

Physical Relations or Functional Relations¹ ?

A non-metaphysical construal of Rovelli's Relational Quantum Mechanics

Relations physiques ou relations fonctionnelles ?

Une lecture non-métaphysique de l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique de Rovelli

Michel Bitbol

CREA, CNRS / Ecole Polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris

To appear as a chapter of : M. Bitbol, *De l'intérieur du monde*,
Forthcoming

Abstract

Rovelli's RQM is first characterized by contrast with both Everett's and Bohr's interpretations of quantum mechanics. Then, it is shown that a basic difficulty arises from the choice of formulating RQM in a naturalistic framework. Even though, according to Rovelli's interpretation, statements about the world only make sense relative to certain naturalized observers described by means of quantum mechanics, this very meta-statement seems to make sense relative to a sort of super-observer which does not partake of the naturalized status of ordinary observers. The difficulty is solved by substituting functional reference frames for physical (or naturalized) observers throughout. Instead of being relative to physical observers, statements about the state vector of physical systems are here relative to well-defined *projects of probabilistic prediction* which may be embodied by several physical observers.

1. Introduction : présentation de la « mécanique quantique relationnelle »

Le point de départ historique de la « mécanique quantique relationnelle » de C. Rovelli² est une comparaison avec la théorie de la relativité restreinte. La contribution principale d'Einstein, rappelle Rovelli, ne fut pas d'élaborer le formalisme mathématique de sa théorie (qui existait déjà pour l'essentiel à la suite de son élaboration par Lorentz). Elle consista à réinterpréter ce formalisme en le dérivant d'axiomes qui portaient non plus directement sur la constitution supposée du monde, mais sur les contraintes

¹ I here want to thank Carlo Rovelli, Bas Van Fraassen, and Matteo Smerlak, for many fruitful discussions about these issues.

² C. Rovelli, « Relational quantum mechanics », *International Journal of Theoretical Physics*, 35, 1637-1657, 1996 (arXiv: quant-ph/9609002); C. Rovelli and F. Laudisa, « Relational quantum mechanics », *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2002 (<http://plato.stanford.edu/entries/qm-relational/>); F. Laudisa, « The EPR Argument in a Relational interpretation of quantum mechanics », arXiv: quant-ph/0011016

de la relation cognitive avec le monde ; non plus sur de douteuses interactions entre l'éther électromagnétique et la matière, mais sur une analyse réflexive de l'évaluation expérimentale de la simultanéité, de la durée et des distances. L'interprétation « relationnelle » de la mécanique quantique se voit assigner le même objectif, à ceci près que la relation cognitive n'est plus invoquée pour redéfinir les seules déterminations métriques spatio-temporelles, mais la *totalité* des déterminations attribuables à un système physique. Mieux, ce ne sont pas seulement les « propriétés », ou valeurs de variables mesurées, qui ne se voient attribuer de signification que relative à un dispositif expérimental. Ce sont également les « états » quantiques, dont toute raison de porter ce nom disparaît ainsi : un authentique *état* caractériserait un système physique en lui-même, alors que les « états » quantiques expriment ses relations avec divers autres systèmes physiques parmi lesquels les appareils de mesure et les observateurs.

Comment Rovelli arrive-t-il à la conclusion que les « états » quantiques sont eux-mêmes relationnels ? En s'appuyant sur une remarque sans cesse repensée depuis la parution du traité de Von Neumann³ en 1932.

Considérons un système dont l'« état » quantique a la forme d'une superposition linéaire de vecteurs propres d'une certaine observable⁴. Le devenir de cet état à la suite d'une expérience tend à être décrit très différemment par un observateur participant au processus expérimental, et par un observateur extérieur à ce processus.

Pour le premier observateur, *impliqué* dans l'acte expérimental consistant à mesurer cette observable sur ce système, une valeur unique a été obtenue lors de cette mesure. Dès lors, selon ce même observateur, l'« état » à attribuer au système après la mesure, afin d'évaluer le plus économiquement possible les probabilités de valeurs d'autres observables qui pourraient être mesurées par la suite sur ce système, est identique au vecteur propre correspondant à la valeur unique obtenue⁵. On dit que la superposition initiale a été « réduite » à l'un des vecteurs propres de l'observable. C'est ce processus élémentaire de manipulation symbolique

³ J. Von Neumann, *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, Réédition Jacques Gabay, 1988

⁴ Autrement dit, le vecteur d'état attribué au système sur lequel une certaine observable X doit être mesurée, s'écrit : $|\psi\rangle = \sum_i c_i |x_i\rangle$.

⁵ Si le résultat qu'obtient ce premier observateur est x_i , le vecteur d'état qu'il attribue au système après la mesure est $|x_i\rangle$. L'état du système semble avoir « sauté » de $|\psi\rangle = \sum_i c_i |x_i\rangle$ à $|x_i\rangle$ au décours de la mesure. On dit que l'état $|\psi\rangle$ a subi une « réduction », bien qu'en vérité l'état $|\psi\rangle$ ait été purement et simplement *remplacé* par l'état $|x_i\rangle$ à des fins d'optimisation de la simplicité des prédictions ultérieures. D'après l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique, $|x_i\rangle$ représente l'état du système *relativement à l'observateur I*.

qui a suscité des discussions sans fin sur le concept de « réduction de l'état », sur son objectivité ou sa subjectivité, sur son « mécanisme » s'il est objectif, sur le rôle de la conscience ou de la gravitation dans sa réalisation etc. Mais les problèmes ne s'arrêtent pas là.

