

Collège de physique et de philosophie Séance du 16 janvier 2012

Bernard d’Espagnat. La plupart d’entre nous ont, bien entendu, entendu parler de la nouvelle et audacieuse interprétation de la mécanique quantique que Carlo Rovelli, ici présent, a proposée et qui s’appelle la *Relational Quantum Mechanics*.

Après nous en avoir rappelé l’idée directrice, Matteo Smerlak nous exposera comment Carlo Rovelli et lui proposent d’appliquer cette interprétation de la mécanique quantique à la résolution du paradoxe EPR tel qu’il se présente aujourd’hui. Grâce aux travaux de John Bell, d’Alain Aspect et d’autres, nous savons maintenant qu’il nous faut renoncer soit au réalisme, soit à la localité. La plupart des physiciens préfèrent renoncer à la localité. Mais il y a des exceptions. L’approche de Rovelli et Smerlak en est une, puisque, comme Matteo nous le montrera, elle préserve la localité au prix d’un sérieux affaiblissement du réalisme.

Matteo Smerlak, vous avez la parole.

Matteo Smerlak. Je vous remercie, Monsieur d’Espagnat, de me donner la chance de parler devant cet auditoire d’idées qui ne sont fondamentalement pas les miennes, mais celle de Carlo Rovelli, qui est assis en face de moi. Que ce soit clair, j’ai eu la chance de collaborer avec lui sur l’un de ses projets, mais le fond de l’interprétation relationnelle est proposé par lui, dans un article de 1996 intitulé « *Relational Quantum Mechanics* ». J’en ai imprimé quelques exemplaires. Quoi qu’il en soit, cet article est très aisément accessible sur Internet.

Section I – Exposé par Matteo Smerlak

L’interprétation relationnelle affirme que l’objet de la mécanique quantique n’est pas l’état intrinsèque des systèmes physiques, tel qu’on le dit très souvent implicitement ou explicitement dans les cours de mécanique quantique, mais leurs relations. Et en cela, elle prétend prolonger et approfondir la notion de relativité einsteinienne et, par là, dissoudre certains des paradoxes tenaces de la mécanique quantique, comme par exemple le problème de la mesure (c’est pour cela que Carlo Rovelli a présenté cette interprétation), mais aussi le paradoxe EPR (dont je parlerai également dans cet exposé).

1. *L'interprétation relationnelle*

L'observateur observé

Commençons par décrire l'interprétation relationnelle elle-même. Pour cela, considérons la situation suivante : un système quantique S (représenté ci-dessous par le diagramme de Feynman) et deux observateurs, O et P , qui observent simultanément S . Je précise tout de suite que, malgré ce dessin, ces observateurs doivent être conçus comme des appareils de mesure, c'est-à-dire des observateurs au sens de la mécanique quantique, et pas nécessairement comme des esprits conscients.

O et P sont
mesure capables de se
liberté du système S
d'une certaine



deux appareils de
coupler aux degrés de
pour faire la mesure
observable.

On imagine qu'au départ, l'état ϕ du système S tel que la mécanique quantique le prescrit est une superposition de deux états particuliers, 0 et 1 , correspondant à deux valeurs propres d'une observable que je ne précise pas, avec des coefficients normalisés, α et β .

La mesure quantique : une contradiction ?

Considérons, dans un premier temps, la mesure du système S telle que décrite par O . On peut trouver ce type de description dans les ouvrages originaux de Von Neumann et Wigner.

Du point de vue de O , la mesure induit une transformation de l'état du système, qu'on appelle un collapse ou une projection, qui amène l'état initial vers une des deux valeurs, 0 ou 1 ,

avec les probabilités respectives $\langle \langle \rho^2 \rangle \rangle$ ou $\langle \langle \rho^2 \rangle \rangle$. Dans les deux cas, après la mesure, l'observable a pris une valeur définie : soit 0, soit 1. Il n'y a pas de doute sur ce point-là.

Considérons maintenant le point de vue de P, le deuxième observateur, qui n'interagit pas avec S mais observe la mesure de S par O (autrement dit, le couplage de S et O). Du point de vue de P, l'état initial du système est un état factorisé entre ϕ pour le système S et un état initial pour O. Au terme de la mesure, les degrés de liberté de O se sont corrélés avec ceux de S et le système aboutit en une superposition entre deux états couplés pour S et O, sans projection. Il y a là une évolution unitaire du système depuis son état initial vers son état final. Le point important de cette observation est que, du point de vue de P, la valeur de l'observable sur S n'est pas déterminée. Elle reste indéterminée.

Il y a là une contradiction apparente. Du point de vue de O, l'observable a pris une valeur définie. Du point de vue de P, ce n'est pas le cas. C'est le problème de la mesure en mécanique quantique.

Deux postulats fondamentaux

Les commentateurs de ce problème évoquent une incomplétude (Einstein), une forme de contextualité (Bohr) ou encore l'existence d'une coupure entre un système quantique et un observateur classique (Heisenberg). Tels sont les commentaires classiques sur le problème de la mesure.

Rovelli postule, à l'inverse, que

- d'une part (*hypothèse 1*), la mécanique quantique fournit une description complète du monde physique, adaptée au niveau présent des observations expérimentales ;
- d'autre part (*hypothèse 2*), tous les systèmes de la nature sont équivalents. Il n'y a pas de différence fondamentale entre les systèmes quantiques et les systèmes classiques. Notamment, les systèmes macroscopiques sont des systèmes quantiques d'un genre particulier.

Il affirme en outre vouloir déduire l'interprétation de la mécanique quantique de son formalisme et non vouloir y apposer des préjugés métaphysiques qui pourraient conduire à une reformulation du formalisme de la mécanique quantique. De ce point de vue-là, l'attitude d'Einstein (qui souhaitait une description réaliste du monde) s'apparente à un préjugé métaphysique. Rovelli prétend se débarrasser de ce type de préjugé pour prendre au sérieux le formalisme de la mécanique quantique.

Étant donné ces deux postulats, il faut bien accepter que les points de vue de O et P sont également valables. En effet, O et P étant des systèmes quantiques, il n'y a pas de raison de privilégier le point de vue de l'un ou de l'autre.

Cela nous amène à la conclusion que la valeur et même l'actualité d'une observable de S sont relatives à un système avec lequel S interagit. En effet, j'ai rappelé que pour O, la valeur de l'observable de S est actuelle après la mesure, alors qu'elle ne l'est pas pour P. Cela signifie que les états quantiques sont relatifs au système qui les mesure. Il faut donc parler de l'état quantique du système S relativement à O. Autrement dit, il faut indexer les états quantiques non pas seulement par le système qu'ils visent, mais également par l'observateur qui les observe.

Retour sur le problème de la mesure

Revenons, de ce point de vue, sur le problème de l'observateur observé et décrivons-le à nouveau.

Du point de vue de O qui interagit avec S , l'état de S passe, après un collapse, de la superposition ϕ à l'une des deux possibilités, mettons 0 , qui est l'état final du système de S par rapport à O . Du point de P – et j'observe que P n'interagit pas avec S –, l'état factorisé entre l'état de S et l'état initial évolue vers la fameuse superposition dont on parlait tout à l'heure. Le point important est que 0 d'un côté et la superposition de l'autre ne correspondent pas aux mêmes états quantiques parce qu'ils ne sont pas indexés par le même observateur. Dans un premier cas, il s'agit de l'état de S relativement à O . Dans un deuxième cas, il s'agit de l'état de S et O relativement à P . Des observateurs différents, des systèmes différents : il n'y a donc pas de contradiction dans le fait que les états soient différents.

Notons que la violation de l'unitarité du point de vue de O résulte d'une description incomplète du système de mesure. En effet, S se corrèle avec quelque chose qui échappe à O : O lui-même. C'est pour cela que j'ai souligné que, du point de vue de O et du point de vue de P , il y a une asymétrie : O se couple avec S , tandis que P ne se couple pas avec S . Il y a une interaction physique entre O et S , mais il n'y a pas d'interaction physique, dans ce problème, entre P , S et O .

Cela pourrait potentiellement expliquer la différence de comportement entre l'évolution unitaire dans le second cas, non unitaire dans le premier.

Un leitmotiv historique

Rovelli propose d'éclaircir l'interprétation de la mécanique quantique, comme on l'a vu, non pas en introduisant de nouveaux concepts, mais en abonnant un ancien concept : en l'occurrence, celui d'état intrinsèque d'un système. Pour lui, c'est l'hypothèse de trop.

Cela rappelle l'élucidation de la cinématique relativiste par Einstein, qui a dérivé les transformations de Lorentz non pas en postulant de nouveaux principes microscopiques, mais en abandonnant purement et simplement l'idée de temps absolu. C'est cette analogie que Rovelli veut pousser avec son interprétation de la mécanique quantique.

Au plan historique, il semble en effet que la physique progresse vers toujours plus de relativité. Il ne serait donc pas fondamentalement surprenant de découvrir qu'en mécanique quantique également une nouvelle étape de la relativisation est à l'œuvre.

Relations et informations

Cette perspective relationnelle est naturellement compatible avec la notion d'information, dont on sait qu'elle s'installe aujourd'hui dans tous les domaines de la physique. En effet, l'information quantifie l'amplitude des (cor)relations entre deux systèmes ou entre deux variables. Si deux systèmes, S_1 et S_2 , sont très corrélés, on dira que S_1 contient beaucoup d'informations sur S_2 et réciproquement. Formellement, l'information contenue par un objet O sur un autre objet S est le nombre de questions binaires sur S dont on peut prédire la réponse en mesurant O .

Je reviendrai sur l'utilisation que fait Rovelli du concept d'information dans cette interprétation relationnelle.

Pistes pour une reconstruction

Pour aller plus loin encore dans l'élucidation du formalisme de la mécanique quantique, de nombreux auteurs ont proposé de se lancer dans un programme de reconstruction du formalisme de la mécanique quantique, c'est-à-dire l'espace de Hilbert, l'algèbre des observables ou l'évolution unitaire à partir de postulats physiques clairs. On peut citer, parmi les premières tentatives, von Neumann lui-même, puis Birkhoff et Mackey, qui se sont lancés dans le programme de la logique quantique avec précisément cet objectif de reconstruire l'espace de

Hilbert à partir de principes physiques. Il y a d'autres approches, plus récentes – dont Rovelli fait partie. Je cite, à ce propos, la revue d'Alexei Grinbaum, sur le sujet de la reconstruction de la mécanique quantique et sa contribution à la reconstruction par Rovelli. [Brit. J. Phil. Sci. 58, 387-408 (2007)]

Les postulats informationnels de Rovelli

Quels sont ces postulats physiques clairs dont Rovelli prétend qu'ils peuvent nous permettre, à terme, de reconstruire entièrement le formalisme de la mécanique quantique ? A ce stade, je dirais qu'ils sont au nombre de deux, même si trois postulats sont proposés dans l'article original – le troisième me semble plus conditionnel et il reste encore, je pense, à le formaliser.

