurs suivent ce modèle abstrait, exactement comme tous les ordinateurs réels sont des machines de Turing abstraites. La définition de l'observateur en tant qu'algorithme qui identifie les systèmes fournit un modèle général de l'observation.

Si l'observateur est un algorithme, il faut que les caractéristiques mathématiques de cet algorithme soient indépendantes de la réalisation physique pratique, car, physiquement parlant, un observateur peut être un papillon, une molécule de gaz, etc. Cet observateur abstrait, cet algorithme, a une caractéristique invariante de son support matériel, qui est sa complexité de Kolmogorov. Elle caractérise non pas le système physique empirique, mais l'algorithme lui-même. Quand l'observateur abstrait identifie un système, il écrit une séquence de 0 et de 1, qui dénotent les degrés de liberté pertinents. Et si la complexité de cette séquence est inférieure à la capacité d'identification de l'observateur, c'est-à-dire à la complexité de l'observateur en tant qu'algorithme, on dirait que le système observé est par définition un système quantique.

Catherine Pepin. Pouvez-vous définir la complexité de Kolmogorov ?

Alexei Grinbaum. C'est une notion utilisée en informatique et en théorie de la complexité. La complexité algorithmique, ou de Kolmogorov, est la longueur du programme le plus court qui reproduit la séquence donnée. On démontre que cette longueur est une quantité invariante, à une constante près, et ne dépend pas de la machine qui exécute le programme. La complexité de Kolmogorov est la seule caractéristique d'un algorithme indépendante de sa réalisation physique.

Je souhaite vous présenter trois résultats de ce programme de recherche, en commençant par le résultat mathématique, puis en abordant le résultat de physique expérimentale.

Tout d'abord, le résultat mathématique. J'essaie de remplacer l'axiome de Carlo Rovelli selon lequel tout système est observateur par quelque chose de plus nuancé. Pour observer un système en tant que système quantique, c'est-à-dire maintenir tous les degrés de liberté à travers la mesure et l'évolution de système vues par l'observateur, il faut que l'observateur soit plus complexe que le système. Mais doit-il être beaucoup plus complexe ? Et puis, si le premier observateur est très complexe et le second, juste légèrement plus complexe que la suite de symboles qui décrit le système, l'identifieront-ils de la même manière ? Peut-on alors donner un critère d'objectivité, à savoir, le critère d'un accord d'identification entre deux observateurs observant un système quantique ? Je propose un critère mathématique : si on se donne une suite de différents observateurs qui observent des systèmes (des systèmes S observés par des observateurs O), on exigera que l'ajout de tout nouvel observateur ne change pas l'entropie de Shannon de ce processus d'observation multiple. Or il existe un lien très intéressant entre l'entropie de Shannon de ce processus et la complexité de Kolmogorov de ces observateurs en tant qu'algorithmes d'identification. La condition d'objectivité que je pose mathématiquement, est que le taux d'entropie de Shannon de ce processus, quand on ajoute des observateurs, soit égal à zéro. J'en dérive une condition sur la complexité de Kolmogorov des observateurs qui sont d'accord entre eux, c'est-à-dire des observateurs donnant une description « objective » du système en considération. Concrètement, je montre à partir du théorème de Brudno, conjecturé par Zvonkine et Lévine, que les complexités des suites d'identification produites par ces observateurs doivent grandir moins que linéairement quand on ajoute des systèmes au processus d'observation.

Roger Balian. Au départ, l'observateur définit des variables pertinentes par rapport à ce qu'il observe. Mais est-ce que ces observateurs ont les mêmes variables pertinentes ou des variables pertinentes différentes ?

Alexei Grinbaum. Le critère d'objectivité répond à la question de savoir quand cette coïncidence entre deux identifications sera possible. Si on regarde deux observateurs physiques, réels, et qu'on les décrit comme produisant des séquences de 0 et 1, ces séquences sont toujours finies. Dès lors, la condition dont je viens de parler est juste une condition d'identité entre deux suites de 0 et 1. En revanche, puisque nous ignorons quelle est la physique empirique derrière cette notion d'observateur, il faut admettre la possibilité de séquences infinies. Et, à ce moment-là, la condition d'objectivité, ou d'existence d'un accord entre observateurs, est que le taux d'entropie de Shannon soit égal à zéro.

Le deuxième élément de mon programme de recherche est une expérience qui n'est pas réalisée à ce jour, mais dont je peux conjecturer le résultat à partir d'expériences déjà réalisées. Prenons un calorimètre très fin et mettons dedans un fullerène (C_{60}) – un seul. Voyons si ce C_{60} fonctionne comme observateur. Pour cela, envoyons des photons sur le C_{60} , qu'il va « observer » (terme du langage de la mécanique quantique) ou « absorber »

(terme du langage de la physique expérimentale) – ces deux termes signifiant qu’il y aura corrélation entre les degrés de liberté du fullerène et les degrés de liberté du photon. Dans les degrés de liberté vibrationnels, mécaniques, etc., de cette molécule très complexe, il y aura une information sur l’état du photon qui est arrivé. De l’extérieur nous n’avons pas d’accès détaillé à ces conditions, mais est-ce possible de savoir simplement qu’elles existent, c’est-à-dire que l’observation a eu lieu ? Envoyons pour cela plusieurs photons un par un. Chaque fois, le fullerène observera le photon et stockera de l’information. Quand il aura atteint sa complexité algorithmique en tant qu’observateur, il ne pourra plus sauvegarder cette information et il commencera à l’effacer – ce qui produira de la chaleur. En effet, selon le principe de Landauer, effacer l’information c’est produire de la chaleur. On peut mesurer ce moment de production d’un pic dans le calorimètre et on peut mesurer la quantité de chaleur. Je ne propose pas ici de physique nouvelle, mais une lecture totalement nouvelle d’un processus physique. Ce processus, selon les mesures faites il y a une vingtaine d’années, montre qu’un fullerène peut « observer » jusqu’à 10 photons (cela dépend des longueurs d’ondes et d’autres éléments encore). A mon avis, cette lecture nouvelle de l’absorption de photons par un fullerène permet de comprendre ce qui se passe sur le plan de l’observation en mécanique quantique.