La symbolisation du processus de mesure à laquelle doit avoir recours un second observateur, *extérieur* à l'acte expérimental et n'ayant aucune connaissance d'une valeur mesurée, est profondément différente. Aux yeux de cet autre observateur, le système ne peut pas se voir attribuer de vecteur d'état en propre à la suite de la mesure (tout au plus, nous l'avons dit, un opérateur statistique « trace partielle » qui porte la marque d'une intrication avec un ou plusieurs autres systèmes). Seul l'ensemble (système+appareil+observateur1) a, selon l'observateur 2, un vecteur d'état globalement bien spécifié *après* la mesure. Et on peut montrer, en appliquant l'équation de Schrödinger à l'évolution de l'ensemble, que son vecteur d'état global a lui-même la forme d'une superposition linéaire, exactement isomorphe à celle du système *avant* la mesure⁶.

De cette apparente incompatibilité entre deux caractérisations du processus de mesure, l'une qui fait appel au seul « postulat de réduction », et l'autre qui s'appuie entièrement sur le compte-rendu de l'évolution et de l'intrication des vecteurs d'état fourni par l'équation de Schrödinger, est né le « problème de la mesure ». Est-il pensable qu'un système soit *et* ne soit pas dans un « état » déterminé ? Est-il concevable que l'état de la chaîne de mesure (système+appareil+observateur1) évolue discontinûment *et* continûment ? Est-il envisageable que cet état soit brutalement réduit *et* qu'il évolue conformément à l'équation de Schrödinger ? Quel *est* l'« état réel » de la chaîne de mesure à la suite de l'acte expérimental ? *Est-ce* un état *réduit* correspondant à l'un des vecteurs propres de l'observable mesurée sur le système, comme dans le premier compte rendu, ou bien *est-ce* une superposition linéaire comme dans le second compte rendu ? Comment accorder les deux comptes rendus contradictoires ? Par quel improbable « mécanisme » passer de l'un à l'autre ?

Ce que propose C. Rovelli est de dissoudre le conflit en considérant que ses deux protagonistes n'ont strictement aucun terrain commun sur lequel se rencontrer, et donc aucune contradiction à constater. Prenant à la lettre la

⁶ Avant la mesure, le second observateur attribue le vecteur d'état $|\Phi_0\rangle$ à l'appareil de mesure et le vecteur d'état $|O_{(1)}\rangle$ à l'observateur 1. Toujours avant la mesure, l'ensemble (système+appareil+observateur 1) est associé par le second observateur au vecteur d'état global produit tensoriel des trois précédents: $|\Psi\rangle = |\psi\rangle |\Phi_0\rangle |O_{(1)}\rangle = (\sum_i c_i |x_i\rangle) |\Phi_0\rangle |O_{(1)}\rangle$. Appliquant ensuite l'équation de Schrödinger, le second observateur calcule qu'au décours de l'interaction entre système, appareil, et observateur 1, le vecteur d'état de l'ensemble s'écrit sous la forme d'une superposition linéaire non-factorisable: $|\Psi'\rangle = \sum_i c_i |x_i\rangle |\Phi_i\rangle |O_{(1)i}\rangle$. D'après l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique, $|\Psi'\rangle$ représente l'état de l'ensemble (système+appareil+observateur 1) *relativement à l'observateur 2*.

mise en rapport précédente entre les états et les différents observateurs, il souligne que chacun des comptes rendus ne vaut que dans le domaine cognitif spécifique d'une certaine classe d'observateurs : soit ceux qui sont impliqués, soit ceux qui ne sont pas impliqués dans le processus de mesure. *Relativement* à l'observateur 1, impliqué dans le processus de mesure, une valeur déterminée a bien été obtenue, et l'état du système est bien identique au vecteur propre correspondant. *Relativement* à l'observateur 2 non-impliqué dans le processus de mesure, par contre, aucune valeur n'est privilégiée et le seul « état » pertinent est celui, continûment superposé, de l'ensemble (système+appareil+observateur1). Cela n'a aucun sens, martèle Rovelli, de demander quel *est* l'état du système dans l'absolu, quel *est* celui des deux états qui reflète une réalité indépendante des considérations cognitives, car tout état quantique reflète la relation entre le système et un autre système ayant le statut d'observateur. Il n'y a pas *un* état de système, mais *des* états relatifs.