Le premier postulat informationnel de Rovelli est qu'il existe une borne supérieure à la quantité d'information qu'on peut extraire d'un système.

Le deuxième postulat est qu'il est toujours possible d'acquérir de l'information nouvelle sur un système.

On est là face à une contradiction apparente : le premier postulat nous indique qu'il existe une information limitée et le deuxième postulat, une information illimitée. En vérité, ces deux postulats ne sont pas incompatibles ou incohérents, simplement parce qu'en mécanique quantique il existe des observables incompatibles et on peut obtenir une nouvelle information sur un système en mesurant une nouvelle observable qui ne commutait pas avec l'ancienne. De cette façon, on obtient une nouvelle information. Seulement, le prix à payer est qu'on dégrade l'information précédente.

Donc ces deux postulats qui semblent contradictoires sont peut-être, en vérité, une graine à partir de laquelle on peut faire repousser le formalisme de la mécanique quantique, avec ces observables incompatibles, et en particulier ce mécanisme de dégradation de l'information qui est propre à la mécanique quantique et qui est la source de son indéterminisme.

Vous verrez dans l'article original qu'il est possible de dériver certains aspects du formalisme à partir de ces principes. Pour autant, des progrès restent à accomplir. Je considère, quant à moi – et je crois qu'Alexei Grinbaum sera d'accord –, que la notion d'entropie jouera certainement un rôle dans ces programmes de reconstruction de la mécanique quantique.

Voilà pour l'interprétation relationnelle en général et le résumé que je pouvais en faire. J'en viens maintenant à l'argument EPR, qui cause tant de difficulté à la mécanique quantique, on le sait, et qui est à la fois si fertile – au plan théorique et au plan expérimental.

2. Retour sur l'argument EPR

L'interprétation relationnelle – c'est ce que je vais proposer – évacue le concept de non-localité quantique de cet argument EPR, selon une analyse qui a été présentée dans l'article [Rovelli, Smerlak, Relational EPR, Found. Phys. 37, 427-445 (2007)].

Je rappelle que des arguments similaires avaient été présentés auparavant par Michel Bitbol lui-même en 1983 [An analysis of the Einstein-Podolsky-Rosen correlations in terms of events, Phys. Lett. A 96 (2) 66-70], et par Laudisa en 2001 [The EPR Argument in a Relational Interpretation of Quantum Mechanics, Found. Phys. Lett. 14, 119-132].

L'argument EPR-Bohm

Je vous rappelle l'argument EPR dans la version simplifiée que Bohm a donnée. On considère une source qui produit deux particules quantiques, α et β , qui sont envoyées dans deux bras d'un interféromètre, deux bras d'une expérience, de sorte qu'elles rejoignent deux observateurs, A et B – que je peux aussi appeler Alice et Bob –, qui sont séparés par une distance spatiale telle qu'il n'y a pas de connexion possible directement entre A et B. Autrement dit, en termes de relativité restreinte, A et B sont dans deux régions séparées par un intervalle de genre espace.

On fait l'hypothèse que la source produit des particules α et β qui sont dans un état intriqué. On pourra, pour se fixer les idées, considérer une observable de spin et se dire que c'est un état singlet de spin,

J'ai écrit cet état de deux façons différentes, suivant une décomposition dans deux bases de

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\downarrow\rangle_\alpha |\uparrow\rangle_\beta - |\uparrow\rangle_\alpha |\downarrow\rangle_\beta \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\rightarrow\rangle_\alpha |\leftarrow\rangle_\beta - |\leftarrow\rangle_\alpha |\rightarrow\rangle_\beta \right)$$

l'espace de spin possibles : le spin suivant la direction verticale et le spin suivant une autre direction, que je considère horizontale. L'argument EPR est le suivant : la mesure d'une observable de spin dans une direction verticale y ou horizontale x actualiserait, à cause de cette intrication, une valeur définie au spin de β sans communication causale entre α et β . Si Alice mesure α et trouve une valeur pour le spin, immédiatement, selon le formalisme de la mécanique quantique, cela instancie une valeur donnée, définie par le spin de β tel qu'il serait mesuré par Bob.

Cela présente évidemment une difficulté pour la causalité relativiste, puisqu'on a rappelé qu'Alice et Bob, dans cette présentation, sont séparés par un intervalle de genre espace.

Une difficulté contrafactuelle : EPR et inégalités de Bell

Je répète cet argument : la possibilité contrafactuelle de mesurer sur α des observables incompatibles, associée à l'observation précédente, met en tension la mécanique quantique (telle que les prédictions sont formulées par le pas que j'ai écrit plus haut), le réalisme (pour une raison que je vais clarifier bientôt) et la localité (Alice et Bob sont dans des distances de genre espace, sans possibilité de communiquer). C'est comme si de l'information était communiquée sans être transférée causalement.

Comme Monsieur d'Espagnat l'a rappelé, cette tension peut être quantifiée au moyen des inégalités de Bell. Cela a représenté un progrès considérable concernant cet argument. Il se trouve que ces inégalités peuvent être testées expérimentalement et qu'elles sont violées, ce qui donc tranche en faveur de la mécanique quantique contre le complexe « réalisme et localité ». Dans ce problème à trois corps entre mécanique quantique, réalisme et localité, il semble que c'est la mécanique quantique qu'il faille préserver et, partant, le complexe de réalisme local qui doit être amendé.

La confusion règne...

Quant à l'interprétation plus approfondie de ces résultats, il semble qu'elle génère une certaine confusion. Dans la littérature on trouve que, en effet, la majorité des physiciens acceptent l'image d'une « étrange non-localité » quantique – je reprends les mots d'Isham –, étrange parce que sans mettre directement en péril la causalité relativiste (je pense ici au théorème selon lequel il n'y a pas de signal possible en mécanique quantique), cette non-localité, malgré tout, on peut le dire, sape le fondement de notre compréhension de l'espace et du temps dont la causalité relativiste est l'articulation fondamentale.

D'autres auteurs parlent de « non-séparabilité », comme Alain Aspect ou Monsieur d'Espagnat dans un de ses ouvrages célèbres : « If the notion of reality independent to man, but accessible to its knowledge is to have any meaning at all, then such reality is necessarily non-separable » — j'ai pris cette citation en anglais car c'était la version anglaise de votre ouvrage que j'avais à disposition. Cette citation de Monsieur 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 ? En tout cas, le moins qu'on puisse dire, c'est que le concept de non-séparabilité est peu satisfaisant.

Relecture critique de l'argument EPR

Je ne prétends pas faire une critique argumentée de ces arguments, mais simplement faire voir à l'audience qu'il règne une certaine confusion autour de ces concepts de non-localité et de non-séparabilité.

Revenons sur l'argument EPR, du point de vue de l'interprétation relationnelle. Je vous rappelle que pour l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique, dans le formalisme traditionnel il y a une hypothèse de trop : celui de l'état intrinsèque d'un système. Or l'argument EPR s'appuie fondamentalement sur cette hypothèse de trop.

En effet, quand Alice mesure le spin de α , la valeur qu'elle obtient s'actualise immédiatement pour Bob – cela, au regard de l'état du couple α et β sans qu'on précise, évidemment, par rapport à quel observateur cet état est défini. Si l'on posait la question suivante : « relativement à quel observateur cette actualisation non-locale devrait-elle s'effectuer ? », on se rend compte immédiatement que cet observateur devrait être lui-même non-local, puisqu'il serait corrélé simultanément avec Alice et Bob. On peut donc postuler que c'est l'existence de ce super-observateur, qui serait capable de connaître les résultats de mesure d'Alice et de Bob simultanément, qui viole la localité et non pas les probabilités quantiques elles-mêmes.

Selon l'interprétation relationnelle, en effet, il n'existe aucune corrélation entre le spin de α relativement à Alice et le spin de β relativement à Bob. Il s'agit, encore une fois, de deux états définis par rapport à deux opérateurs différents. Or il n'y a pas de sens, a priori, à comparer les valeurs de mesure obtenues par des observateurs différents, sauf à considérer un nouvel observateur. Mais, dans l'expérience EPR, ce nouvel opérateur devrait être non-local pour instancier ces corrélations – et donc, n'existe pas.

Reprenons...

Si l'on reprend l'argumentaire en introduisant très clairement les observateurs qui sont en jeu, on s'aperçoit que les mesures individuelles n'entrent décidément pas en violation avec la causalité.

La mesure de spin effectuée par Alice sur α dans la direction verticale donne une valeur que je note $\Sigma\alpha/A$. Mettons qu'Alice, ensuite, décide ensuite de mesurer le spin de β , à un moment ultérieur, et trouve une valeur, $\Sigma\beta/A$. Il se trouve, d'après la prédiction de la mécanique quantique, que la corrélation est telle que ces deux valeurs seront nécessairement opposées. Le spin de α par rapport à Alice sera opposé au spin de β par rapport à Alice. Mais le point important est que les événements associés à cette comparaison ne sont pas en violation avec la causalité relative : la mesure du spin de β par Alice s'effectuera nécessairement dans le futur de la mesure du spin de α par rapport à Alice.

Peut-on aller plus loin et tester la cohérence de ces différents comptes rendus relationnels de l'expérience EPR ? On peut, par exemple, se demander si les comptes rendus d'Alice et de Bob sont compatibles. Imaginons, par exemple, qu'Alice veuille comparer le résultat de sa propre mesure avec celui de Bob. Alors Alice mesurera l'état du système $\langle\alpha$ et β et Bob \rangle et trouvera, selon le formalisme standard de la mécanique quantique, que la valeur de l'observable mesurée par Bob tel que vue par Alice est égale à la valeur du spin de β tel qu'observée par Alice. Il y a donc bien compatibilité entre ce qu'Alice a vu elle-même concernant le spin de β et ce qu'Alice voit de B concernant le spin de β . Autrement dit, Alice ne met jamais à jour de conflit entre sa propre description de l'état et la description que B en avait.

Si on introduit un troisième observateur, C, qui comparerait les valeurs obtenues par Alice et par Bob, alors C mesurerait un système qui serait α et β , les deux particules, et les deux opérateurs, Alice et Bob, écrirait cet état pour ce système composé et, selon cet état, déduirait immédiatement que la valeur du spin mesurée par Alice et la valeur du spin mesurée par Bob sont opposées. Là encore, pas de contradiction. Il n'y a pas, dans le cadre du formalisme quantique, de possibilité de faire entrer en contradiction les différentes observations relationnelles mises en jeu par les différents observateurs.

Autrement dit, le formalisme quantique, quoique fragmenté en description partielle relative à différents observateurs, est parfaitement cohérent. De ce point de vue-là, on voit que l'interprétation relationnelle libère l'argument EPR du problème de non-localité qui fait tant débat.