Enfin, un dernier mot sur les conséquences pour la logique et l’informatique quantiques, étant entendu que ce travail est en cours et même loin d’être achevé. L’approche selon laquelle l’observateur aurait des capacités limitées (sans que l’on sache vraiment quelle est sa réalisation physique) permet de voir, en quelque sorte, d’où vient la borne de Tsirelson dans les inégalités de Bell. Je vous propose un schéma extrêmement simple, et même simpliste. Prenez l’inégalité de Bell sous forme CHSH, avec quatre corrélateurs, et imaginez que le processeur qui calcule le résultat de cette formule n’ait pas quatre registres pour sauvegarder les nombres. Imaginez, pour commencer, qu’il n’en ait qu’un seul. Alors, il ne peut faire que $A + A + A - A = 2A$. Si la valeur de A est entre -1 et 1 , alors le maximum sera 2 . Imaginez maintenant qu’il ait deux registres mais que ces deux-là soient des qubits (on peut alors sauvegarder une quantité vectorielle, mais pas la lire deux fois, car une fois qu’elle est lue, elle disparaît). Avec deux vecteurs, on pourrait calculer dans un premier temps la somme et la différence de A et B et de les mettre dans les registres. Dans un second temps, on les utilisera pour calculer CHSH. En quelque sorte, vous obtenez le théorème de Pythagore : A et B sont de longueur 1 , mais $A + B$ et $A - B$ sont de longueur maximale égale à la racine carrée de 2 . Et quand vous avez deux racines de 2 , c’est la borne de Tsirelson. C’est un peu simple et même simpliste, mais on voit que l’idée des capacités limitées d’un observateur a peut-être aussi des conséquences permettant de comprendre les fondements de la mécanique quantique.

Section IV. Discussion

Bernard d’Espagnat. Je suis à la fois séduit et perplexe. Séduit par la partie de votre programme consistant à tenter d’évaluer la complexité minimale que doit avoir l’observateur : ceci me paraît justifié même du point de vue anti-réaliste, vu que l’acte d’observer nécessite toujours l’usage d’instruments (d’yeux par exemple, si l’observateur est humain). Perplexe toutefois dans la mesure où vous me semblez vous rallier à la position réaliste que finalement défend Carlo car, dans ce cadre, deux difficultés, spécifiquement quantiques l’une et l’autre, selon moi demeurent. Mais sur elles je m’expliquerai tout à l’heure, comme je l’ai dit.

Jean Petitot. Je pense qu’Alexeï a fondamentalement raison et, qu’en fait, toutes nos observations au sens le plus naïf correspondent à ce qu’il a dit dès qu’on tient compte de ce que nous sommes : comment nous voyons, comment nous calculons avec notre cerveau.

Prenez un capteur comme un photorécepteur de la rétine : il observe un photon exactement comme Alexis dit que le fait un fullerène. Un neurone cortical fait de même en plus compliqué. Donc je pense que non seulement Alexei a raison, mais que nous-mêmes, en tant que cerveaux-observateurs, nous sommes des machines informationnelles dans son sens. Simplement, un fullerène est beaucoup plus simple que nos capteurs et nos neurones.

Je suis toujours surpris de constater que dans ce type de discussion sur l'observation, on parle constamment de la vision de l'observateur humain qui « lit » les appareils qu'il utilise, mais qu'on ne parle jamais de ce qu'est cet observateur en tant que machine biologique composée de photorécepteurs, de neurones, etc. Pourtant un photorécepteur rétinien est un détecteur quantique de photons absolument extraordinaire qui satisfait les principes qu'Alexei a évoqués. Dans le noir, il est capable de détecter un ou deux photons. Dans des conditions normales, il est capable de mesurer des flux et des longueurs d'ondes, etc. Mais il est capable de ne faire que cela. [Son segment externe sensible aux photons est une pile de plusieurs milliers de disques dans les membranes desquels sont insérées des macromolécules de rhodopsine, composées d'opsine et d'une molécule de rétinol en position 11 cis. Les photons déclenchent une isomérisation cis-trans du rétinol, ce qui induit une hyperpolarisation de la membrane et une cascade de réactions neurophysiologiques dans les couches de la rétine. C'est ainsi que les cellules ganglionnaires sont activées par la lumière et envoient des informations dans le nerf optique. Toute perception commence par une telle isomérisation du rétinol qui est donc, au sens strict, un observateur.]

Bref un photorécepteur est capable de coder certains degrés de liberté et il est donc typiquement un observateur. Mais dès qu'il y a trop d'informations à coder, il efface – et heureusement ! Je ferai remarquer que si les photorécepteurs n'effaçaient pas constamment l'information qu'ils codent, je ne sais pas très bien ce que serait notre perception.

Alexei Grinbaum. Un problème m'a été signalé dès le début, et je ne sais pas encore y répondre : en quoi est-ce que tout cela est de la mécanique quantique ? Cette histoire de limitation dans l'observation peut aussi être quelque chose de plus général.

Jean Petitot. Quand vous avez une protéine et qu'il suffit qu'il y ait un photon pour qu'un phénomène de stéréochimie change sa configuration, il s'agit d'un phénomène typiquement quantique.

Alexei Grinbaum. Oui, dans le sens des axiomes de Carlo Rovelli qui limitent l'information accessible. D'un côté, je vois l'analogie. Mais, de l'autre côté, je vois aussi un défi : pour moi, c'est en quelque sorte avant la mécanique quantique, puisque cela permet de parler d'une notion que celle-ci ne définit pas – celle de l'observateur. C'est une notion métathéorique en mécanique quantique. Il faut bien montrer d'où vient l'espace de Hilbert. Pour l'instant, je ne sais pas faire ce pas.