2. Rovelli entre Everett et Bohr

Essayons à partir de là de situer la conception relationnelle de Rovelli dans la constellation des interprétations connues de la mécanique quantique. À première vue, l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique devrait avoir plus d'affinités avec la « théorie des états relatifs » d'Everett⁷ qu'avec la plupart des autres interprétations. Le thème lexical commun des mots « relationnel » et « relatif » le laisse supposer⁸. C. Rovelli ne se fait d'ailleurs pas faute d'esquisser un rapprochement. Mais il souligne aussi les différences, qui ne sont pas du tout négligeables. La principale différence qu'il identifie est la suivante : « Selon l'interprétation relationnelle, après la (...) mesure, la quantité q a une et une seule valeur déterminée pour (l'observateur) O_1 ; tandis qu'en termes everettiens, la quantité q a une valeur pour un état de O_1 , et une autre valeur pour un autre état de O_1 , les deux étant également réelles »⁹. Dans l'interprétation relationnelle, *une* valeur *unique* est considérée par un observateur impliqué dans l'expérience et occupant *un* état *unique*, comme la *seule* valeur qui a été effectivement obtenue. Alors que dans l'interprétation des « états relatifs », *chacune* des valeurs possibles est réalisée, non pas certes dans

⁷ B.S. De Witt & N. Graham (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973; voir aussi M. Bitbol, *L'aveuglante proximité du réel*, Flammarion, 1998, §7-3

⁸ Certains auteurs se sont d'ailleurs laissés prendre à cette analogie verbale, et ont reproché à l'interprétation de Rovelli des difficultés propres à l'interprétation d'Everett. Voir J.A. Barrett, *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford University Press, 1999

⁹ C. Rovelli and F. Laudisa, « Relational quantum mechanics », *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2002, loc. cit.

l'absolu, mais relativement à *chacun* des états possibles correspondants de l'observateur. Dans l'interprétation relationnelle, un seul terme de la superposition linéaire initiale est sélectionné par l'observateur participant au processus de mesure; alors que dans l'interprétation des « états relatifs », toute la superposition linéaire est conservée, et l'observateur est démultiplié en autant d'états, voire de contreparties de lui-même, que de résultats expérimentaux possibles (chacune des contreparties constatant l'un de ces résultats possibles).

Cette différence est tellement considérable qu'elle interdit de tenir l'« interprétation relationnelle » pour un membre un peu dissident de la famille des interprétations everettiennes à états relatifs. L'« interprétation relationnelle » se situe en fait à égale distance de deux interprétations qu'il est habituel de considérer comme antinomiques : celle des « états relatifs » d'Everett et celle de Bohr. Pour le comprendre, il faut commencer par faire ressortir les choix philosophiques qui caractérisent les deux interprétations.

L'interprétation de Bohr et l'interprétation des états relatifs d'Everett se caractérisent par deux biais opposés. En peu de mots, on pourrait dire que Bohr a un fort penchant en faveur du phénomène, tandis qu'Everett a un penchant symétrique en faveur du noumène. Bohr favorise le concret des événements de laboratoire, tandis qu'Everett favorise la construction intellectuelle de la théorie physique. Bohr s'appuie sur une forme ouvertement instrumentale de la mécanique quantique. Tandis qu'Everett en développe une version abstraite rendue aussi autonome que possible par rapport aux occurrences actuelles du laboratoire. Everett retient en fait ce qu'il est convenu d'appeler la « mécanique quantique unitaire », dans laquelle les « états » n'évoluent que continûment, sous l'action des opérateurs unitaires d'évolution dérivés de l'équation de Schrödinger, sans jamais subir des processus discontinus de « réduction ».

Selon la grille de lecture de l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique, Bohr accorde une priorité méthodologique exclusive au compte-rendu du premier observateur, celui qui est impliqué dans le processus de mesure. C'est pour cet observateur qu'une seule valeur donnée de l'observable mesurée est actualisée. Sur la foi du privilège accordé au compte-rendu du premier observateur, Bohr va dès lors jusqu'à n'accorder de consistance qu'au *phénomène* singulier exprimé par la valeur qu'il obtient, et à ne voir dans les vecteurs d'état (y compris le vecteur d'état global posé par le second observateur *non* impliqué dans le processus de mesure) que de purs symboles prédictifs sans le moindre contenu représentatif. De façon assez similaire à Bohr (au moins dans un premier temps), « l'interprétation relationnelle considère les événements quantiques q_i , c'est-à-dire les actualisations de valeurs de quantités physiques, comme

les *éléments de base de la réalité* ; et ces q_i sont supposés univoques »¹⁰. Ce sont bien (comme chez Bohr) les valeurs obtenues au laboratoire, les purs phénomènes, qui se voient qualifiés de « réels » par l'interprétation relationnelle. La seule différence avec Bohr, mais elle n'a rien de mineur, est que dans l'interprétation relationnelle, il est explicitement indiqué que la variable q n'a de valeur déterminée que *relativement* à l'observateur O_1 , et qu'elle n'en a *a priori* aucune relativement à l'observateur O_2 . L'attribution d'une valeur déterminée de variable n'a donc « (...) aucune signification objective, ou plus précisément aucune signification indépendante de l'observateur »¹¹. *Réelle mais non indépendante du rapport à un observateur : la réalité est ici pensée elle-même comme relationnelle.*