3. Quelques corrélats philosophiques

J'en viens à la troisième partie de mon exposé, dans laquelle je souhaite soulever certains des corrélats philosophiques qui sont mis en jeu par cette interprétation, sous la forme de trois questions. Je ne prétends pas y apporter de réponse univoque ; je m'en remets pour cela aux philosophes qui sont présents autour de cette table.

L'interprétation relationnelle est-elle solipsiste ?

Laissez-moi citer le commentaire d'un referee sur notre article commun avec Carlo Rovelli. « If the authors are actually comfortable advocating for ridiculous philosophical views like Berkelian Idealism or outright solipsism (in the name of making sense of Quantic Mechanics) let them say so openly and clearly. »

Face à une telle agressivité philosophique, il convient de se défendre et de répondre. Je répondrai, quant à moi, que je ne vois pas de solipsisme à dire que les propriétés physiques sont

parfois définies seulement relativement à des opérateurs. Est-ce être solipsiste que dire que la couleur des yeux d’Alice, par exemple, est donnée par la longueur d’onde 463 nanomètres ? Personne, je pense, ne prendrait cette accusation. Et pourtant, il s’agit également d’un énoncé relatif, en raison de l’effet Doppler. Je rappelle ainsi que si vous vous déplacez par rapport à Alice, si vous commencez à accélérer très vite dans la direction d’Alice, la couleur de ses yeux va changer. « Alice a les yeux bleus » est une proposition relationnelle typique de la physique relativiste. Il y a beaucoup d’énoncés relatifs, dans la physique contemporaine, et on ne parle pas pour autant de solipsisme, je crois.

L’interprétation relationnelle est-elle anti-réaliste ?

Il est indéniable, pourtant, que l’interprétation relationnelle dépouille l’objet de ses attributs substantiels : plus d’état intrinsèque, plus de propriété intrinsèque, rien qui s’apparenterait aux attributs du réalisme traditionnel. On peut donc se demander si l’interprétation relationnelle est une forme d’anti-réalisme. C’est une question que je crois légitime. Je ferai deux commentaires sur cette question.

Le premier, c’est que l’idée de l’interprétation relationnelle, à savoir la relativité des observables quantiques, n’est pas un engagement ontologique. Modifier ce que j’ai appelé l’objectivité (c’est-à-dire la nature de ce que c’est d’être un objet dans le cadre des théories physiques) n’équivaut pas à prendre position dans le débat réalisme/anti-réalisme. Les deux options métaphysiques sont compatibles avec l’interprétation relationnelle. Il s’agit simplement d’une mise à jour du concept d’objet. Ce type de mise à jour, on en a vu de nombreux exemples dans l’histoire de la physique, et aucune n’équivaut à proprement parler à des engagements ontologiques.

Le deuxième point, c’est que l’interprétation relationnelle est moniste (je vous rappelle que tous les systèmes quantiques sont prétendus équivalents dans l’interprétation relationnelle) et que par contraste, la question de l’externalité de la réalité, qui sous-tend la question du réalisme, est fondamentalement dualiste. En effet, choisir entre réalisme et anti-réalisme revient à poser une hiérarchie entre moi et le monde. Ces concepts n’ont pas cours dans l’interprétation relationnelle. Je voudrais souligner, par là, qu’introduire le débat réalisme/anti-réalisme dans l’interprétation relationnelle, c’est introduire des concepts qui n’y sont pas – précisément à cause de cette propriété de monisme.

L’interprétation relationnelle est-elle réaliste ?

On peut se demander, en effet, s’il y aurait sens à ontologiser les relations elles-mêmes, à dire que, finalement, le tissu métaphysique de la réalité, ce sont les relations et non les objets. Je considère, quant à moi, que la question est relativement pressante parce que Rovelli, d’entrée, défend que la mécanique quantique est complète. Or, si l’on doit se contenter de qualifier les relations qui existent entre système, c’est peut-être que, finalement, l’ontologie est faite de ces relations. La question est difficile. Là encore, je propose simplement deux commentaires, deux points d’entrée sur cette question de l’ontologie des relations.

D’une part, du fait même de la relativité qui intervient dans l’interprétation relationnelle de toute description, objets et relations sont tour à tour naturalisés et transcendants. Dans sa relation avec S, l’observateur est transcendantal : il permet la description de S. En revanche, du point de vue de P, O fait partie du monde des objets et il est décrit par le formalisme de la mécanique quantique. Ainsi, objets et relations ne sont pas définis en propre. C’est seulement selon la perspective qu’on prend qu’objets et relations apparaissent naturalisés ou transcendants.

D'autre part, je remarque que les objets de la mécanique quantique, s'ils doivent avoir un statut ontologique, sont « nus », puisqu'ils n'ont plus aucune propriété intrinsèque. Les valeurs d'observables possibles, à l'inverse c'est-à-dire les valeurs possibles du spin dans l'expérience EPR, par exemple, restent absolues. Dans la mécanique quantique relationnelle, on ne fait pas dépendre de l'observateur les valeurs possibles d'une mesure, seulement les valeurs actuelles au terme d'une telle mesure.

Il y a peut-être ici une difficulté philosophique à articuler les potentialités, qui semblent absolues, et des actualités qui ne sont que relatives.

Je conclus cette très superficielle discussion philosophique en rappelant que le réalisme des relations n'est pas une idée particulièrement révolutionnaire en philosophie. On la trouve chez de nombreux auteurs, d'Héraclite à Nietzsche, Bachelard et Simondon. En outre, c'est une idée qui partage de nombreux points communs avec le réalisme structurel, qui est beaucoup discuté aujourd'hui en philosophie. Ce n'est donc pas forcément une option métaphysique si radicale qu'elle peut sembler au prime abord.

Commentaires sur l'interprétation relationnelle

Davantage de commentaires, et de meilleurs commentaires que les miens, sur la philosophie de l'interprétation relationnelle peuvent être trouvés dans un article de van Fraassen [Rovelli's world, *Found. Phys.* 40 (4) 390-417 (2010)] et dans un des chapitres du dernier ouvrage de Michel Bitbol, qui s'intitule « L'avancée hésitante de la 'relativité immanente' dans les lectures contemporaines de la mécanique quantique. II-Les interprétations relationnelles » ; dans *De l'intérieur du monde* (Flammarion 2010), page 137. Je recommande ces deux textes pour aller plus loin dans la discussion philosophique de l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique.

Je termine mon exposé par deux images qui vont peut-être nous détendre, deux tableaux de Kandinsky.



Ce premier tableau de 1940 (*Bleu du ciel*) présente à la vue ce que je considère être la physique pré-relationnelle. On voit des objets flottants dans un bleu indistinct. Il n'y a pas de relations particulières entre eux. Ils sont là, en propre, en eux-mêmes, en soi.



Dans cette composition de 1939 (Bleu du ciel, composition X), au contraire, on voit que la couleur, la forme, la géométrie, tout est déterminé relationnellement. Aucun de ces objets n'a sens sans les autres. C'est une image que je garde en tête pour une métaphysique plus relationnelle.

C'est la fin de mon exposé. Je vous remercie de m'avoir écouté.

Section 2 – Discussion

Bernard d'Espagnat. Merci, Matteo, pour ce brillant exposé. Nous passons maintenant au débat.

Matteo Smerlak. Je vous rappelle à tous que Carlo Rovelli est ici et qu'il peut également répondre sur certains points.

Catherine Pepin. Je vais lancer naïvement la discussion. En fait, je n'ai pas du tout compris en quoi l'hypothèse de Carlo Rovelli donne une position qui conserve la localité. Je n'ai vraiment pas du tout compris en quoi cela peut résoudre ce paradoxe.

Roger Balian. J'ai une question tout à fait semblable. Alice mesure ce qui est près d'elle, donc elle mesure α , mais elle mesure aussi β .

Catherine Pepin. En fait, on ne voit pas ce qui a été ajouté.

Matteo Smerlak. Ce qui fait problème, dans l'argumentaire traditionnel, c'est le fait que la mesure d' α par Alice instancie une valeur définie pour β telle qu'elle sera observée par Bob. Autrement dit, c'est comme si les actions d'Alice venaient influencer le futur de Bob, alors qu'ils

sont séparés par un intervalle de type espace et qu'il n'y a pas de communication possible entre les deux observateurs.

Du point de vue relationnel, cet énoncé ne peut même pas être formulé, parce que dire qu'il y a une influence entre l'un et l'autre, c'est dire déjà qu'il y a des corrélations entre A et B. Et pour instancier ces corrélations, pour les rendre réelles, il faut dire par rapport à quel observateur elles seraient visibles.

La mesure que fait Alice sur α ne donne un résultat que pour Alice. Ce résultat n'a aucun rapport avec la mesure que fait Bob sur β . Une fois de plus, tout ce qui compte, ce sont les mesures relativement à un observateur donné. Il n'y a aucune raison de comparer ou mettre en correspondance la mesure d'Alice sur α et la mesure de Bob sur β . Si on veut comparer ces deux mesures, il faut introduire un observateur qui ferait les deux mesures successives. Cela peut être Alice elle-même. Imaginons, par exemple, qu' α et β soient ramenés au même point de l'espace au terme de l'expérience et qu'Alice vienne mesurer le spin de β , cette fois-ci. Elle va trouver une valeur opposée au spin d' α , aucun doute là-dessus. Seulement, cet observable sera le spin de β par rapport à Alice. Et cela n'aura rien à voir avec le spin de β par rapport à Bob. Les deux mesures qu'aura faites Alice seront parfaitement causales. Elles se produiront l'une après l'autre. On aura obtenu deux mesures corrélées, mais dans le futur l'une de l'autre. Il n'y a pas de difficulté, *a priori*. Ce qui est hors du cône de lumière d'Alice, c'est la mesure de Bob. Et la mesure de Bob n'a pas de rapport avec la description que fait Alice.

Ce n'est toujours pas clair ?

Catherine Pepin. Il me semble qu'Alice, quand elle va mesurer le spin en β , comme c'est plus tard, ce n'est plus vraiment Alice. Qu'est-ce qu'un observateur ? S'il est plus tard dans le temps, ce n'est plus le même observateur.

Matteo Smerlak. Pourquoi ? En général, quand on parle d'observateur, on parle d'un système physique et on imagine qu'il est réidentifiable dans le temps.

Catherine Pepin. Dans ce cas-là, si je prends Bob qui fait la même chose qu'Alice, avec le même nombre de particules et le même type d'observateur macroscopique... Je veux dire qu'Alice plus tard ou un Bob de type Alice, c'est le même observateur. Soit c'est la même chose, soit ce n'est pas la même chose quand c'est plus tard. Mais il faut se mettre d'accord au départ. Il me semble que si on fait des statistiques sur le nombre d'observables, on peut corréler les observations en A et en B. C'est ainsi que je comprends le paradoxe de Bell, avec le spin.