Je pense qu'à partir de cette approche, on arrivera à comprendre les grands éléments de formalisme quantique qui sont structurels, comme la quantité de non-localité, plutôt que de dériver l'évolution unitaire dans le temps.

Hervé Zwirn. Puisque nous sommes là pour discuter, je pense que nous pouvons ne pas être d'accord ! Pour ma part, je suis en désaccord sur plusieurs points avec tout ce qui vient d'être dit. Certes, le fait qu'un photorécepteur soit capable de détecter un photon est indéniable. Et alors ? Quel est le rapport ? Ce n'est pas parce qu'une chose est vraie qu'elle apporte quelque chose à toute question particulière qu'on se pose. Elle peut n'avoir aucune pertinence relativement au problème considéré. Et c'est un peu là, ai-je l'impression, que se situe l'ambiguïté de notre débat. Je ne suis pas en désaccord avec tout ce qui vient d'être dit,

mais je considère que c'est à côté du problème que nous débattons. Le fait qu'un photorécepteur dans un œil soit capable de détecter un photon, ce que personne ne nie, est totalement déconnecté des problèmes qu'on se pose.

Comme j'avais eu l'occasion de l'indiquer, j'ai avant tout un gros problème avec l'utilisation que fait Alexei Grinbaum de la complexité de Kolmogorov. D'abord parce qu'elle ne s'applique pas à des algorithmes, mais à des chaînes de caractères. La complexité de Kolmogorov d'une chaîne finie de caractères est définie comme la longueur du programme le plus court qui permet à une machine de Turing Universelle donnée de produire la dite chaîne sur son ruban de sortie à partir d'un ruban d'entrée vide. L'intérêt de ce concept est qu'il est possible de prouver (via un théorème d'invariance) que cette définition ne dépend de la machine de Turing Universelle considérée que de la manière suivante : Etant données deux machines de Turing universelles U et V, il existe une constante C ne dépendant que de U et V telle que pour toute chaîne s la complexité de Kolmogorov de s selon U et celle de s selon V ne diffèrent en valeur absolue que d'une quantité inférieure à C. Une fois choisie une machine de Turing universelle, on peut calculer la complexité de n'importe quelle chaîne et être assuré que la complexité qui serait calculée sur une autre machine ne s'en écarterait pas de plus d'une constante fixe ne dépendant que du choix de l'autre machine et pas de la chaîne. Il y a alors plusieurs problèmes avec ce que raconte Alexei Grinbaum. Le premier est que la complexité de Kolmogorov d'un algorithme n'est pas une notion définie. Il y a une confusion entre algorithme et chaîne. Un algorithme est certes un programme donc une chaîne de caractères mais il est bien connu des chercheurs du domaine qu'un algorithme peut s'implémenter de différentes manières et que selon le langage choisi et la manière de l'implémenter dans ce langage, on peut aboutir à des programmes totalement différents et donc des chaînes différentes et donc des complexités totalement différentes. Comme il n'y a pas en l'occurrence d'équivalent du théorème d'invariance, il en résulte que la complexité de l'algorithme (sans plus de précaution) est un concept non défini. Mais au delà de cela, l'algorithme en question me semble lui-même non défini. Que signifie l'algorithme d'un observateur ? Quelle est le sens qu'on peut donner à "la complexité algorithmique du système" ? Je sais bien que Bennett utilise énormément cette notion d'assimilation d'un objet à une chaîne et qu'il se permet dans tous ses articles, de manière très hypothétique toutefois, de parler de la complexité algorithmique d'un objet voire de sa profondeur du programme pour produire cet objet. Mais autant ces notions-là ont une rigueur en mathématiques ou en informatique, autant dès lors qu'on les transpose à la physique, on est dans des choses extrêmement problématiques, peu définies, qui sont très hypothétiques et restent très ambiguës. Et là, je ne vois ni ce qu'est cet algorithme ni, par voie de conséquence, ce que l'inégalité $K(S) < K(O)$ veut dire.

Je suis par ailleurs extrêmement surpris qu'on parle d'observateur ou de mesure sans avoir défini ce qu'on entend par là précisément alors que ce n'est pas selon leur sens habituel. Que veut-on dire quand on affirme qu'un fullerène fait une mesure en tant qu'observateur ? La moindre des choses serait de préciser le sens qu'on a en tête puisque ce ne peut évidemment pas être le sens intuitif habituel selon lequel une valeur définie se détermine. Il me semble que dans les problématiques philosophiques que nous nous posons, il existe une notion d'interprétation des formalismes et des résultats de mesure, particulièrement en physique quantique. Si nous étions des fullerènes et que nous n'ayons pas de vision personnelle, de sensation de ce qu'est le monde qu'on doit expliquer, nous ne nous poserions pas cette question de l'interprétation de la mécanique quantique. La question de savoir comment il se fait que le monde nous apparaît tel qu'il est, classique, avec des objets ayant des propriétés aux valeurs bien définies, alors qu'il est quantique de façon sous-jacente, est la question principale, ou l'une des questions principales. Or elle ne se pose pas pour un fullerène. Mais je n'arrive pas à voir quelle est la définition du concept de mesure qu'utilise Alexei.

Alexei Grinbaum. Je propose de vous répondre en commençant par la complexité de Kolmogorov. Cette dernière est définie pour des chaînes, des séquences de 0 et 1. L'informatique théorique établit la possibilité, quand on parle de complexité de Kolmogorov, d'aborder des notions suivantes en passant aisément de l'une à l'autre : complexité des nombres entiers, complexité des fonctions récursives partielles, complexité des suites de symboles. Toutes ces notions peuvent être appelées « complexité de Kolmogorov ». Quand je prends l'image d'un ruban, c'est pour représenter la séquence dont je parle au sens de la complexité de Kolmogorov. L'inégalité $K(S) < K(O)$ est une expression de « pertinence », du fait que l'observateur maintient l'identification des degrés de liberté pertinents. Quand le S est observé $K(S)$ dépend de l'observateur O qui identifie ce S.