À l'inverse, nous l'avons souligné, Everett accorde une priorité méthodologique absolue (qui tend à se transformer en priorité ontologique) au compte-rendu du second observateur, celui qui n'est pas impliqué dans le processus de mesure. C'est pour ce second observateur que le processus de mesure prend la forme abstraite d'un développement temporel de vecteurs d'état suivant l'équation de Schrödinger. C'est également pour lui que le seul vecteur d'état pertinent est celui de l'ensemble (système+appareil+observateur1), qui reste en permanence une superposition linéaire et ne se « réduit » donc jamais à l'un de ses termes correspondant à une valeur mesurée particulière. C'est toujours pour ce second observateur qu'il y a un sens à imaginer autant de contreparties du premier observateur, que de termes de la superposition linéaire et de résultats expérimentaux possibles. Mais si, comme le pensent certains partisans de l'interprétation d'Everett qui hypostasient ce compte-rendu, seul *existe* un « vecteur d'état universel », quel peut être le statut des vecteurs d'état partiels (représentés par chacun des termes de la superposition linéaire du vecteur d'état universel), des valeurs déterminées de variables, et plus généralement des phénomènes expérimentaux ? Leur statut est seulement selon eux celui d'*effets de perspective locaux*. Chaque valeur q_i ne vaut que du point de vue d'une contrepartie de l'observateur O_1 dont l'état (la situation, la perspective) est indexé par i . Alors que le compte-rendu des observateurs désengagés de type O_2 est absolutisé, le compte-rendu des observateurs engagés de type O_1 est supposé n'avoir de pertinence que relative. La description donnée par les observateurs de type O_2 s'exprime par des termes et symboles dénués de référence explicite à une situation, tandis que celle que fournissent les observateurs de type O_1

¹⁰ C. Rovelli and F. Laudisa, « Relational quantum mechanics », *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2002, loc. cit.

¹¹ C. Rovelli, « Relational quantum mechanics », loc. cit.

est censée utiliser des termes *indexicaux* (ou *déictiques*). Un observateur O_2 se voit accorder le droit de dire « la chaîne de mesure *est* dans tel état », alors qu'une contrepartie de O_1 doit se limiter à dire « *relativement à moi*, le système est dans tel état (réduit) ». L'absolutisation de ce qui vaut pour des observateurs désengagés de type O_2 a pour corrélat la mise en place d'un espace modal dans lequel l'énoncé d'une valeur mesurée univoque, par des observateurs engagés de type O_1 , ne compte que comme expression d'un angle de vue partiel, parmi beaucoup d'autres angles de vue correspondant à autant de valeurs mesurées différentes. La compatibilité des deux types de comptes rendus est assuré à ce prix dans l'interprétation d'Everett : l'un (celui de O_2) est conforme à la réalité « vue de nulle part » ; l'autre (celui de O_1) se contente de traduire une apparence visible de quelque part, une simple facette parmi toutes celles que comporte la réalité décrite par O_2 .

Mais dans l'interprétation relationnelle, aucun des deux types de compte rendu n'est favorisé et encore moins absolutisé. Il n'est pas question de dire que le compte rendu de O_1 traduit seulement une apparence, car le compte rendu de O_2 ne traduit pour sa part aucune réalité plus intrinsèque que celle de O_1 . Il n'est pas question de créer un espace modal pour y situer l'assignation d'une valeur déterminée d'observable par O_1 , parce que cette assignation de valeur est *unique* relativement au seul type d'observateur qui soit habilité à la faire : celui des observateurs *impliqués* dans le processus de mesure. Il n'est pas davantage question de tenir pour description d'une réalité absolue le vecteur d'état global de l'ensemble (système+appareil+observateur1), parce que cette description *aussi* est relative au seul type d'observateur qui soit habilité à la faire : le type des observateurs *non-impliqués* dans le processus de mesure.

Poussée jusqu'à ses dernières conséquences, l'interprétation relationnelle rend impératif : (i) d'identifier pour *chaque* compte rendu portant sur des systèmes physiques un référentiel relativement auquel il vaut, et (ii) de considérer que chaque référentiel correspond à un observateur particulier *localisé dans l'espace et dans le temps*, ayant obtenu de l'*information* sur ces systèmes physiques en *interagissant* avec eux.

3. Les corrélations d'Einstein-Podolsky-Rosen sans non-localité

En forçant à appliquer cette procédure multi-référentielle de manière cohérente et systématique, l'interprétation relationnelle de Rovelli permet de dissoudre bien d'autres paradoxes associés à la mécanique quantique, que celui de la mesure. C'est le cas en particulier du paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen, et des surprenantes corrélations qu'il a permis de mettre

en évidence entre deux sous-systèmes ayant interagi dans le passé. Les corrélations d'Einstein, Podolsky et Rosen se manifestent ainsi : aussitôt obtenu un résultat pour la mesure d'une variable sur l'un des deux sous-systèmes (α), le second sous-système (β) peut seulement donner, comme résultat d'une *éventuelle* mesure analogue, celui qui correspond bi-univoquement au résultat déjà obtenu sur α . Autrement dit, l'obtention d'un résultat de mesure sur le premier sous-système semble spécifier *immédiatement* l'état du second sous-système, et fixer rigidement le résultat de la mesure qui pourrait être effectuée simultanément sur lui, *quelle que soit la distance entre les deux sous-systèmes au moment des mesures*. Cette étrange corrélation pourrait certes s'expliquer *a priori* en supposant que les deux sous-systèmes ont acquis des propriétés corrélées dès leur interaction initiale, et qu'ils ne font que les *manifester* bien plus tard, lorsque, se trouvant à distance l'un de l'autre, on effectue des mesures sur eux. Mais cela impliquerait, comme le pensait Einstein lui-même, que la théorie quantique soit *incomplète*, parce qu'elle ne fournit aucune indication sur les prétendues propriétés pré-déterminées. Si l'on ne retient pas l'accusation einsteinienne d'incomplétude contre la théorie quantique, il semble qu'on ne puisse expliquer la corrélation que prévoit cette théorie que comme conséquence d'une forme d'*influence instantanée, non-locale*, entre les deux sous-systèmes. Le choix est entre renoncer à l'idée de la complétude de la théorie quantique, et renoncer à la localité.