Carlo Rovelli. Je peux donner la *poor man version* de l'argument. Deux mesures ont été faites, aux points A et B de l'espace-temps. On regarde les résultats et on les compare. Mais pour cela, il faut disposer des résultats des deux mesures au même point C de l'espace-temps (on ne compare pas à distance !). La comparaison va donc être faite en un point C qui est dans le futur de A et aussi de B. C'est là et seulement là que l'on fait la comparaison. On peut imaginer que le résultat de la mesure faite (par exemple) en B soit inscrit sur une feuille de papier et gardé jusqu'à C. Mais pour cela il faut que la feuille de papier soit considérée comme étant un objet classique et non comme un objet quantique (qui pourrait être dans une superposition d'états). Mais en mécanique quantique relationnelle on assume que tout est quantique. Donc des feuilles de papier classiques n'existent pas. Cela veut dire que du point de vue de l'observateur qui a fait la mesure A la feuille de papier est encore dans une superposition quantique des deux résultats

possibles de la mesure B. Par rapport à l'observateur A aucune mesure n'a lieu au point B. Le collapse se produit seulement au moment C. La non localité paradoxale EPR n'est qu'apparente car elle résulte de l'oubli du fait que le papier sur lequel le résultat de la mesure en B se trouve écrit est, lui aussi, un objet quantique.

C'est seulement au moment de l'observation par l'observateur A que le résultat de la mesure B devient bien déterminé. L'idée que quelque chose qui se passe ici puisse affecter quelque chose qui se passe là de façon *observer independent* est fautive. Si on enlève cette *observer independency* et si on garde tout élément de réalité au sens quantique (cela collapse parce qu'on met un état non déterminé dans un état déterminé), on ne peut pas comparer des choses qui se passent dans des endroits *spacelike-separated*.

Jean-Pierre Gazeau. Je me suis posé une question en regardant le transparent qui présentait la notion relationnelle. On a l'impression que l'objet et l'observateur jouent un rôle totalement symétrique. Quel est l'observé et quel est l'objet ? On a l'impression qu'on peut les interchanger, d'après ce formalisme. Y a-t-il une symétrie complète de S par rapport à O et de O par rapport à S ?

Roger Balian. Je peux aussi bien être observateur qu'objet mesuré.

Jean-Pierre Gazeau. Pourtant, il y a une différence, parce que l'observateur, lui, est capable de donner un résultat bien défini, de dire ce qu'il a lu. Cela signifie qu'il y a d'autres états, alors, dans le formalisme. C'est complexe. Il y a autre chose, dans la manière de le décrire, en tant que quête.

Matteo Smerlak. Dans un laboratoire, très concrètement, un appareil de mesure remonte une corrélation microscopique au niveau macroscopique, suivant une espèce de processus d'impression sur une feuille. Mais cela, c'est, encore une fois, un processus physique. En principe, rien n'empêche de considérer un simple atome comme un appareil de mesure pour un autre atome, deux atomes qui entreraient en interaction.

Roger Balian. Non, parce qu'une mesure suppose un enregistrement et un résultat bien défini. C'est cela qui caractérise un appareil de mesure, qui se distingue des objets.

Matteo Smerlak. Qu'est-ce qu'un enregistrement ?

Roger Balian. Un enregistrement, c'est la fabrication d'un résultat vérifié, macroscopique.

Matteo Smerlak. Comme on l'a vu dans l'argument de Wigner sur l'observateur observé, cet enregistrement ne se produit pas de façon absolue. Pour certains observateurs, il y a un enregistrement et pour d'autres, si on décrit simplement l'interaction unitaire entre l'appareil de mesure et le système quantique dont on veut parler, il n'y a pas d'enregistrement particulier. On voit bien qu'au terme du couplage entre S et O...

Roger Balian.... cet argument suppose qu'il n'y a pas eu enregistrement par le premier, par le petit observateur. S'il y a eu enregistrement par le petit observateur, là, il y a eu processus irréversible de fabrication d'un résultat macroscopique bien défini qui est un résultat de mesure.

Carlo Rovelli. S'il y a eu processus irréversible de fabrication d'un résultat bien défini, alors l'hypothèse 2 sur laquelle l'interprétation relationnelle se base, c'est à dire l'hypothèse que tous les systèmes sont également quantiques, est fautive. Si la mécanique quantique est strictement correcte il n'y a jamais de processus exactement irréversible

Roger Balian. Non. Les systèmes sont équivalents, peut-être. Rien ne distingue *a priori* un système de deux molécules enfermées dans une enceinte, en mécanique statistique, d'un système de n particules où n est 10^{23} . Et pourtant, il y en a un qui est irréversible et l'autre qui ne l'est pas. C'est la même chose.

Carlo Rovelli. Imaginons que je fasse une mesure de spin dans un laboratoire et que j'obtienne spin *plus*. Pensez-vous qu'il est possible, en principe, de mesurer des interférences entre – pour utiliser ce langage – cette branche, dans laquelle la mesure est résultée *up*, et la branche dans laquelle la mesure est résultée *down*, ou non ? Si vous me répondez « non, c'est impossible en principe, même en mesurant l'état du monde, aucune observable ne peut voir une interférence entre les deux », cela veut dire – si tous les systèmes sont équivalents –, que la mécanique quantique est violée à certains moments, et que le calcul n'est pas valable. Si vous me répondez que c'est possible...

Roger Balian.... je dirai que c'est possible, mais extraordinairement difficile, donc pratiquement impossible.

Carlo Rovelli. Nous sommes d'accord sur ce point.

Roger Balian. C'est donc exactement la même chose que le paradoxe de l'irréversibilité en mécanique statistique. On a des systèmes macroscopiques et, étant donné qu'ils sont macroscopiques, ils ne se comportent qualitativement pas comme les systèmes microscopiques – bien qu'il n'y ait pas plus et bien qu'ils obéissent strictement aux mêmes lois.

Carlo Rovelli. Oui. Je pense que, là aussi, nous sommes d'accord. Mais cela veut dire que la distinction entre quelque chose d'enregistré et quelque chose de non enregistré...

Roger Balian.... est relative. Elle est relative à nos possibilités. Elle est contingente.

Carlo Rovelli. Voilà. Cela a donc à voir avec le nombre de degrés de liberté qu'on a perdu.

Roger Balian. Exactement.

Alexei Grinbaum. Je voudrais dire quelques mots à propos des observateurs, car je viens d'écrire un article sur ce sujet. Le débat qui vient d'être évoqué est tout de suite apparu, ou plutôt réapparu, après l'article de Carlo Rovelli de 1996 (Int. J. of Theor. Phys., 35, 163, 1996). Par exemple, Asher Peres a répondu, en se référant au travail de Rovelli ainsi qu'à la position de David Mermin, qu'il serait absurde de dire que deux électrons dans l'état S dans un atome, donc parfaitement corrélés, étaient l'un observateur de l'autre.

Je vous rappelle que dans l'histoire de la pensée sur l'observateur en physique il y a eu une contribution dont l'importance est comparable à celle des discussions de Wigner autour de la conscience. Il s'agit de la définition qu'a donnée Everett dans son célèbre article introduisant à l'idée de plusieurs branches de la fonction d'onde. Mais, avant d'en venir à discuter de branches multiples, Everett s'y pose la question de savoir ce qu'est l'observateur. Il répond que c'est un système quantique doté d'une mémoire. Mais qu'est-ce qu'une mémoire, se demande-t-il. Pour Everett c'est quelque chose qui préserve l'information sur les corrélations passées entre notre observateur et les systèmes avec lesquels il avait interagi précédemment. Alors, quelle est la bonne définition physique de l'observateur ? Quel élément est déterminant : est-ce la mémoire ? la conscience ? aucune des deux ? Ce n'est pas du tout clair.

Ce débat est encore grand ouvert, aujourd'hui, en fondements de la physique. C'est peut-être même la question la plus controversée. En effet, il existe un vide théorique que la physique n'a pas su remplir entre l'hypothèse d'observateurs universels comme celle de Carlo Rovelli et Matteo Smerlak, et celle d'observateurs particuliers, dotés d'une mémoire, d'une conscience, de quelque chose d'autre. Peut-être, comme disait Bohr, d'une description macroscopique. Mais je me demande si ce problème non encore résolu ne proviendrait pas du fait qu'on ait mal compris, ou qu'on n'ait pas poussé jusqu'à sa limite logique, la démarche de relativisation dont parlent Rovelli et Smerlak. Plus concrètement je suis étonné par la phrase d'ouverture de l'exposé que vient de faire Matteo Smerlak : « il y a deux observateurs, O et P, et le système S ». Mais comment le savent-ils ? Comment O sait-il qu'il y a S ? Certes il y a entre O et S des degrés de liberté corrélés, mais O a-t-il une mémoire spéciale qui préserve cette information ? Quelqu'un le lui a-t-il dit ? Est-ce que cette connaissance vient d'une observation antérieure ? Comment O a-t-il identifié S ? Je me demande donc si la controverse dont nous parlons ici ne provient pas du fait qu'on n'a pas encore poussé jusqu'à sa limite logique l'idée qu'il faudrait définir relativement à des observateurs, non seulement les états physiques mais la constitution même des systèmes, c'est-à-dire si S est vu comme S par O peut-être P peut-il voir autrement les degrés de liberté impliqués dans l'interaction entre lui et S.

Je me demande si on n'a pas simplement affaire ici à une difficulté de cohérence de notre approche, liée au fait qu'on a posé les systèmes comme faisant partie du tissu du monde, tandis que les systèmes eux-mêmes doivent être définis de façon relative à l'observateur.

Bernard d'Espagnat. Cela me paraît tout à fait vrai. J'estime qu'en mécanique quantique « orthodoxe » (sans variables cachées) les systèmes physiques eux-mêmes, si gros qu'ils soient, doivent être considérés comme relatifs et non comme existant « en soi ». Au reste, en théorie quantique des champs c'est bien ce qui se passe. Les systèmes n'y ont pas une existence « en soi » puisque cette théorie prévoit que des particules, voire des systèmes de plusieurs particules, peuvent être créés et annihilés. Et – argument non négligeable ! – comme chacun sait, ces phénomènes prédits par la théorie sont confirmés par l'expérience...

Alexei Grinbaum. Oui.

Carlo Rovelli. Je pense que vous avez touché deux problèmes que je qualifierais de centraux. Je partage presque tout ce que vous avez dit, sauf la relation entre les deux problèmes, que je vois séparés. Je commence par le second, qui est celui de la définition de la notion de système.

Tout ce qui a été fait dans le cadre de la mécanique quantique relationnelle présuppose le fait d'avoir une notion de système bien définie. Cela a été, je pense, pointé du doigt par

Michel Bitbol quand il dit que c'est là qu'il manque quelque chose pour comprendre le monde – si j'ai bien compris son point de vue. Et je suis d'accord avec cela. Je serais plus heureux que la compréhension du monde n'ait pas besoin de commencer par briser le monde en sous-systèmes. Mais je ne vois pas ce problème comme étant lié au premier, celui de la définition de l'observateur.

