

Interventions dans le débat qui a suivi la conférence d'Alain Aspect sur « Les corrélations quantiques à l'épreuve de l'expérience : au-delà du réalisme local » (Séance du 17 mars 2001), *Bulletin de la Société française de philosophie*, 96^e année, n°1, janvier-mars 2002, p. 21-26.

[Après l'exposé de Alain Aspect. Intervention N° 2. M. Michel Paty, transcription vérifiée par l'auteur].

M. Michel Paty. - Je voudrais d'abord rappeler, pour l'ensemble des auditeurs, quelque chose qui n'est peut-être plus aussi évident, vingt ans après, que cela l'était vers 1981, quand on parlait beaucoup des expériences d'Alain Aspect et de son équipe qui venaient tout juste d'être réalisées. C'est que cet ensemble d'expériences connu comme "l'expérience d'Aspect" a été (et est toujours) considéré comme une très grande expérience pour la mécanique quantique.

M. Alain Aspect. - Je te remercie de le dire !

M. Michel Paty. - C'est ce que pensait notamment John Bell - notre ami commun regretté, John Bell -; il avait même écrit, dans une lettre qu'il t'avait adressée (je l'ai moi-même citée dans mon livre *La Matière dérobée*) - que c'est une expérience qui est pour la mécanique quantique ce que l'expérience de Michelson-Morley est pour la théorie de la relativité restreinte.

M. Alain Aspect. - Oui, mais tu sais bien qu'on dit qu'Einstein n'a pas été si influencé que ça par l'expérience de Michelson-Morley.

M. Michel Paty. - Oui, justement. Tu le sais bien, puisque c'est à toi qu'elle était adressée, John Bell écrivait dans sa lettre que, de même que l'expérience de Michelson-Morley n'a pas joué un rôle particulier dans la pensée d'Einstein, l'expérience d'Aspect n'a pas joué un rôle dans la pensée des fondateurs de la mécanique quantique, et pour cause...

M. Alain Aspect. - Oui, à moins de violer la causalité temporelle.

M. Michel Paty. - Elle la corrobore après coup, mais d'une manière tout à fait fondamentale, et d'ailleurs, comme tu l'as indiqué, ce n'était pas évident pour tous alors, dans le contexte de l'époque, où les physiciens admettaient la mécanique quantique sans plus de réserve, vu ses succès : un bon nombre d'entre eux pensaient que tout cela (le théorème de Bell, les corrélations à distance, l'expérience d'Aspect) n'était que des raisonnements inutiles, puisqu'on sait bien que la mécanique quantique est gagnante à tous les coups. Mais, en réalité, il y avait une faiblesse, un talon d'Achille, dans la mécanique quantique, révélé par le théorème de Bell, ce que tu as bien souligné : malgré tous ses succès dans les théories dynamiques de l'atome aux particules, il y avait un domaine, encore inexploré, celui des corrélations à distance, pour lequel il y avait une contradiction entre les prédictions de la physique quantique et celles de la localité dans certaines conditions, mais l'on ne savait pas laquelle était la bonne. C'était quelque chose qui avait besoin d'être testé.

M. Alain Aspect. - Et de plus, il y a cette surprise que je souligne à la fin, c'est-à-dire que les gens n'avaient probablement pas perçu la portée de cette intrication quantique. Je veux dire, le fait de faire ces expériences a mis en lumière la portée de cette intrication quantique avec tout ce développement de l'information quantique. On ne l'avait pas prévu au départ.

M. Michel Paty. - Tout à fait. Donc ces développements sur la non-séparabilité locale ont eu des effets extrêmement importants. Je ne veux pas monopoliser la parole, mais comme c'est un sujet qui m'intéresse beaucoup, je voudrais juste, premièrement, faire une petite correction, mais qui est en même temps une approbation de ce que tu as dit, et puis une rectification historique. L'approbation, c'est de dire que ces expériences mettent en cause ce qu'on a appelé le "réalisme local" ; encore que cette expression pose en soi un problème, puisque le mot "réalisme" met en jeu une catégorie philosophique, et le mot "local", lui, se rapporte à quelque chose de spécifiquement physique. Donc l'expression "réalisme local", prise à lettre, me paraît un peu dangereuse, surtout quand elle est utilisée ensuite pour transformer un résultat physique en "résultat" philosophique.

M. Alain Aspect. - Pour moi, je pense qu'il s'agit d'une question de physique, et je me garderai bien...

M. Michel Paty. - Je le sais bien. Mais ce que je voulais dire, pour la rectification historique, c'est qu'Einstein se déclarait partisan d'un "réalisme local" (acceptons ici malgré tout l'expression), et même plus précisément de ce qu'il appelait le "principe de séparabilité locale" qui, lui, est un concept proprement physique. C'est lui qui a vraiment exprimé ce qu'il concevait comme étant ce concept, dont John Bell, qui aurait bien voulu suivre la piste d'Einstein, a mis en évidence la contradiction avec la physique quantique. Mais Einstein - et c'est là que je diffère d'avec ce que tu as dit - n'était pas lui-même partisan des paramètres supplémentaires. Ce sont d'autres physiciens, et dans un autre contexte que celui du début, un contexte où l'on se préoccupait de rétablir le déterminisme, qui ont proposé d'ajouter des variables, des paramètres qui permettraient d'avoir une détermination plus fine. Ce n'était pas le problème d'Einstein. Le problème d'Einstein, sur lequel il avait mis le doigt tout de suite, c'était la non-localité. C'est bien ce que tu as dit, d'ailleurs.