Mais ce dilemme est-elle vraiment inévitable ? M. Smerlak et C. Rovelli¹² ont montré qu'une application cohérente et systématique de l'interprétation relationnelle permet d'y échapper, en maintenant la localité sans avoir à supposer que la théorie quantique est incomplète. Pour y parvenir, ils ont commencé par passer au crible du critère de relationnalité l'affirmation selon laquelle l'état du sous-système β est instantanément déterminé par la mesure d'une certaine variable sur le sous-système α . Relativement à quel observateur localisé dans l'espace-temps, ou relativement à quel référentiel, cette affirmation pourrait-elle bien valoir ?

Pas relativement à l'observateur A effectuant la mesure sur α ; du moins pas relativement à lui *au moment* où il effectue sa mesure, et *au point de l'espace* où se trouve α . Car, à ce moment et en ce lieu, il n'existe aucune possibilité pour lui d'obtenir des informations sur ce que constate l'observateur B, localisé au voisinage de β , et susceptible de faire subir à β une mesure simultanée.

¹² M. Smerlak & C. Rovelli, « Relational EPR », *Foundations of Physics*, 37, 427-445, 2007 ; également : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0604064>. Un raisonnement assez proche avait été développé auparavant dans : M. Bitbol, « An analysis of the Einstein-Podolsky-Rosen correlations in terms of events », *Physics Letters* 96A, 66-70, 1983

Pas non plus relativement à l'observateur B à l'instant où il effectue sa mesure simultanée sur β , *au voisinage* de β . Car l'observateur B, à ce moment et en ce lieu, est symétriquement dans l'incapacité d'obtenir des informations sur ce que fait et constate A. S'il obtient un résultat à propos de β , l'observateur B ne sera en mesure de le comparer avec ce qu'a obtenu A, et de constater la corrélation, que bien après sa mesure : lorsqu'il pourra recevoir l'information envoyée par A à une vitesse qui, selon les axiomes de la relativité restreinte¹³, est *au plus égale à la vitesse de la lumière*.

En définitive, l'affirmation de corrélation entre la mesure effectuée sur α et la mesure effectuée sur β ne vaut que rétrospectivement ; elle est *relative* à un observateur qui s'est laissé le temps de recueillir l'information en provenance de l'autre observateur. Elle n'implique donc aucune influence non-locale à l'instant où les mesures sont effectuées. De plus, rien n'empêche de considérer que la théorie quantique est complète dans son inventaire des déterminations et états relatifs à tous les référentiels possibles, même si elle n'a rien à dire sur d'illusoires déterminations et états absolus. La tenaille argumentative d'Einstein se trouve ainsi désarticulée : la théorie quantique peut parfaitement être locale *et* complète. La théorie quantique est locale *et* complète, pour peu qu'on ne lui demande pas de donner des indications sur un domaine ontologique (celui des déterminations et états absolus) qui n'a aucune pertinence pour elle.

4. Même la compatibilité des compte-rendus d'observateurs est *relative* à l'un d'entre eux

Si l'interprétation relationnelle apporte des réponses, elle semble aussi laisser subsister une grande question : celle de la compatibilité des deux sortes de comptes rendus, celui de l'observateur O_1 (impliqué dans le processus de mesure) et celui de l'observateur O_2 (non-impliqué dans le processus de mesure). Cette compatibilité était assurée dans l'interprétation d'Everett par : (a) une alternative réglée de l'apparence et de la réalité (le compte-rendu de O_1 étant supposé apparent, et le compte-rendu de O_2 étant tenu pour une description de la réalité), ou (b) une alternative réglée des comptes rendus relatifs (ceux de chaque contrepartie de O_1) et des comptes rendus absolus (ceux de O_2). Par ailleurs, la compatibilité des comptes rendus engagé et désengagé était assurée dans l'interprétation de Bohr par une dialectique de l'actuel (le phénomène, se manifestant à O_1) et du

¹³ Invoquer ici les axiomes de la relativité restreinte à propos de la vitesse de transmission de l'information semble relever de la pétition de principe, mais il n'en est rien. Même les défenseurs de la non-localité quantique admettent aujourd'hui qu'il est impossible de s'en servir pour transporter de l'information, et que cette dernière est toujours soumise à la limitation relativiste.

symbolique (le formalisme prédictif pour des phénomènes futurs, utilisé par O_2). Or, dans l'interprétation relationnelle, on ne peut adopter aucun de ces deux procédés. Car d'un côté, il ne devrait y avoir aucun absolu à opposer au relatif, aucune réalité plus réelle que les phénomènes (pas plus celle décrite par un « vecteur d'état universel » que n'importe quelle autre), aucun « point de vue de nulle part » à partir duquel distinguer entre ce qui est « en soi » et ce qui est seulement relatif. Et d'un autre côté, on ne devrait pas admettre que l'un des deux comptes rendus a une dignité moindre que l'autre (l'un exprimant l'actualité concrète, l'autre seulement une anticipation symbolique). La seule ressource, pour assurer la compatibilité des deux comptes rendus, consiste dès lors à pousser un cran plus loin le déploiement du réseau des relations.