Je considère que la définition d'observateur a toujours été la partie la plus sombre, obscure, de toute la construction de la mécanique quantique. Parce que, finalement, il existe de nombreuses positions. La seule position claire est celle de Wigner, qui dit que l'observateur, c'est la conscience. Pour ma part, je préfère partir d'un autre point de vue.

Bien sûr, on peut considérer qu'un appareil d'observation est quelque chose qui est thermodynamique. Mais je trouve que, d'un côté, la définition d'observateur est essentielle pour parler de mécanique quantique – sinon on ne comprend pas ce que sont les valeurs physiques et les valeurs propres de l'opérateur. Mais, d'un autre côté, la seule façon que j'ai de comprendre un observateur (et pour moi, c'était un *a priori*), c'est de dire que c'est n'importe quel système physique. Donc tout l'effort de la mécanique quantique et relationnelle consiste, d'une certaine manière, à utiliser la notion d'observateur dans le sens le plus large possible.

Evidemment, la question n'est pas terminologique : on peut utiliser « observateur général », « observateur de type A », « observateur de type B »... La vraie question est de savoir laquelle de ces notions est nécessaire pour parler de la mécanique quantique : est-il nécessaire de parler de conscience, est-il nécessaire de parler d'un système animal, est-il nécessaire de parler d'un système qui fixe une information, etc. ?

La mécanique quantique relationnelle est fondée sur une hypothèse : il est possible de rendre compte et de rendre cohérente la mécanique quantique même avec l'hypothèse 2, selon laquelle tous les systèmes sont équivalents. Un observateur est donc n'importe quel système physique, dans le sens d'un observateur en relativité restreinte. C'est un hasard si l'on utilise le même mot. La vitesse est une quantité relationnelle en mécanique classique, depuis Galilée. On peut donc uniquement parler de vitesse par rapport à un observateur, par rapport à un système de référence. Le système de référence est peut-être la bouteille que j'ai devant moi. Ma main va à une certaine vitesse, par rapport à cette bouteille. Mais la bouteille n'a pas besoin d'observer ma main. La bouteille n'enregistre rien et n'est pas consciente. C'est seulement la vitesse de ma main qui est relative à la bouteille. La bouteille est un observateur seulement dans ce sens très élémentaire. Dans le même sens, en mécanique quantique, je considère que n'importe quel couple de systèmes physiques peut fonctionner dans l'interaction comme l'un étant l'observateur de l'autre. Est-ce possible, en partant de cela, de reconstruire la mécanique quantique sans devoir utiliser une notion d'observateur plus restreinte ? Je pense que oui. Evidemment, ensuite, on n'utilise pas n'importe quel appareil de mesure. On a besoin de fixer sur un morceau de papier les propriétés qui sont vraies pour un système, dans la mécanique quantique relationnelle. Si l'on fait des observations au sens d'un laboratoire, on utilisera des systèmes « observateurs » appropriés.

Michel Bitbol. Je souhaite faire un petit commentaire sur la question de l'observateur. J'ai quand même été frappé par le vocabulaire qu'a employé Matteo Smerlak – peut-être n'était-il pas intentionnel, mais il faut se le rappeler. Il a dit : « du point de vue de l'observateur O, il y a un collapse », et « du point de vue de l'observateur P, il n'y a pas un collapse, mais il reste une superposition ». Qu'est-ce que le point de vue d'un observateur qui n'est justement pas un observateur intentionnel au sens de la philosophie de l'esprit ou un observateur peut-être doté de représentations ? Est-ce que vous diriez, par exemple, qu'une macromolécule qui serait couplée à un électron a un point de vue sur cet électron ?

Carlo Rovelli. J'utilise cela dans le sens suivant : du point de vue de la Terre, ma vitesse est de 30 kilomètres à l'heure. Du point de vue du train, elle est moindre. Evidemment, le train n'a pas de point de vue.

Michel Bitbol. Ne pourrait-on pas simplement dire, dans cette configuration purement cinématique, que « la vitesse relative de A par rapport au train est x » ?

Carlo Rovelli. Si.

Michel Bitbol. Cela suffirait. À ce moment-là vous n'auriez même plus besoin d'utiliser le vocable « point de vue », qui suppose que quelqu'un, dans le train, est capable de voir et de réaliser les résultats d'une mesure. Le problème est qu'on ne peut pas s'en tirer à si bon compte. Supposons qu'au lieu de dire « du point de vue du train, la vitesse est v », on dise « la vitesse relative de A par rapport au train est v ». Cette dernière expression suppose tacitement un autre vrai « point de vue » d'observateur intentionnel : celui d'un observateur qui serait extérieur à la fois à A et au train, mais qui pourrait comparer leur vitesse. L'observateur doué d'intentions est toujours là, tapis quelque part.

Alexei Grinbaum. Je pense avoir discuté ailleurs de ce lien entre les deux problèmes, que vous séparez et que je ne sépare pas. Je ne veux pas exposer ma réponse à cette question, mais je voudrais à nouveau attirer votre attention sur la phrase par laquelle commence l'hypothèse 2 : « tous les systèmes sont équivalents ». Dans votre réponse, Carlo, vous avez parlé d'équivalence physique : « tous les systèmes sont physiquement équivalents ». Mais quand je lis cette phrase, j'y vois – y compris avec le vocabulaire de l'article de 1996 – le fait que tous les systèmes sont physiquement équivalents, mais pas nécessairement informationnellement équivalents. L'idée, qui provient d'ailleurs d'Everett, est celle d'une caractérisation informationnelle de l'observation. Physiquement, n'importe quel système peut être observateur. Mais est-ce que les exigences et les contraintes informationnelles pour être observateur peuvent être attribuées à n'importe quel système physique ?

Pour moi, il y a donc, dans cette phrase, une ambivalence sur le sens du mot « équivalent », qui permet justement de faire le pont entre les deux questions que vous avez séparées.

Carlo Rovelli. Tout dépend de quelle information on parle. L'information dont je parlais dans l'article est une information dans le sens de *Shannon*. Elle est simplement quelque chose qui quantifie le nombre de possibilités. Dans ce cadre on peut parler de l'information qu'un système a sur un autre. Ce n'est rien d'autre que la relation existant entre les états de l'un et de l'autre. Un système A a information sur un système B si une mesure sur A me prédit quelque chose à propos d'une mesure sur B.

Encore une fois, si cette notion élémentaire d'information est nécessaire pour pouvoir parler d'état relatif, elle n'est pas suffisante pour construire des appareils de mesure réalistes. Un atome n'est pas un appareil de mesure par rapport à un atome à côté de lui. Mais il a de l'information (dans ce sens) à propos de l'autre atome si quelque chose (classique ou quantique) les corrèle.

J'aimerais une théorie fondamentale du monde qui parle de systèmes physiques, ou d'information relative, et non pas de choses plus compliquées. Je ne me satisferai pas d'une interprétation fondamentale du monde qui se base sur le fait qu'il faut avoir des intelligences, des machines ou même des morceaux de papier ! Si les notions fondamentales de la mécanique quantique peuvent être interprétées dans ce sens physique ou d'information dans le sens de *Shannon*, je serai content!

Hervé Zwirn. Je crois que l'on touche au problème le plus difficile : savoir le type d'entités auxquelles on est prêt à faire jouer le rôle d'observateur. On a envie de dire qu'on voudrait se passer de la notion de conscience pour décrire le monde. Mais est-ce que tous ces problèmes d'interprétation ne signifient pas, par essence même, qu'on se place d'un point de vue intentionnel, comme le disait Michel Bitbol tout à l'heure ? C'est-à-dire qu'en réalité, les problèmes qu'on se pose ne sont pas des problèmes d'évolution du monde indépendamment de nous – parce que l'équation de l'univers évolue...

Roger Balian... il n'y a pas d'équation de l'univers.

Hervé Zwirn. Je ne vais pas me prononcer là-dessus ! Mais nous parlons de problèmes d'interprétation. Or, qui dit interprétation, dit quelqu'un qui se pose la question de savoir comment tout cela est cohérent par rapport à lui. Il est très difficile, même si on en a tous envie, de faire l'économie d'un observateur entendu au sens de quelqu'un ayant un point de vue intentionnel. Et c'est par rapport à ce point de vue intentionnel qu'on va ensuite essayer de rétablir la cohérence.

Je vois là, dans la première équation présentée par Matteo, qu'il y a un *collapse*. Donc, du point de vue de O qui interagit avec S, il y a bien un *collapse*. Plaçons nous du point de vue de O, pourquoi le *collapse* a-t-il lieu ? En mécanique quantique, sans principe de réduction du paquet d'onde, il n'y a pas de *collapse*. Donc le problème de la mesure reste entier et il n'est pas résolu. Présenté comme cela a été fait, puisqu'on a introduit explicitement le *collapse* pour un observateur donné, quel qu'il soit, il faut expliquer ce *collapse*. L'équation de Schrödinger ne donne pas l'explication. L'équation d'évolution unitaire ne la donne pas. Donc déjà, en notant ici « *collapse* » tel qu'il apparaît sur le transparent présenté, on dit qu'il y a deux principes d'évolution – et donc le problème de la mesure n'est pas réglé. Je suis entièrement d'accord avec le fait de dire qu'il y a une relativité des états ou des descriptions par rapport à l'observateur. Mais il faut bien expliquer pourquoi le *collapse* qui intervient ici, intervient pour l'observateur O. Et pour qu'il intervienne, il faut bien qu'il ait un mécanisme qui le provoque, or cela n'est pas donné dans l'interprétation relationnelle.

Maintenant, le fait qu'il soit nécessaire de faire intervenir – comme Roger le disait tout à l'heure – le fait qu'il y a trop de degrés de liberté et que, donc, cela nous échappe, eh bien c'est encore une fois une manière de dire autrement que c'est en raison de nos moyens limités que les choses nous apparaissent comme elles nous apparaissent. Si nos moyens n'étaient pas limités, par exemple pour un super-observateur omnipotent, le monde resterait quantique et il n'y aurait jamais de *collapse*, puisqu'on serait toujours capable de mettre en place les moyens de mesurer les observables qui permettraient de constater les corrélations. Donc, même si on en a envie, je vois mal comment on peut arriver à éliminer totalement la nécessité, à un moment donné, de tout ramener à l'aune de notre cerveau – et donc d'un observateur qui est, d'une certaine manière, ce que nous sommes. Et donc l'idée selon laquelle on peut éliminer l'observateur en faisant jouer ce rôle à n'importe quel système atomique ne me semble pas bonne. Ce qu'on cherche à faire, ce

n'est pas d'expliquer comment une macro molécule voit le monde – et d'ailleurs on ne verrait pas très bien ce que cela pourrait vouloir dire –, on cherche à expliquer comment nous, à travers la mécanique quantique, nous arrivons à rendre compte de ce que nous observons. On ne va donc pas éliminer les observateurs que nous sommes !