Hervé Zwirn. Comment définit-on ce $K(S)$?

Alexei Grinbaum. Je reviens un instant à Bennett et Zurek, qui ont essayé d'amener, d'une certaine façon, la notion de complexité de Kolmogorov en mécanique quantique. Zurek, à la fin des années 80, et Bennett plus tard (et, à mon sens, plus vaguement) disent que lorsqu'un observateur identifie un état quantique (attention, pour ma part je n'ai à aucun moment parlé des états quantiques), c'est une information – donc il la sauvegarde dans sa mémoire. Il y a une complexité de Kolmogorov liée au fait que l'observateur a stocké cet état comme une information. Si l'état change, changent l'entropie du système mais aussi celle de Kolmogorov, qui est liée au fait qu'on a réécrit l'information dans la mémoire de l'observateur. Pour Zurek, la description physique contient deux entropies, et donc pour calculer l'entropie totale, physique, il faut ajouter une entropie de Kolmogorov à l'entropie de Shannon. Pour moi, identifier l'état du système et identifier le système, c'est en réalité un seul et même acte. Je tends à penser qu'il n'existe pas de distinction claire, informationnelle ou physique, entre l'identification du système et celle de son état. Ma proposition serait par conséquent un développement de la thèse de Zurek, mais je laisse la question des entropies ouverte. Ce qui est clair, c'est que c'est dans cet acte de l'observateur qui regarde le système et qui dit que puisqu'il le regarde, il a une information (une chaîne de 0 et 1), il y a une complexité de Kolmogorov. C'est essentiel

Je voudrais encore faire une remarque sur l'interprétation physique. En 1905, l'idée que la notion de temps puisse être définie pour un photon qui se promène à la vitesse de la lumière et que son temps propre n'est pas du tout le temps vécu par un objet dont le mouvement est bien plus lent, semblait très étrange. Comment quelque chose qui n'est pas un être humain pourrait avoir une temporalité propre qui soit complètement différente de la nôtre ? Pour moi, il en est de même avec l'idée que le fullerène peut être observateur quantique. Car le fullerène observe bien les photons – tout comme nous le faisons nous-mêmes ! Mais, évidemment, il ne peut pas nous le communiquer. Il n'y a aucune raison a priori de considérer que l'homme est spécial et que la notion d'observation lui est réservée. Tout comme la notion de temps ne le lui est pas.

Hervé Zwirn. Il faut alors définir ce qu'est l'observation. Si on la réduit à la notion d'interaction, pourquoi pas ? Cela ne me gêne pas, si c'est une définition. Mais ce n'est pas ce qu'on appelle habituellement une observation, dans laquelle il y a une notion d'interprétation, parce que cela soulève des questions pour nous – qui ne sommes pas des fullerènes –, questions qui ne se posent pas pour le fullerène. Maintenant si l'on veut changer le vocabulaire et appeler observation une simple interaction, pourquoi pas ? Mais, à ce moment-là, pourquoi conserver les deux bouts ? Dans « observation », il y a quelque chose de plus que dans « interaction » – et quelque chose de plus qu'il est très difficile d'attribuer à un fullerène. Car, vraisemblablement, le fullerène n'a pas ce plus.

Jean Petitot. Il en va de même avec l'aiguille d'appareil macroscopique.

Roger Balian. Non, parce qu'on peut très bien programmer l'ordinateur qui va filtrer les résultats.

Michel Bitbol. Einstein n'aurait jamais dit qu'une horloge était un observateur. Il ne confondait pas l'observateur et l'horloge, qui est un instrument de mesure.

Carlo Rovelli. La question intéressante n'est pas celle de la définition des notions d'information, d'observation ou de mesure. On peut définir ces notions comme on veut. Les « observateurs » réels des laboratoires ont toutes sortes de propriétés, que nous pouvons ou pas inclure dans la définition d'« observateur ». La question intéressante est plutôt la suivante : vue que la mécanique quantique utilise la notion de observateur dans son formalisme, quelle est la notion minimale d'observateur nécessaire pour comprendre ce formalisme ? La question est de trouver les caractéristiques minimales d'un observateur pour que le formalisme de la mécanique quantique ait un sens.

Dans le cadre de la réalité restreinte, on parle souvent d'observateur, mais personne ne dirait que cet observateur doit être conscient. Dans ce contexte, « observateur » signifie référentiel – ce dernier pouvant alors être défini par n'importe quel objet inanimé. Nous disons que la vitesse d'un objet est définie seulement par rapport à un observateur, ce qui veut dire « par rapport à un autre objet ».

Je pense que la notion minimale d'observateur en mécanique quantique soit la suivante. Imaginons deux systèmes, S1 et S2, et deux variables des systèmes, A et B. Les deux systèmes, ensemble, peuvent être dans un état tel que si l'on fait une mesure de la variable A et de la variable B, on trouve toujours le même résultat (si 1 en A alors 1 en B ; si 2 en A alors 2 en B). On parle alors de « corrélation » entre les deux. Cela peut arriver par un état quantique ou par un état statistique classique, mais nous avons une idée très claire de ce qu'est une corrélation : une notion bien définie qui ne regarde que les propriétés *relatives* par rapport aux résultats des mesures sur deux systèmes. Shannon a introduit la possibilité de quantifier ces corrélations. Dans le sens (précis) de Shannon, nous pouvons dire que dans cette situation « le système A a de l'information sur le système B ». C'est importante d'insister sur le fait que cette notion d'information est parfaitement bien définie pour n'importe quels systèmes physiques ayant des variables capable de prendre des valeurs. Elle ne demande ni capacité de « stocker » l'information, ni de conscience. Elle peut être définie de façon opérationnelle : A a information sur B si une mesure de la variable A donne des résultats corrélés aux résultats de la mesure de B.