Après tout, la compatibilité des comptes rendus de O_1 et O_2 est une question qui n'a aucun sens en dehors et au-dessus de ce que des observateurs ayant une position déterminée sont en mesure d'indiquer. Elle n'admet de réponse que relativement à un observateur ayant entrepris de la tester en interagissant avec O_1 et O_2 . La réponse s'impose soit relativement à O_2 s'il a interagi avec O_1 et s'est donc à son tour impliqué dans le processus de mesure, soit relativement à un troisième observateur O_3 qui, interagissant avec les deux premiers, établirait du même coup une relation entre eux. Or, il se trouve que dans ces cas, la structure de la mécanique quantique assure une cohérence complète des comptes rendus, et que la réponse à la question de la compatibilité s'avère automatiquement positive. Dans le vecteur d'état de l'ensemble (système+appareil+ O_1), tel que le formule O_2 à des fins prédictives, se manifeste une stricte corrélation entre la valeur de l'observable pour le système, l'indication fournie par l'appareil, et la lecture qu'en effectue O_1 . Or, O_2 peut aisément être inclus lui-même (en tant que corps-objet décrit en troisième personne) dans un ensemble plus vaste (système+appareil+ O_1 + O_2), auquel O_3 attribue un vecteur d'état. L'observateur O_2 peut alors voir décrire sa propre interaction avec le système, l'appareil et O_1 au moyen de l'équation de Schrödinger. Le résultat de cette opération est qu'il y a une fois de plus une stricte corrélation entre les divers protagonistes du processus de mesure; cette fois entre la valeur de l'observable pour le système, l'indication fournie par l'appareil, la lecture qu'en effectue O_1 et celle qu'en effectue O_2 . Il est donc anticipé qu'en cas d'interaction mutuelle, la valeur lue par O_2 (en tant que corps propre décrivant les phénomènes en première personne) serait nécessairement identique à celle de O_1 . Une fois l'observateur O_2 impliqué dans le processus d'interaction expérimentale, l'accord avec O_1 ne peut être que complet, la compatibilité ne peut être que totale *relativement à lui*. Et hors d'une telle relation, redisons-le, la

question de la compatibilité entre comptes rendus n'a strictement aucun sens.

5. Un reste d'absolu dans l'interprétation relationnelle : l'aporie de la naturalisation

Par rapport à l'interprétation everettienne des « états relatifs », l'« interprétation relationnelle » de Rovelli représente incontestablement une avancée de la relativisation des déterminations en physique quantique. Mais cette avancée reste inaboutie, parce que l'« interprétation relationnelle » suppose encore, bien qu'assez discrètement, une forme d'absolutisation : l'absolutisation du point de vue à partir duquel sont établies ses propres méta-descriptions. En allant jusqu'au bout de la perspective tracée, on devrait se demander *pour qui* vaut la méta-description d'un système en relation avec un appareil et un observateur, acceptée jusque-là comme « donnée ». On devrait chercher à préciser relativement à *quel* référentiel cognitif les présuppositions tacites d'*existence* d'un système, d'un appareillage, et d'une interaction causale-productive entre ce système et cet appareillage peuvent revendiquer une validité. On devrait en somme accepter de perdre les derniers filets de sécurité intellectuelle hérités de la physique classique, pour aller au bout de la procédure de relativisation¹⁴. S'abstenir d'une telle interrogation et d'une telle radicalité, c'est favoriser les malentendus et s'exposer à une remise en cause de l'acquis de la procédure de relativisation. Examinons ces possibles malentendus tour à tour.

Premier malentendu: absolutiser le système dans son existence si ce n'est dans ses déterminations accessibles, a pour conséquence de laisser penser qu'il y a « en lui » quelque chose qui n'a pas été épuisé par la connaissance expérimentale qu'on « en » a. Le programme d'une théorie à variables cachées (c'est-à-dire à propriétés intrinsèques des systèmes) est ainsi tracé *nolens volens*.

Ce penchant vers les variables cachées se manifeste d'ailleurs à travers un *second malentendu*. Remarquons en effet que Rovelli nous incite à nous représenter simultanément (d'un point de vue méta-descriptif), ce qui vaut pour O_1 et pour O_2 . Selon O_1 , un résultat (disons x^*) a été effectivement obtenu, tandis que selon O_2 , l'ensemble (système+appareil+ O_1) est dans un état superposé. Bien sûr, lorsque O_2 rencontrera O_1 , lorsqu'il aura interagi avec lui, l'accord se fera immédiatement entre eux au sujet de celui des résultats qui a été obtenu.