J'avais proposé, il y a longtemps, une interprétation qui a beaucoup similitudes avec ce qui nous est présenté aujourd'hui : le solipsisme convivial. Elle partage énormément de points communs avec l'interprétation relationnelle dans le sens où elle propose, elle aussi, que les états soient relatifs aux observateurs. Mais c'est un prolongement, en fait, de la théorie d'Everett, que j'avais proposé dans l'ouvrage que j'ai publié en 2000 – suite, d'ailleurs, à des idées de Bernard d'Espagnat. C'est très similaire à cela, à deux petites différences. La première est que j'explicité le collapse comme étant un principe, que j'appelle le « principe d'accrochage » – et je conserve la notion d'observateur conscient – : à un moment donné, un choix s'effectue pour un observateur donné qui s'accroche, en quelque sorte, à l'une des branches possibles. Sachant que la fonction d'onde, comme pour Everett, n'est jamais réduite. La deuxième chose est que c'est tellement relationnel, c'est-à-dire relatif à l'observateur, que deux observateurs peuvent très bien, chacun de leur point de vue, avoir observé des choses totalement différentes – donc, pour le paradoxe EPR, cela résout aussi le problème, puisque deux observateurs peuvent avoir vu des choses qui ne seront pas cohérentes du point de vue d'un super-observateur qui n'existe pas. Mais les principes de la mécanique quantique interdisent, lorsque les observateurs se mettent ensemble, qu'ils se rendent compte de leurs différences. Je suis donc parfaitement d'accord avec ce que vous venez de dire à propos du bout de papier : on a tendance à penser que le bout de papier, s'il est écrit, l'était déjà dans le passé. En fait, non. Tout reste superposé, sauf pour l'observateur en lui-même, qui à un moment donné s'accroche à une des branches et y reste toujours accroché de telle manière que ce qu'il pourra contrôler par rapport à d'autres observateurs ne révélera jamais aucune incohérence.

Il est vrai que c'est un peu étrange comme conception et cela a des conséquences remettant en cause le réalisme habituel : cela veut dire que chacun de nous voit un monde qui lui est propre et qui peut être différent de celui que voient les autres mais que nous ne pouvons pas nous en rendre compte. Mais le principe du collapse reste entier. Je ne l'ai pas réglé non plus, Pour des raisons évidentes dues à l'image que cela évoque, j'appelle cela le mécanisme d'accrochage mais le collapse n'est pas éliminé. En fait, la solution que je propose consiste à faire reposer le mécanisme d'accrochage sur la décohérence qui elle-même est due aux limitations de nos capacités et donc en dernier ressort à notre conscience.

Le point sur lequel je voulais insister est essentiellement le fait qu'il me paraît difficile de se passer totalement d'une notion au moins minimale d'observateur intentionnel ou conscient.

Jean Petitot. L'accrochage est-il un processus physique ?

Hervé Zwirn. Ce n'est pas un processus physique. C'est un processus qui consiste, à un moment donné, pour une interprétation liée à l'observateur, à faire un choix qui nous échappe – nous n'en sommes pas maîtres – et qui nous accroche sur une des branches de la fonction d'onde superposée qui, elle, continue son chemin – mais, pour nous, elle disparaît. Les alternatives disparaissent.

Jean Petitot. Il y a donc quand même un petit quelque chose en plus de la physique.

Hervé Zwirn. Peut-être... mais c'est un point à approfondir.

Carlo Rovelli. Je me rends compte que j'aurais dû plus faire référence et comparer au solipsisme convivial !

Cette question me permet de mettre en avant un des points les plus importants pour comprendre ce que je voulais faire avec l'interprétation relationnelle. Il existe de nombreuses façons d'organiser les interprétations possibles de la mécanique quantique, évidemment. J'ai appris nombre d'entre elles grâce à Bernard d'Espagnat. L'une d'entre elles consiste à distinguer deux façons opposées de penser la mécanique quantique : celle d'Heisenberg et celle de Schrödinger.

Un point de vue possible (on peut dire celui de Schrödinger, mais c'est vague) est que la mécanique quantique est essentiellement l'équation de Schrödinger pour l'état du système, une évolution unitaire – donc il faut comprendre ce qui se passe avec le collapse. Tout cela ouvre nombre de discussions.

Un autre point de vue, différent, est celui par lequel Heisenberg raconte comment il a conçu la mécanique quantique. Il raconte qu'il était dans un parc de Copenhague, de nuit. Il voit quelqu'un qui se promène dans le noir – mais uniquement quand il passe sous une lampe. Il le voit donc apparaître, disparaître, puis réapparaître et disparaître à nouveau. Il en déduit que c'est ce qui se passe avec l'électron : il existe en tel et tel point, mais on ne sait pas ce qu'il en est entre les deux. Ainsi, l'autre façon de penser la mécanique quantique est d'envisager les événements quantiques comme éléments prioritaires de la réalité avec laquelle nous avons à voir. L'interaction de photons sur l'appareil photoélectrique. Le moment où on voit quelque chose qui se passe. Le résultat du collapse.

Donc, tout le travail de reconstruction de mon article consiste à jeter l'état comme objet fondamental, à oublier complètement l'image « l'état évolue » et à penser à la réalité comme ces événements quantiques. Je vous vois là, et non pas en superposition. Je vois l'électron, je vois l'appareil de mesure. Du point de vue « de Copenhague », standard, c'est très facile. Il y a un monde classique et le système quantique se manifeste par rapport au monde classique dans une suite d'événements discrets qui sont le résultat de la mesure. Cette suite est la réalité de ce système. J'ai cherché à relire cela en remplaçant le « monde classique » par n'importe quel système par rapport à un autre. De ce point de vue, le collapse n'est pas un problème : c'est la réalité. Les résultats de la mesure sont la réalité. Le problème est de comprendre comment ils sont liés l'un à l'autre et comment, de façon étrange, ils semblent être vrais par rapport à un système mais pas par rapport à un autre. Mais si l'on commence à penser que la mécanique quantique est un état qui évolue sous l'équation de Schrödinger, on est alors dans une tout autre interprétation.

Roger Balian. Je suis absolument d'accord avec le point de vue à la Heisenberg que vous venez de développer. C'est, de toute façon, le seul que je comprends ! Je changerais simplement une toute petite chose : les éclairs successifs dont vous parlez, je ne dirais pas que c'est la réalité, mais des images de la réalité. De même qu'une mesure est une image que nous avons de la réalité, une image qui se crée sur un appareil. Il se crée une image de la réalité laquelle, de toute façon, nous échappe, puisqu'il s'agit de variables qui ne communiquent pas – et dont, mathématiquement, nous n'avons aucune intuition. Et pour cause, notre intuition est faite avec notre monde qui commute. Je le verrais plutôt comme cela, comme une image.

De la même façon, sur un autre point, à savoir, l'information : on aimerait bien l'introduire en mécanique quantique – c'est vrai – mais on se heurte aussi à une difficulté, qui est

que la base de l'information est le bit. Et on sait bien qu'en mécanique quantique, la base de l'information est le qubit. Or le qubit est quelque chose dont on n'a pas l'intuition.

Je crois qu'il faut faire le saut et dire qu'on a une image de la réalité de l'information quantique sous forme d'informations classiques – mais que l'information quantique, ce sont des qubit, qui sont ce qu'ils sont.

Alexei Grinbaum. Je voudrais interroger Matteo Smerlak sur une phrase qu'il a prononcée tout à l'heure un peu au passage. Il a dit qu'il y avait un collapse par rapport à O parce que O ne s'observe pas lui-même. Donc il n'est nulle part question d'auto-observation dans son approche. Pour moi, la question de l'apparition ou non du collapse dans l'interprétation relationnelle étant fondamentale, elle est forcément liée à la question de l'auto-observation ou, plus généralement, de l'autoréférence.

Quel est le statut de cette interdiction de toute auto-référence dans l'interprétation relationnelle ? Comment est-elle motivée ? Où en sommes-nous à ce jour dans la réflexion sur l'auto-observation : est-ce qu'elle s'ajoute nécessairement comme un postulat supplémentaire, ou est-ce un théorème, donc quelque chose qu'on peut déduire ? Et si c'est un postulat, il faut le rendre explicite et l'ajouter à la liste des postulats.

Matteo Smerlak. Il y a plusieurs mystères dans la mécanique quantique ! L'un d'entre eux est de comprendre pourquoi O et P donnent des descriptions différentes – le mot « descriptions » était pris avec humour après le commentaire de Michel Bitbol. Et l'autre consiste à comprendre l'origine de l'indéterminisme en mécanique quantique. Ce sont deux problèmes différents. La mécanique quantique relationnelle intervient sur le premier problème. Elle ne donne pas d'explication fondamentale concernant le second problème, à savoir l'origine de l'indéterminisme. Elle permet simplement de pointer quelque chose qui ne l'est pas dans la mécanique quantique traditionnelle, à savoir que le collapse est lié à un élément d'autoréférence. L'asymétrie qu'on voit du point de vue de l'interprétation relationnelle entre l'interprétation de O et celle de P est que O interagit avec S, et que P n'interagit pas avec S. Il y a un élément d'externalité dans P qui est absent dans O.

On peut donc postuler, effectivement, que l'indéterminisme de la mesure faite par O – le fait qu'il y a collapse avec impossibilité de savoir laquelle des valeurs sortira de cette mesure – est lié à cette limite intrinsèque de O à se décrire lui-même comme interagissant avec S. C'est dire simplement que, de ce point de vue, il n'y a pas plus que cette observation : il existe peut-être une relation entre collapse et autoréférence.

Je ne connais pas de progrès récent sur ce point de l'autoréférence en mécanique quantique relationnelle. Mais je peux simplement dire – c'était déjà cité dans l'article de 1996 – qu'il existe un travail, effectué par la chercheuse italienne Dalla Chiara, abordant précisément cette question.

Alexei Grinbaum. Outre le travail de Marisa Dalla Chiara, il existe le théorème de Breuer, qui est l'un des théorèmes fondamentaux sur l'autoréférence.

Matteo Smerlak. Aussi. Ce sont les deux références que je peux citer. Je n'en connais pas de plus récente.

Catherine Pepin. Je vais adopter un point de vue de physicien, en allant dans le même sens que Roger Balian. Certaines choses restent peu claires. Je pense en particulier à trois points.

D'abord, concernant le paradoxe EPR et les inégalités de Bell, il me semble que si des observateurs ne peuvent pas communiquer entre eux, si tout est toujours référence à un observateur, alors on ne peut même pas parler de corrélation entre ce qui est observé en A et ce qui l'est en B. On peut définir les observateurs comme des gros systèmes qui font s'effondrer les fonctions d'onde – ce sont des systèmes classiques. Une fois que le système classique a interagi, on a une donnée, comme disait Roger Balian. Si on fait la mesure sur α et sur β , ces systèmes classiques donnent des corrélations si α et β étaient dans le même état quantique au départ. Maintenant, si α et β étaient dans des états quantiques différents au départ, il n'y a pas ces corrélations. Je ne vois donc absolument pas comment le fait d'introduire quelque chose de relatif à l'observateur peut passer sur ce fait.