Or, on sait que chaque fois qu'une mesure quantique est faite, le système mesuré et le système mesurant se mettent dans un état où il y a une corrélation (je ne considère pas le cas dans lequel le système mesuré est détruit). Dans ce sens-là, très précis, les deux systèmes ont une information l'un par rapport à l'autre, quantifiable au sens de Shannon, avec une corrélation. Il me semble donc que la question est la suivante : pour comprendre l'utilisation de la notion de « observateur » en mécanique quantique, cette notion d'information est-elle suffisante ou non ? Suffit-il de dire qu'un « observateur » est un système physique qui acquies de l'information (au sens de Shannon) sur un autre ? Le cœur de la mécanique quantique relationnelle est l'hypothèse que cette notion d'« observateur » est suffisante pour parler d'observation quantique.

Hervé Zwirn. Je suis pleinement d'accord jusque-là. Mais la question qu'on se pose quand on veut comprendre la mécanique quantique (et c'est la différence, sans doute, avec la

relativité dans laquelle considérer qu'un objet inanimé peut être un observateur - entendu au sens de référentiel - ne pose aucun problème conceptuel) est la suivante. Si on dit qu'une mesure n'est qu'une corrélation, cela ne pose aucun problème en mécanique classique. Mais le formalisme quantique dit qu'il n'est pas possible de penser cela. La corrélation qui se produit lors d'une interaction résulte en une intrication donc la plupart du temps en une superposition. Or lors d'une mesure (au sens habituel du terme en mécanique quantique), une des valeurs possibles de la superposition devient déterminée. C'est cela, la question de fond. C'est l'un des mystères du problème de la mesure. C'est d'ailleurs ce qui a fait couler autant d'encre et donné lieu à autant d'articles et autant de propositions de solutions. Cette question ne se pose pas en mécanique classique parce que les corrélations statistiques classiques ne posent pas de problème d'indétermination. Et ce problème d'indétermination ne peut évidemment pas se poser pour un fullerène. Le fullerène s'intrique avec le photon et ils sont tous les deux dans un état certes corrélé, mais indéterminé. Alors qu'un observateur n'est pas indéterminé. On n'a pas l'impression d'être indéterminé quand on fait une mesure. C'est toute l'explication de cela qui pose problème.

Alexei Grinbaum. Le fullerène, s'il pouvait avoir une impression quelconque, aurait peut-être, comme l'homme, l'impression de ne pas être superposé. Nous n'en savons rien. Je vois deux éléments, dans le problème de la mesure. Le premier élément est le suivant. Pour un observateur et un système observé donnés, est-ce que l'observateur a l'impression ou non d'être en superposition ? Second élément, pour la classe d'observateurs donnée que nous sommes (des hommes, des fullerènes, etc.), comment se fait-il que nous sommes d'accord lorsque nous faisons différentes mesures et observations ? Ma réponse à la première question consiste à avancer que l'observateur corrélé avec le système produit une suite de 0/1 qui identifient ce système et peut-être même son état. Nous avons la chance de pouvoir dire « j'ai l'impression de ne pas être en superposition » parce que nous savons que nous savons, c'est-à-dire nous possédons cette suite de symboles (encodés dans un langage autre que 0 et 1. Mais il se peut que le fullerène soit dans la même situation !. Nous ne savons rien de la capacité auto-référentielle du fullerène, mais il n'y a aucune raison de penser que nous sommes exceptionnels.

Hervé Zwirn. Je ne suis pas d'accord avec l'idée selon laquelle un fullerène a peut-être une impression. Un fullerène n'a pas d'impression. Je ne peux pas aller jusqu'à accepter de dire que le fullerène a une impression quelconque. Ce n'est pas possible.

Alexei Grinbaum. Je réduis l'impression à un constat, formulé dans un langage. Si c'est un langage humain il contient des éléments auto-référentiels, donc l'homme peut savoir, et dire qu'il n'est pas en superposition. Mais que savons-nous a priori des contraintes sur le langage ? Comme le rappelait Carlo, la question est de savoir quel est le minimum nécessaire pour considérer qu'il y a une observation. Et la réponse est la corrélation des degrés de liberté, pertinent ou pas, 0 ou 1.

Hervé Zwirn. Je ne suis pas d'accord. . Cela revient à dire que toute interaction est une mesure, ce qui n'est évidemment pas souhaitable.

Alexei Grinbaum. J'en viens à la deuxième question, pour finir : pourquoi avons-tous l'impression d'être d'accord lorsque nous faisons des expériences en physique ? Car personne ne prend un électron pour un éléphant. Nos identifications des degrés de liberté pertinents pour tel ou tel système coïncident. Je crois pouvoir donner un critère qui montre

comment, pour une classe d'observateurs dont les complexités obéissent à telles conditions, cette intersubjectivité est possible, c'est-à-dire pourquoi des observateurs pas très différents peuvent identifier les systèmes de la même façon.

Roger Balian. Il est vrai que dans le cadre de la mécanique quantique, on peut arriver à corrélér des objets de façon totale – ce qui ne signifie pas du tout que c'est une mesure. En effet, la corrélation n'est pas une propriété d'un objet particulier qui est en train d'être regardé, mais bien une propriété statistique de toutes les expériences qu'on pourra faire en partant d'un état initial de l'objet et de l'appareil – et, à la fin, on aboutit à un résultat corrélé. Cela ne suffit pas. Un point complémentaire doit être ajouté : bien que ce soit une propriété statistique qui se rapporte à tout un ensemble d'un très grand nombre de runs de la mesure, chaque mesure individuelle est telle que l'objet est macroscopique avec une propriété particulière, qui est une propriété de mécanique statistique qui dit qu'il a une probabilité pratiquement égale à l'unité pour être soit vers le haut, soit vers le bas en perdant les cohérences et en étant à l'équilibre thermique dans un cas et dans l'autre. Il y a donc une propriété d'équilibre macroscopique. Nous avons un modèle qui a réussi à mesurer cette propriété-là, qui nous permet d'affirmer que chaque expérience particulière unique que l'on va faire aboutit à tel ou tel résultat. Ce qui fait que cette corrélation qui a été établie dit quelque chose sur l'objet.