¹⁴ M. Brown, « Relational Quantum Mechanics and the Determinacy Problem », <http://philosci-archive.pitt.edu/archive/00002824>

Mais, du point de vue d'un méta-descripteur, il est clair qu' *avant* sa rencontre avec O_2 , l'observateur O_1 était *déjà* dans l'état où il atteste l'obtention du résultat x^* et qu' O_2 ne peut donc plus que se ranger à son avis. Il semble que l'accord sur le résultat x^* obtenu par O_1 était pré-déterminé. Or, la traduction la plus naturelle de cette pré-détermination est la suivante: « *en réalité* », le résultat de l'expérience *est* x^* , et O_2 n'a plus qu'à le constater. Le constat par O_2 de n'importe quel autre résultat est certes rendu possible par le vecteur d'état superposé qu'il attribue à l'ensemble (système+appareil+ O_1). Mais le constat par O_2 d'un autre résultat que x^* devrait se faire également en accord avec O_1 , ce qui impliquerait que O_1 change brusquement d'avis au sujet de ce qu'il a observé et qu'il nie ainsi une part de son histoire¹⁵. Ces considérations nous conduisent inexorablement à une conclusion que Rovelli aurait pourtant voulu éviter. Celle que le vecteur d'état global superposé attribué par O_2 à l'ensemble (système+appareil+ O_1) avant d'avoir interagi avec lui, n'exprime que l'ignorance dans laquelle se trouve O_2 au sujet du résultat x^* *réellement* obtenu au laboratoire de O_1 . Celle par conséquent qu'une *variable cachée* doit être associée au résultat x^* : la variable qui sélectionne ce résultat entre tous dans le vecteur d'état superposé utilisé par O_2 .

Le problème est ici que le méta-point de vue qui permet au théoricien de voir les deux observateurs O_1 et O_2 comme en surplomb nous trompe. Il nous fait oublier que la comparaison que nous essayons de faire entre leurs situations, et entre les vecteurs d'état qu'ils sont portés à utiliser, ne vaut en droit qu'à condition que nous ayons nous-mêmes interagi avec eux. Et dans ce dernier cas, le problème de se poserait plus puisque, selon la prédiction quantique, nous ne pourrions pas éviter de constater un accord total entre eux deux et nous au sujet du résultat expérimental. La mécanique quantique prévoit cet accord en cas d'interaction, et ne dit absolument rien de ce qui arrive à des observateurs qui n'ont jamais interagi. Libre à nous de l'imaginer, à partir d'un méta-point de vue; mais cette liberté que nous prenons ne doit pas nous inciter à croire que ce que nous nous sommes figurés par commodité représente « la réalité », une réalité existant par-delà ce que la mécanique quantique anticipe. Pour être sûrs de ne pas tomber dans ce travers, le mieux serait alors de discipliner l'imagination, en préférant systématiquement simuler les points de vue tour à tour, plutôt que les contempler comme de l'extérieur de tout point de vue.

¹⁵ Cette objection à la théorie de Rovelli, au nom de considérations sur la mémoire des observateurs, a été soulevée par Guido Bacciagaluppi et Simon Saunders lors d'un séminaire restreint de discussion approfondie sur les questions de fondements de la physique quantique. Le séminaire s'est tenu durant l'année universitaire 2004-2005 au CREA et à l'IHPST à Paris. Je tiens ici à remercier ces deux excellents spécialistes de philosophie de la physique.

Une autre issue consiste à admettre, avec B. Van Fraassen¹⁶, que le méta-observateur abstrait de Rovelli n'a aucun titre à lever l'indétermination sur ce qu'observe O_1 et à tenir le résultat de cette observation en réserve pour l'observateur O_2 . Tout ce que peut faire le méta-observateur abstrait de Rovelli est de fixer la *forme* (et non pas le *contenu*) que peut prendre l'information disponible pour des observateurs concrets. Cette forme est « déterminée » relativement à O_1 , et « superposée » relativement à O_2 ; mais la *forme* « déterminée » n'implique aucun *contenu* précis de détermination, puisque ce dernier n'est accessible qu'à O_1 lui-même. Ainsi le compte-rendu du méta-observateur abstrait est-il rendu compatible avec l'affirmation initiale de stricte relativité des valeurs et des états à un observateur concret.

6. Relativité fonctionnelle plutôt que relativité substantielle

Il y a enfin un *troisième malentendu* que peut créer l'absence de relativisation cognitive de la description relationnelle de Rovelli. Absolutiser l'observateur concret comme ce vis-à-vis de quoi les descriptions et/ou assignations de valeurs d'observables ont une validité, cela revient à se tromper sur la nature du cadre de référence relativement auquel sont décrits des processus où sont attribuées des valeurs. Car le véritable cadre de référence est fonctionnel plutôt que substantiel. Ce qui fixe le choix entre (i) déclarer que l'observable mesurée a une valeur déterminée et éventuellement qu'une « réduction de l'état » a eu lieu, ou bien (ii) que l'ensemble (système+appareil) se trouve dans un état superposé et intriqué, ce n'est pas tant l'identité de l'observateur ou sa position dans un réseau causal que l'*usage* qu'il se propose de faire du symbolisme de vecteurs d'état. Si cet usage souhaité consiste : (a) à décrire ce qui, dans l'arrangement expérimental actuel, est accessible, qualifiable, et contrôlable à l'échelle de l'homme après l'acte de mesure (les positions d'aiguilles d'appareils, les valeurs affichées sur un écran d'ordinateur etc.), et (b) à évaluer aisément les probabilités pour toutes les mesures ultérieures portant sur le seul « système », alors le premier genre de déclaration (valeur déterminée et « réduction de l'état ») s'impose. Au contraire, si l'usage souhaité consiste (a) à prendre en compte tout ce qui, dans l'arrangement expérimental actuel, n'est *pas* contrôlable (autrement dit la teneur dispositionnelle de l'arrangement expérimental, valant comme préparation pour une mesure à venir), et (b) à prédire sur un mode probabiliste le résultat de *n'importe quelle* mesure ultérieure, y compris des