Matteo Smerlak. Vous avez indiqué qu'il n'est pas possible de comparer les résultats d'Alice et de Bob, donc de mettre en évidence des corrélations, dès lors que toutes les mesures sont relatives à des observateurs. Ce n'est pas le cas. Il est tout à fait possible pour Alice, une fois qu'elle a mesuré le spin de α , d'aller se corréler avec Bob. Il est possible de ramener β en présence d'Alice et qu'Alice mesure le spin de β , ensuite. Elle aura donc mesuré, dans son histoire, le spin de α puis le spin β . Et elle observera donc une corrélation entre ces deux mesures. Elle trouvera que ces valeurs sont opposées.

Catherine Pepin. D'accord. Donc comment expliquez-vous que cette corrélation entre ces deux mesures soit différente dans le cas du paradoxe EPR, où les particules sont dans le même état quantique au départ, que dans un cas où on va mesurer des particules dans des états quantiques différents au départ ? Il faut bien que le fait que ce soit dans le même état quantique au départ induise une corrélation dans l'observation, après, de A ou de B.

Matteo Smerlak. Elle induit une corrélation.

Jean Petitot. Mais après.

Matteo Smerlak. Oui. Cette corrélation est de la forme suivante : la valeur du spin de β par rapport à Alice est opposée à la valeur du spin de α par rapport à Alice. Cette corrélation existe. Seulement, elle est causale. Elle se produit pour deux événements qui sont dans le futur l'un de l'autre.

Catherine Pepin. Si elle est là, cela veut bien dire qu'il y a une non-localité. C'est cela, que je ne comprends pas. Si cette corrélation est là, qu'elle soit causale ou pas...

Matteo Smerlak... mettre en évidence cette corrélation n'engage pas deux événements séparés par une distance espace. Elle engage deux événements séparés par une distance temps.

Hervé Zwirn. Je pense qu'il serait bon de faire la description étape par étape, dans le temps, de ce qui se passe. Les particules se séparent. Alice mesure le spin de α à un moment donné, et trouve une certaine valeur. Il n'y a pas d'influence causale dans un intervalle du genre espace, donc il n'y a pas de violation de la localité. Ce qui veut dire qu'en toute rigueur le spin de la particule qui est loin n'est toujours pas déterminé.

Jean Petitot. Pour Alice.

Hervé Zwirn. Oui, pour Alice il ne l'est toujours pas. Pour clarifier les choses et trouver une explication qui emportera l'adhésion, peut-être faut-il expliquer comment, ensuite, lorsqu'Alice et Bob se retrouvent (Bob a mesuré, de son côté, et il a trouvé quelque chose), si pour Alice ça n'était pas déterminé, comment il se fait que lorsqu'Alice et Bob sont ensemble, Alice trouve *a posteriori* que Bob avait bien trouvé le contraire de ce qu'elle a mesuré. Je pense que c'est cela, le point qui vous gêne. Je pense donc qu'il serait bon d'expliquer étape par étape, pour que ce point ne soit plus gênant.

Catherine Pepin. Soyons clairs, c'est le même point pour les inégalités de Bell.

Hervé Zwirn. En ce qui concerne les inégalités de Bell, il y a quelque chose en plus. Là, en revanche, il y a quelque chose de très simple et plus facile à expliquer, je pense. Si on peut suivre étape par étape, cela nous permettra de mieux saisir.

Matteo Smerlak. Je ne ferai pas mieux que vous ne venez de le faire !

Hervé Zwirn. J'ai laissé un petit point de côté, en l'occurrence l'explication très précise du mécanisme. Je reprends. Les particules se séparent et, à un moment donné, Alice mesure le spin – mettons qu'elle trouve + suivant Z. Mais, pour Alice, le spin de l'autre particule n'est pas - suivant Z. Il est toujours indéterminé. Bob mesure le spin de l'autre particule – et il trouve ce qu'il trouve.

Carlo Rovelli. Et qu'est-ce qui se passe pour Alice ?

Hervé Zwirn. Pour Alice, quand Bob mesure, il ne se passe rien.

Carlo Rovelli. Si ! Il se passe quelque chose.

Matteo Smerlak. Au cours du stage et au cours de la rédaction de l'article, c'est exactement la question qui m'a bloqué un long moment. J'ai écrit l'article après avoir trouvé la réponse.

Hervé Zwirn. Je crois que c'est cela, le point de détail qu'il faut expliquer.

Catherine Pepin. Donc que se passe-t-il pour Alice quand Bob mesure ?

Carlo Rovelli. Ce n'est pas un collapse, mais une intrication qui se produit entre l'état de la particule et l'état de Bob. Bob lui-même entre dans une situation d'intrication avec la particule, mais les deux restent dans une superposition quantique. Plus précisément cela veut dire qu'Alice sait que dès maintenant les résultats de ses mesures sur Bob ou la particule vont être corrélés.

Hervé Zwirn. Ce qui veut dire que pour Alice il n'y a plus simplement les deux particules, mais il y a la particule plus Bob.

Catherine Pepin. Il y a donc complètement non-localité. Au moment où Bob mesure, comme Alice interfère sur la mesure de Bob, c'est complètement non local – puisqu'ils ne sont pas au même endroit.

Alexei Grinbaum. C'est une redéfinition des systèmes.

Hervé Zwiirn. C'est une intrication des systèmes.

Alexei Grinbaum. Les systèmes sont redéfinis, bien sûr.

Hervé Zwiirn. Les deux particules étant déjà intriquées, Bob s'intrique.

Catherine Pepin. Bob et Alice ne sont pas au même endroit.

Hervé Zwiirn. Non.

Catherine Pepin. C'est donc une non-localité qui apparaît.

Hervé Zwiirn. Dans l'intrication.

Catherine Pepin. Elle réapparaît bien quelque part...

Alexei Grinbaum. Ce n'est pas un changement d'état. C'est un changement de ce qu'ils considèrent comme système.

Carlo Rovelli. Revenons à la question précédente. L'élément de réalité, ici, n'est pas l'état, qui est simplement un système mathématique permettant de calculer les probabilités des événements futurs – sur la base des observations précédentes. Pour Alice, quand Bob mesure rien ne se passe, sinon la possibilité de calculer les événements futurs. Quel est l'événement futur signifiant pour Alice ? Elle va recevoir un appel de Bob. Elle va alors collapser l'état de Bob et voir si la corrélation prévue se réalise ou non.

Catherine Pepin. D'accord. Je comprends beaucoup mieux.

Roger Balian. Je ne le dirais pas tout à fait comme cela. Je dirais qu'Alice fait toute une série de mesures de son spin, qu'elle filtre. Elle indique que la mesure n° 1 c'est tant, que la mesure n° 7 c'est tant, etc. Elle l'inscrit sur un papier qu'elle envoie par la Poste à Bob, en lui demandant de sélectionner telle ou telle mesure et de constater que tous les spins obtenus seront préparés dans telle position. C'est donc une préparation, un message sur une sélection des différentes mesures successives effectuées, plutôt qu'un collapse. Il n'y a pas de collapse. Il y a une sélection. Et c'est tout. A chaque étape, pour Alice, il y a peut-être eu son collapse à elle – correspondant au fait que son appareil lui a donné un certain résultat. Ce collapse, en fait, est lié à l'activité de l'appareil qui lui permet de faire cette sélection et de sélectionner telle et telle mesures dans son message. Qu'y a-t-il de choquant là-dedans ?

Carlo Rovelli. Puis-je répondre à votre observation précédente ? Vous avez dit que vous aimiez l'idée de lier la réalité non pas à l'état, mais aux événements quantiques. Mais vous avez ajouté que vous n'aimiez pas penser cela en tant que réalité, mais en tant qu'image de la réalité.

Roger Balian. Parce qu'une mesure donne une image.

Carlo Rovelli. Voilà. Pour ma part, j'aimerais utiliser un terme différent de celui d'image, en appelant cela l'information qu'un système peut avoir sur un autre système. C'est le sens dans lequel on utilise l'information. Quand l'électron arrive sur l'écran et laisse une tache, l'écran a une information sur le fait que l'électron est là. Donc tout ce qu'un système peut savoir sur un autre système, ce sont ces événements quantiques. Pourquoi peut-on les penser en termes d'information ? Parce qu'il s'agit de faits physiques. Ce que l'histoire de la physique nous a appris, c'est que si l'on connaît ces événements quantiques, ils nous permettent de prévoir (ce sont les lois de la physique) les événements quantiques suivants. Dans ce sens, si on est assez intelligent, si on a assez de papier, on peut prévoir les événements suivants sur la base de ces événements quantiques. Ils sont donc une information sur le système. La mécanique quantique dit que cette information est d'un type particulier, parce qu'elle se perd quand on regarde une autre information.

Pour ma part, j'aimerais réduire la mécanique quantique à ceci : des événements quantiques qui sont toujours entre deux systèmes – par nature. Si on choisit un système et un autre système, on a un ensemble d'événements et on peut, s'il y en a assez, calculer la probabilité suivante. L'état est seulement l'ensemble des événements futurs qui permettent de calculer les événements suivants. Pour moi, c'est cela, la mécanique quantique relationnelle.

Hervé Zwirn. Je voudrais reposer à Carlo Rovelli la question de tout à l'heure, que nous avons effleurée sans complètement trancher – si elle est tranchable. Peut-on, oui ou non, définitivement oublier pour un observateur la notion d'intentionnalité ou de conscience – on l'appelle comme on veut ?

On sait que Bernard d'Espagnat, dans un grand nombre de ses articles, insiste sur le fait que la mécanique quantique semble, contrairement à la mécanique classique, ne pas être descriptible sans faire référence au point de vue d'un observateur. Cela fait partie d'un des points principaux sur lesquels il a insisté. Quand le phénomène de décohérence a commencé à être décrit et mieux connu – nous en avons déjà parlé, puisque nous avons tenu deux séances sur la décohérence donc je ne vais pas revenir trop longtemps là-dessus –, dans les premières versions descriptives de Zurek, on avait un peu l'impression que ce dernier présentait la chose en disant qu'avec la décohérence, on n'a plus besoin d'observateur et que le monde devient classique spontanément. Ensuite, on sait que cette présentation des choses a été remise en cause. Et aujourd'hui, il y a encore un débat, mais on ne peut pas dire abruptement que le monde devient classique indépendamment de tout observateur puisque son "aspect" classique provient de l'impossibilité pour les êtres humains que nous sommes de faire les mesures qui montreraient "qu'en réalité" il n'est pas classique.