C'est un élément supplémentaire qu'il faut ajouter à la corrélation. Il y a six mois, nous avons commis l'erreur d'oublier ce point majeur. On arrive à résoudre le cadre d'une solution de modèle de mécanique statistique pure, sans autre ingrédient.

Alexei Grinbaum. Je pense à un autre argument, Hervé. Imaginons un observateur. Appelons-le Dieu ou Martien ou quelqu'un venu de l'autre bout de l'Univers. Il ne parle pas la langue humaine et ne sait pas du tout interagir avec nous. Il se demande si l'homme a, ou pas, l'impression d'être en superposition – parce que lui aussi sait observer les photons et connaît la mécanique quantique. Comment pourra-t-il déduire si l'homme se sent en superposition ou non ? Il ne peut interagir avec nous d'aucune manière. Voilà ce qu'il va faire. Il va se dire que l'homme a sa mémoire, donc conserve de l'information. Puis il va étudier toutes les conséquences qui lui sont accessibles de l'extérieur de ce processus de stockage d'informations, afin de savoir si l'information a été effacée (c'est-à-dire si de la chaleur part vers l'extérieur). Seules les données objectives, qui ne sont donc pas liées à notre vision interne et auto-référentielle, lui sont accessibles. Il ne peut donc pas savoir, lui non plus, si nous avons des impressions ou non. Il peut uniquement regarder si de la chaleur émane. Il en est de même avec l'homme et le fullerène. La question de savoir si le fullerène a des impressions ou pas est indécidable de l'extérieur. Nous pouvons simplement regarder s'il y a des conséquences physiques du stockage d'informations sous forme de chaleur, rien d'autre.

Hervé Zwirn. Qu'est-ce que cela prouve, par rapport à notre discussion précédente ?

Alexei Grinbaum. C'est le dénominateur minimal nécessaire pour faire de la physique.

Hervé Zwirn. Nous posons une question précise. En quoi cela y répond-il ? En quoi le fait de dire que lorsqu'on fait cette expérience théorique (admettons qu'elle soit faisable et qu'il y ait, à un moment donné, de la chaleur) apporte-t-il une réponse quelconque à la question de savoir comment on résout le problème de la mesure, qui a été le problème de tous

les pères fondateurs de la mécanique quantique ? Et par quelle chaîne de raisonnement, si jamais cela apporte une conclusion ?

Alexei Grinbaum. La réponse est la suivante : le problème de la mesure n'existe pas. En effet, on a dit qu'un observateur n'est pas nécessairement un être humain et que n'importe quel système peut être observateur. La question de savoir pourquoi l'homme voit spin up ou spin down n'est pas une question physique. Les questions physiques doivent être posées sur le plan de ce qu'observe un observateur, qui n'est pas humain mais informationnel.

Hervé Zwirn. C'est un peu facile de décréter que le problème de la mesure n'existe pas. Cette question a quand même fait couler des milliers de litres d'encre. Par ailleurs, je ne vois pas de preuve de quoi que ce soit à propos du fait qu'un observateur n'est pas nécessairement humain.

Alexei Grinbaum. C'est comme la question de l'éther.

Hervé Zwirn. Vous pensez donc que le problème de la mesure, c'est comme la question de l'éther ? Nous ne serons pas en accord là-dessus ! Si ce que vous défendez consiste à dire que le problème de la mesure, c'est comme la question de l'éther, nous sommes en désaccord profond, car je récusé cette analogie. L'éther, on a pu s'en débarrasser d'une manière convaincante. Quand Einstein a construit la relativité restreinte, il n'a plus eu besoin de l'éther parce qu'il a apporté une autre réponse convaincante et cohérente à certaines questions qui nécessitaient auparavant l'hypothèse de l'éther. Là, c'est un peu différent, si je comprends bien, ou alors quelque chose m'a échappé : vous n'apportez pas une réponse autre et cohérente au problème de la mesure, mais vous affirmez sans argument à l'appui que ce n'est pas un problème. Cette démarche me gêne.

Alexei Grinbaum. Il s'agit de faire exactement la même chose, en chassant de la physique une notion qui n'a rien à voir avec la physique et en proposant une approche différente. Il n'y a pas d'objectivité absolue de la mesure. Il n'est pas vrai que le spin est up pour tous les observateurs.

Section V. Commentaire de Bernard d'Espagnat et discussion

Bernard d'Espagnat. Je souhaite émettre deux remarques qui, me semble-t-il, affectent directement la théorie de la *mécanique quantique relationnelle*.

La première porte sur la thèse de Carlo selon laquelle n'importe quel système, conscient ou pas, peut jouer le rôle imparti, en mécanique quantique, à l'observateur. Selon Carlo ce point de vue serait conciliable avec l'idée que toutes les prévisions observables de la mécanique quantique sont correctes pourvu seulement que l'on renonce à la notion d'état quantique d'un système et que le formalisme quantique ne soit considéré que comme un simple outil permettant lesdites prévisions. Pour la raison que je vais dire je trouve assez délicat de concilier ce point de vue avec un des éléments essentiels de ce qui fait la validité de la science, à savoir la liberté que nous avons de programmer nos expériences à notre guise.