¹⁶ B. Van Fraassen, « Rovelli's world », Unpublished

mesures portant sur des systèmes composés dont le « système » initial n'est qu'une partie (comme l'ensemble (système+appareil)), alors le second genre de déclaration (valeur non-déterminée, superposition, et intrication) doit en général être préféré¹⁷. Cette répartition des orientations fonctionnelles vaut indépendamment de la position de l'observateur. En dépit de son implication dans le processus de mesure, l'observateur O_1 peut parfaitement donner son assentiment à une symbolisation dans laquelle il apparaît lui-même comme intriqué dans un vecteur d'état global superposé *si* le but qu'il assigne à cette symbolisation est de fournir des prédictions pour le résultat d'une mesure de second ordre que pourrait effectuer sur lui et sur son dispositif expérimental un second observateur (résultat que rien n'empêcherait ensuite de lui être communiqué). Réciproquement, en dépit de sa non-implication dans le processus de mesure de premier ordre, O_2 peut parfaitement donner son assentiment à un compte-rendu selon lequel un résultat bien déterminé y a été obtenu, *si* son but est simplement d'anticiper par la pensée l'univocité du constat qu'il effectuera lui-même *a posteriori* lorsqu'il entrera en relation avec O_1 , et *s'il* ne se préoccupe pas d'évaluer des probabilités *a priori* (car l'évaluation correcte des probabilités ne peut se faire pour lui qu'à partir d'un vecteur d'état superposé). Les comptes rendus sont bien en définitive relatifs à des *fonctions* immanentes à l'activité d'anticipation théorique, et non pas à des entités transcendantes comme « les observateurs ».

Le comprendre permet de désamorcer d'emblée le second malentendu qui a été exposé plus haut, au sujet de la compatibilité des comptes rendus. Car ici, il n'est plus question de deux observateurs en désaccord, l'un, O_1 , affirmant qu'il a obtenu un résultat déterminé, et l'autre, O_2 , affirmant que l'ensemble (système+appareil+ O_1) est dans un état superposé. Il n'en est plus question parce qu'on n'a plus affaire à deux entités, vues de l'extérieur par une troisième, mais à des situations et à des attitudes différentes dans lesquelles chacun peut s'inscrire tour à tour. Le « désaccord » entre observateurs est ici remplacé par la divergence et la complémentarité des projets épistémiques: le premier projet vise à établir un consensus au sujet d'un « fait » expérimental, tandis que le second cherche l'outil formel optimal en vue d'une prédiction aussi précise et aussi générale que possible. Au niveau le plus immédiat, O_1 incarne le premier projet, tandis qu' O_2 incarne le second. À un méta-niveau, les mettre en accord sur un *fait* réalise le premier projet, et les mettre en accord sur un *vecteur d'état* prédictif réalise le second.

¹⁷ Sauf bien sûr si l'expérience ultérieure envisagée ou la précision cherchée sur l'évaluation probabiliste s'accommodent de la simplification occasionnée par la « réduction du vecteur d'état »

Selon l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique, il n'y a pas de « fact of the matter » sur la valeur que prend une observable pour un système, ni même sur ce qu'est l'« état réel » de ce système, indépendamment d'une observation. Pas davantage ne devrait-on admettre qu'il y a un « fact of the matter » sur ce que « sont » ou « croient » les observateurs indépendamment les uns des autres, contrairement à ce que certains lecteurs de Rovelli ont cru pouvoir faire en se fiant trop à son méta-point de vue tacite. En effet, tout énoncé sur ce qui *est* ou sur ce que les autres *croient* est conditionné par une situation cognitive qui impose l'échange et l'accord, ce qui fait disparaître du même coup l'indépendance qu'on s'était initialement figurée entre les observateurs. La relativisation est une prescription qui ne doit pas s'arrêter en chemin, et qui doit finir par concerner jusqu'au processus cognitif qui lui donne sens.

L'absolutisation résiduelle de la méta-description du processus cognitif, qui tend à créer ces malentendus à propos de la conception de Rovelli, découle en fin de compte d'un oubli important : l'oubli que les pôles de la relation invoquée doivent eux-mêmes être considérés, selon la logique de l'interprétation relationnelle poussée jusqu'à ses ultimes conséquences, comme le produit d'une relation constitutive antérieure. Mais réparer cet oubli suppose d'abandonner le point de vue naturalisant de Rovelli pour adopter un point de vue transcendantal, typique des philosophies issues de la tradition kantienne.