Peut-on dire que l'interprétation relationnelle fait l'économie totale de la notion de conscience, donc de point de vue intentionnel ? Ou est-ce qu'on est dans une situation "*for all practicle purposes*" en précisant que même si nous sommes inaccessibles les corrélations, la récurrence, etc., ces choses sont quand même toujours là. Et donc dans ce cas, d'un point de vue

philosophique, on ne peut pas dire, en toute rigueur, qu'on a éliminé le besoin d'une conscience ou d'un point de vue intentionnel.

Pensez-vous pouvoir faire l'économie de cela ? Ou est-ce que, dans le point de vue relationnel, on garde quand même – il me semble qu'on a du mal à faire autrement, mais je voudrais avoir, là-dessus, votre position précise – le fait qu'un observateur est quelque chose qui a des moyens limités et qui fait des sortes de coupures par rapport à des degrés de liberté qu'il ne peut pas observer et que c'est à cause de cela que le monde apparaît tel qu'il est ? Et que si nous étions des supers observateurs ayant tous les moyens, le monde nous apparaîtrait quantique, parce que le monde reste quantique dans son essence même. Il ne devient jamais classique – même si, pour nous, cela ne fait pas de différence. Si c'est le cas, cela veut dire que toute explication ou interprétation qui a pour but de rendre compte de ce qu'on observe en tant qu'êtres humains doit se référer, à un moment donné, à des limites – qui sont des limites humaines –, donc à une conscience.

Jean Petitot. La finitude n'implique pas la conscience.

Hervé Zwirn. En tout cas, la finitude est la cause de ce qui apparaît à notre conscience et on ne peut employer le verbe "apparaît" que relativement à une conscience.

Matteo Smerlak. Je lis l'interprétation relationnelle comme un effort de séparer le problème de la conscience – qui apparaît dans toute épistémologie, dans toute tentative de rendre compte de l'état de la science –, des difficultés propres à la mécanique quantique. A tous les stades de l'évolution de la science, il y aura autour de la table un Michel Bitbol qui dira : et le transcendantal, et les conditions de l'expérience, et les conditions de la possibilité, et l'observateur intentionnel ? Cela continuera certainement même après la mécanique quantique. A mon sens l'interprétation relationnelle procède, au sein de la mécanique quantique, à une clarification importante ; celle-ci n'évacue pas le problème de la conscience, mais permet de le ramener à quelque chose de plus externe encore – c'est-à-dire de désintriquer mécanique quantique à proprement parler et problème de la conscience.

Michel Bitbol. Le projet que vous avancez vise à désintriquer suffisamment le problème d'interprétation de la mécanique quantique du problème de l'intentionnalité humaine et de la conscience. Mais alors, je vous demande : pour *qui* vaut ce projet de désintrication ? À quel sujet intentionnel, à quel être conscient importe-t-il d'affranchir sa science de l'intentionnalité et de la conscience ? Vous voyez, je joue mon rôle !

Matteo Smerlak. Je ne suis pas obligé de répondre !

Carlo Rovelli. Je partage complètement ce qu'a très bien dit Matteo. Je ne veux ni nier le problème, ni nier qu'il se distingue de la mécanique quantique. L'effort consiste à faire tout son possible pour les séparer. Mais la question reste. Est-ce que je pense que l'effort a un degré de succès ? J'aimerais répondre oui, dans le sens où l'effort réduit la mécanique quantique à quelque chose où on ne parle que de systèmes physiques, d'événements quantiques, de valeurs qui ont des observables quantiques. Mais le succès a un prix, qui est un prix élevé et qui rouvre la connexion avec le problème que vous évoquez. Ce prix, c'est que la notion de réalité de laquelle on parle s'affaiblit, comme l'a dit précédemment Monsieur d'Espagnat, bien plus que la notion de vitesse quand Descartes, Galilée ou Copernic se rendirent compte que la vitesse ne veut rien dire, sinon

en référence à un autre objet. Il est vrai que les propriétés physiques (le fait d'être un spin up et down) sont relatives à notre système physique. Mais c'est beaucoup plus que cela. C'est le fait même qu'un certain événement se soit réalisé ou non qui est relatif. Je suis donc obligé de dire que par rapport à un certain système physique, telle chose va se passer – mais qu'elle ne se passera pas par rapport à un autre système physique.

Il y a donc un affaiblissement de la notion de réalité. Il est plus difficile de décrire la réalité comme une suite d'événements univoques. La réponse est donc, autant que possible, dans une direction positive : essayons de séparer les problèmes. Mais le prix à payer est celui que je viens de décrire.

Hervé Zwirn. Je suis complètement d'accord. Je prenais l'exemple – certes caricatural – de deux personnes qui se parlent et dont l'une a l'impression d'être en train de discuter de la mécanique quantique relationnelle, tandis que l'autre pense être en train de raconter son séjour de ski dans les Alpes. En fait, ni l'une ni l'autre n'a raison ou tort. Simplement, elles ne peuvent pas se rendre compte, chacune, d'une incohérence. La réalité en elle-même n'a pas de sens, puisqu'elle n'est pas collapsée. Elle est la superposition de l'ensemble des choses. Elle ne doit être exprimée que relativement à chacun des observateurs. Cela signifie que la notion de réalisme habituelle est complètement balayée.

Jean Petitot. Vous avez souvent fait le parallèle avec la relativité classique – parallèle que faisait déjà Vladimir Fock, dans les années trente. Il disait explicitement que le problème de la mesure et des appareils de mesure en mécanique quantique devait être considéré comme une généralisation stricte du principe de relativité. Dans toutes les théories avec relativités, effectivement, il y a une perte de réalisme. En général, on pose au départ des entités qui ont, pense-t-on, une certaine réalité, puis on constate qu'elles sont relatives, qu'il y a un groupe de relativité, et elles perdent donc leur réalité. Cela a été, par exemple, le cas pour la vitesse, avec la relativité galiléenne. A l'époque, il a été extraordinairement traumatisant de considérer que la vitesse n'était pas une propriété des corps. Mais au delà des principes de relativité on récupère quand même des invariants. Ma question est donc la suivante. Vous introduisez une nouvelle relativité, dans votre point de vue relationnel, qui affaiblit ou même fait disparaître la réalité de l'état quantique. Mais vous devriez donc, quelque part, récupérer de nouveaux invariants puisqu'il ne peut pas y avoir de relativité sans invariant. Ce serait quoi, ces nouveaux invariants ?

Jean-Pierre Gazeau. Les spectres.

Roger Balian. C'est l'algèbre des observables.

Jean Petitot. Ces invariants seraient alors des C-star algèbres, ou des choses comme cela. Cela nous conduit formellement vers tout un ensemble de réflexions mathématiques.

Carlo Rovelli. C'est une façon très mathématisée de penser. Je pense que les invariants sont d'abord les spectres, c'est-à-dire un ensemble de possibilités, et les amplitudes de transition. Étant donné une certaine suite d'événements quantiques, la probabilité d'en avoir un est un nombre défini qui est fixe.

Jean Petitot. Mais ces invariants sont déjà dans les théories non relationnelles. ils ne sont pas nouveaux. La question que je vous pose est : comment retrouvez-vous ces choses déjà connues dans votre approche qui se veut plus fondamentale ? C'est un petit peu comme quand on essaie de trouver des axiomes informationnels qui permettraient de récupérer des choses déjà connues.

Alexei Grinbaum. L'histoire de la reconstruction de la mécanique quantique (Matteo Smerlak a déjà fait référence à ce concept dans l'exposé introductif) essaie de répondre à cette question. La tentative de reconstruire, qui actuellement ne peut pas du tout être considérée comme aboutie, est celle de dériver mathématiquement le contenu formel de la théorie quantique.

Jean Petitot. C'est la question que je posais.

Roger Balian. N'est-ce pas déjà fait ? N'est-ce pas l'algèbre des observables ?

Alexei Grinbaum. Non.

Carlo Rovelli. On connaît le point de départ. On connaît le point d'arrivée. Car on sait quelle est la partie invariante de la mécanique quantique. Si je mesure un spin selon Oz, puis si je le mesure selon Ox, la probabilité d'obtenir lors de cette seconde mesure, la réponse + est de 50 %. La relation entre ces deux mesures est un nombre fixe, qui dit quels sont les processus physiques possibles dans le monde et quelles sont leurs caractéristiques intrinsèques. Cela donne donc quelque chose d'objectif.

Roger Balian. C'est dans l'algèbre.

Carlo Rovelli. Mais il manque quelque chose. Le résultat qu'on aimerait avoir est le suivant. Vu cette interprétation, vu cette façon de penser la mécanique quantique – ce postulat physique clair et simple selon lequel il y a des éléments quantiques, qui sont relatifs à des systèmes – c'est un fait de la nature que je prends pour vrai que, donné un certain ensemble d'événements quantiques, on peut calculer la probabilité des événements suivants. Je prends cela comme un postulat. Est-ce que, sur la base de ce postulat, on peut reconstruire toute la mécanique quantique ? La réponse est : « presque ». Ou « oui », en ajoutant quelques détails techniques. Si l'on pouvait s'éloigner de ces détails techniques, on serait très content. Mais ils sont encore là. Et ils nous disent que dans cette probabilité qu'on pense avoir trouvée, en vérité, il manque quelque chose.

Alexei Grinbaum. Sur le chemin, vous découvrez en fait que ces détails techniques ne sont pas si techniques que cela, car ils sont très profonds.

Carlo Rovelli. Oui.

Catherine Pepin. Pouvez-vous préciser ce que sont ces détails ?

Alexei Grinbaum. Un premier exemple pourrait être l'existence des transformations continues et inversibles entre les états purs – c'est-à-dire l'origine de la notion de continuité qui fait partie du formalisme de la mécanique quantique. Pendant l'exposé de Matteo Smerlak, à

aucun moment vous n'avez entendu le mot « continuité ». Le postulat qui mène à cette continuité doit être ajouté, quelle que soit la tentative d'axiomatisation logique ou informationnelle. Vous ne pouvez pas faire sans. Et la démarche qui consiste à essayer de comprendre l'origine de ce postulat – par quoi peut-on le remplacer ? – est un thème en soi.

Bernard d'Espagnat. Merci. Nous avons eu une discussion passionnante où nous avons, me semble-t-il, abordé (mais pas épuisé !) l'essentiel des questions qui se posent à nous. Convient-il de continuer par une deuxième réunion consacrée au même sujet ? La réponse n'est pas évidente. Il me semble que si nous devons faire une deuxième session, il serait bon que quelqu'un parmi nous relance la discussion.

Alexei Grinbaum. Michel et moi-même avons travaillé sur des plans assez différents : Michel sur un plan plus philosophique, et moi sur un plan plus technique. Nous pourrions peut-être nous exprimer 10 minutes chacun.

Michel Bitbol. D'accord.

Bernard d'Espagnat. Voilà qui résout le problème.. Nous nous réunirons donc ici le 12 mars, à 16 heures 30.