Je m'explique. Considérons l'expérience de pensée proposée jadis par Wigner et connue sous le nom de *recombinaison des faisceaux*. Un faisceau d'atomes d'argent se propageant selon Oy et de spin dirigé selon +Ox traverse un Stern-Gerlach orienté selon

+Oz., qui le fait se séparer en deux faisceaux lesquels sont, plus loin et au moyen de dispositifs appropriés (y compris un second Stern-Gerlach orienté selon -Oz), spatialement recomposés en un seul faisceau, prolongeant le faisceau original. Si - suivant la convention simplificatrice utilisée par Bohm dans son analyse de l'expérience Stern-Gerlach (voir son livre de 1951) - on identifie la composante S_z du spin de l'atome à l'observable mesurée et la coordonnée z de ce dernier à la 'position du pointeur, cela conduit à identifier, un peu bizarrement il est vrai, le spin de l'atome au système que dans son article de 1998 Carlo appelle S, l'atome lui-même à l'observateur qu'il appelle O, et l'expérimentateur qui a préparé l'expérience à la personne qu'il appelle P. On constate alors que pendant la période durant laquelle les deux faisceaux sont séparés S a, relativement à O, une composante S_z bien déterminée, à savoir +, et qu'il la conserve dans l'état final (si O « mesure » alors S_z plusieurs fois de suite il trouve toujours +). Alors que dans ce même état final S a, relativement à P, un S_x bien déterminé (égal au S_x initial ; si, après traversée du second Stern Gerlach, P mesure S_x plusieurs fois de suite il trouve toujours +). Certes cette différence est précisément ce à quoi il fallait s'attendre dans la théorie de Carlo. Mais c'est ici qu'intervient la notion de liberté. Car rien n'empêche un nombre arbitraire de gens de prendre connaissance de l'expérience faite par P et de la reproduire ; et, s'ils le font, ils obtiendront tous le même résultat que P. Alors que dans les circonstances considérées rien de tel n'est possible relativement à O. Ce qui fait que finalement la « vérité » propre à O, même si, avec Carlo, on pose qu'elle existe, nous importe infiniment peu.

En identifiant S au spin de l'atome et O à l'atome lui-même j'ai il est vrai, dans la ligne de Bohm, conceptuellement séparé ce qui est physiquement inséparable. Et c'est aussi à ce prix seulement que je peux prétendre avoir respecté la règle de Carlo selon laquelle les systèmes ne possèdent pas, par eux-mêmes, des propriétés. A qui croit en l'existence « en soi » des systèmes ce prix paraîtra peut-être trop élevé mais il convient de remarquer que l'inséparabilité en question ne ressort pas clairement du formalisme⁶.

Carlo Rovelli. Je trouve l'exemple très beau. J'aurais du y penser moi-même. D'abord, dans le contexte de l'interprétation relationnelle, l'identification des systèmes S, O et P avec, respectivement, le spin, l'atome (en particulier, sa position) et l'expérimentateur, est parfaitement légitime. Plus que ça : c'est un beau cas exemplaire. En deuxième lieu, le fait que l'atome (sa position) « a mesuré » le spin, durant le temps qui passe entre la séparation et la recombinaison du faisceau, est parfaitement correct, dans ce cadre. Rappelez vous que dans le contexte relationnel cette affirmation signifie que, si nous mesurons la position de l'atome et aussi le spin, nous trouvons une corrélation. Ce qui est certainement le cas dans cet exemple : si nous mesurons la position de l'atome et le spin entre séparation et recombinaison, nous les trouvons bien corrélés : selon la définition de Shannon, nous pouvons donc affirmer que « la position de l'atome a information sur le spin ». Quel bel exemple du fonctionnement de l'interprétation relationnelle ! La où je pense il y a le problème, c'est au moment où vous dites « et qu'il la conserve dans l'état final ». Vous avez implicitement fait l'assomption qu'une information relative se conserve pour l'éternité. Rien dans le contexte relationnel permet de dire ça. Après la recombinaison la position de l'atome perd l'information qu'elle a eu sur le spin durant une brève période. L'information peut être

⁶ *Note ajoutée* - De façon générale un résultat de mesure ne peut être considéré comme scientifiquement acquis que lorsqu'il est *public*, et plus précisément reproductible, au moins 'en droit' par des tiers. Et c'est ce trait qui me paraît manquer aux observations faites, tant par le système que Carlo appelle O que par le fulerène de Grinbaum. (Cf B.d'Espagnat, *A tentative new approach to the Schrödinger cat problem*, arXiv; quant-ph/0301160v1).

perdue, comme nous le savons tous très bien quand nous ne retrouvons plus nos lunettes.

Vous remarquez qu'un résultat de mesure ne peut être considéré comme scientifiquement acquis que lorsqu'il est public, et plus précisément reproductible, au moins 'en droit' par des tiers. La notion de « public » identifie un ensemble d'observateurs comme un grand observateur privilégié. Cette démarche n'est pas de tout incompatible avec l'interprétation relationnelle. Il me semble que cette démarche nous laisse d'ailleurs quelque chose d'incompris : dans quel sens cette « observateur communautaire », ou mieux ces « observateurs conviviaux », sont-ils différents du reste de l'univers, qui est quantique et peut exister dans des états quantique superposés ? La réponse relationnelle est simple : cet « observateur communautaire » est lui aussi quantique et, en principe, pourrait être perçu par un autre observateur extérieur comme partie d'une corrélation quantique. L'ensemble des informations que nous avons pourrait être, en principe et sur une autre échelle, comme l'information que la position de l'atome a sur le spin. Il n'y a pas de contradiction à penser que tous les systèmes sont quantiques.

Bernard d'Espagnat Ma seconde remarque concerne cet 'affaiblissement du réalisme' que lors de notre dernière séance, Carlo a reconnu être un trait de sa théorie. Mon problème est : cet affaiblissement est-il suffisant ? J'estime quant à moi que ce n'est pas le cas. Qu'il ne suffit pas de rendre relatives les *propriétés* des systèmes. Qu'en conservant la notion d'existence « en soi » des systèmes eux-mêmes, sa théorie ne va pas assez loin. Que la physique quantique nous oblige à lâcher cette notion aussi. La dernière fois j'ai déjà mentionné le principal argument qui me pousse à penser ainsi, mais je voudrais y revenir. Il est fondé sur la physique des hautes énergies et, plus précisément, sur les expériences de création et d'annihilation qui montrent clairement qu'aucun système, et non pas même les particules dites bien à tort « élémentaires », n'est un « en soi ». Et que, par conséquent, dans notre tentative de compréhension de l'expérience humaine la mécanique quantique ordinaire n'est qu'une étape, qu'il est impératif de dépasser pour aller jusqu'à la théorie quantique des champs, dans laquelle le « nombre de particules » n'est plus un « nombre c », mais bien un « nombre q » — autrement dit une observable, tout à fait au même titre que ces propriétés que Carlo veut rendre relatives. Et que par conséquent les 'systèmes' étant composés de particules, doivent être relatifs comme elles.

Je pense que cette information que nous donne là la physique expérimentale est philosophiquement très importante. Qu'elle « interpelle Carlo », bien sûr, mais qu'elle va en fait bien au-delà. Car elle nous dit que l'existence des particules, donc des objets, est relative elle aussi, mais alors relative à quoi ? Je suis de ceux qui considèrent que c'est là le moment de faire intervenir l'argument bien connu qu'étant donnée notre appartenance au monde, il serait prétentieux de notre part de prétendre acquérir de celui-ci la vue correcte, non déformée, que seul pourrait avoir, à supposer qu'il existe, un être qui lui serait extérieur et, en quelque sorte, le surplomberait. Il est donc vain de chercher à connaître, par l'expérience et le raisonnement, le réel tel qu'il est « en soi ». Ce que nous élaborons, nous scientifiques, et cela est loin d'être vain, n'est qu'un compte rendu synthétique de notre expérience collective. Sauf à admettre le solipsisme (éventuellement « convivial » !) il faut considérer qu'en tant que « fait de conscience » cette expérience collective existe (n'est pas illusoire) et est unique (la même pour tous). C'est elle que nous voudrions, à tort, identifier à une réalité « en soi », extérieure à nous, alors que, je le répète, elle est relative à nous, à une sorte de conscience collective parfois appelée « sujet épistémique » par les philosophes, et que par conséquent l'on ne peut l'appeler que « réalité empirique ». Et comme ce sujet épistémique est évidemment « plus réel » que les images qu'il se forme, provisoirement c'est lui qui joue pour moi ce rôle d'« en soi » que Carlo croit pouvoir conserver aux « systèmes ».

J'ai dit « provisoirement ». Je m'en expliquerai quand j'aurai plus de temps (comme je l'ai déjà fait dans mes écrits), car ici, nous discutons des idées de Carlo et cela serait hors sujet.

Carlo Rovelli. Je suis d'accord que dans le cadre de théorie quantique des champs, qui est évidemment plus proche de la Nature que la mécanique quantique non relativiste, nous ne pouvons pas identifier un système avec une particule ou un ensemble des particules. Nous pouvons quand même identifier un système avec une région de l'espace-temps. La région a des variables, capturées par l'algèbre locale correspondante, qui peuvent être corrélées avec celles d'autres régions. Un détecteur de particules au CERN est une machine qui corrèle des bits électroniques d'un support magnétique avec des variables de champs dans la région autour du point où il y a l'impact des faisceaux.

D'autre part, nous le savions déjà : un être humain n'est pas un ensemble de particules : les atomes desquels il est formé changent dans le temps. Récemment nous avons découvert qu'il en va de même pour une galaxie : une grande quantité de matière entre et sort de la galaxie à tout moment. Une galaxie, comme un être humain, comme une onde de la mer, n'est pas un ensemble de particules : tous sont des phénomènes similaires aux nuages sur les sommets des montagnes : l'air continue de passer et la vapeur se condense en nuage pour un bref moment quand elle s'élève pour passer la montagne. Le nuage est le même, mais ses constituants élémentaires changent à tout moment. Rien de tout cela n'enlève de valeur et d'utilité aux notions de « nuage », « être humain » ou « galaxie ». Nous pouvons continuer à considérer ces entités éphémères comme des « systèmes », parce qu'elles sont bien décrites par des variables. Toute la réalité est éphémère dans ce sens.

Cela dit, je partage le sentiment, exprimé aussi par les critiques exprimés souvent par Michel Bitbol, que la notion de système est faible. Quand je pense à un « système » je ne pense pas à un objet *concret* qui fonde la réalité : je ne pense pas aux atomes de Démocrite. Je pense à une idéalisation subjective qui me permet de mieux appréhender et conceptualiser une pièce de la réalité avec laquelle je me trouve en relation.

Le problème devient encore plus difficile en gravité quantique, où les régions de l'espace-temps elles-mêmes sont dynamiques. Il existe là *deux* aspects relationnels, que je pense être liés : en mécanique quantique, la réalité d'un objet se réalise en référence à un autre. Au cœur de la relativité générale, la localisation d'un objet se fait seulement en référence à un autre objet ou un autre champ, comme le champ gravitationnel.

Bernard d'Espagnat. C'est déjà le cas en mécanique galiléenne.

Carlo Rovelli. En effet. Mais cela devient beaucoup plus fort en relativité générale. A cause de l'absence d'une structure fixe non-dynamique de l'espace temps par rapport à laquelle certains aspects du mouvement restaient quand même absolus. Je me suis souvent demandé s'il existait un lien entre les deux relations qui sont au cœur de la physique : la relation observateur-observé qui est à la base de la mécanique quantique et la relation entre objets qui définit la localisation. Finalement toute interaction demande un voisinage dans l'espace. Et, à l'inverse, que veut dire voisinage dans l'espace sinon le fait d'être en relation, de se toucher ? Est-ce que la relation d'être en contact, qui est celle qui fonde l'espace depuis Descartes et plus encore avec Einstein, a à voir avec la relation d'interaction qui, je pense, est à la base de la mécanique quantique ? J'y vois un grand problème ouvert. Mais en raison de mon train, pour lequel je suis déjà en retard, je ne puis pas développer plus avant !

Jean Petitot. Je vous invite à relire Leibniz. La réalité ne peut pas être spatio-temporelle.

Bernard d'Espagnat. La réalité est vachement voilée ! Nous avons convenu, Roger Balian et moi, que nous consacrerions une séance aux questions d'interprétation le 14 mai prochain. Je vous enverrai par mail un petit texte de Roger Balian.

Roger Balian. Je vous enverrai notre dernier papier de 180 pages, même si je parlerai plus particulièrement des sections X et XI.