M. Alain Aspect. - Je t'accorde bien volontiers que ceci est un procédé pédagogique que j'utilise pour faire comprendre les choses. En revanche, il est quand même vrai que, au moment où j'ai fait ce raccourci, je l'ai fait en disant : lorsqu'on introduit des paramètres cachés, on complète la mécanique quantique ; or le titre de l'article original d'Einstein, Podolski et Rosen est "La mécanique quantique est-elle une théorie complète ?", et la conclusion de l'article, c'est évidemment qu'elle n'est pas complète. Donc, ce n'est quand même pas trop tordre la vérité.

M. Michel Paty. - Je peux peut-être donner une précision là-dessus qui permet de voir mieux ce qu'est cette complétude ou non. Précisément, c'est bien le titre de l'article. Et, en fait, ce qu'Einstein écrit dans ce travail - et pas seulement dans cet article de 1935, mais dans plusieurs autres textes qu'il a écrits par la suite -, ce qu'il indique en conclusion, c'est que, étant donné que, à distance, l'on a des corrélations de cette sorte entre des sous-systèmes, si l'on admet en outre la séparabilité locale, cela entraîne, en réalité, que l'on ne peut pas décrire de cette manière des systèmes physiques *individuels*. Et que, donc, si la mécanique quantique est *probabiliste*, c'est parce qu'elle est, en fait, *statistique* et qu'elle ne porte pas sur des événements individuels. Donc, ce qui était pour lui au fond de cette histoire, c'était le problème de la description de systèmes individuels qui, elle, n'était pas, selon lui, résolue par la physique quantique. Qu'elle le soit, cela n'a été parfaitement clair que très récemment, en particulier par les expériences qui se font depuis une vingtaine d'années à peu près dans plusieurs laboratoires, notamment au laboratoire Kastler-Brossel, avec des systèmes quantiques individuels (diffraction d'électrons, de photons, de neutrons, etc, individuels). On sait donc aujourd'hui que la théorie quantique décrit des systèmes quantiques individuels. On le sait par des expériences de ce genre ; mais aussi, d'ailleurs, les expériences sur les

corrélations, où l'on met en évidence les corrélations pour chacun des systèmes, en comptant exactement les événements l'un après l'autre, comme le fait Zeiliger, montrent bien que les corrélations portent sur des événements individuels.

M. Alain Aspect. - Oui, enfin, ça, on le faisait déjà, je veux dire : on avait des événements individuels aussi, oui.

M. Michel Paty. - Oui, absolument. Donc, en fait, à ce niveau-là, Einstein se trompait, c'est-à-dire dans la mesure où, plus tard, on a montré que la mécanique quantique porte bien sur des systèmes individuels. Je ne veux pas prolonger mon intervention, mais je voudrais dire que c'est ici qu'il y a une discussion philosophique à faire, une discussion épistémologique, en réalité : sur ce que sont ces systèmes quantiques qui sont individuels. Systèmes individuels, cela veut dire, en physique, qu'on peut les caractériser, chacun d'eux, physiquement. Et quand on dit qu'on peut les caractériser physiquement, on veut dire qu'ils ont des *propriétés*. Alors, simplement, ces propriétés, ce ne sont pas celles que l'on attendait, ce ne sont pas celles des grandeurs directement mesurées, ou mesurables, c'est-à-dire chaque composante de spin de chaque sous-système avec leur polarisation, qui sont des concepts de type classique ; ces propriétés, ce sont les propriétés que fournit la théorie quantique, à savoir le spin total, les polarisations relatives - et les corrélations. Ce sont ces propriétés qui correspondent au fait qu'on ne peut pas séparer les composantes de la superposition linéaire qu'est la fonction d'état représentative du système (cohérence). Les propriétés physiques du système sont celles représentées par sa fonction d'état. C'est sur ce que cela signifie, quant à ces grandeurs théoriques, que la discussion philosophique, épistémologique, devrait porter, à mon avis, et non pas sur : existe-t-il une réalité dont la physique peut s'approcher ou pas ? En effet, tous les physiciens sont persuadés qu'il y a une réalité physique, et que la physique cherche à la décrire. Les philosophes aussi, à vrai dire, à part peut-être quelques-uns. Mais le problème, c'est de savoir ce que sont ces systèmes *physiques* réels. Qu'est-ce qui les fait *physiques* dans la description théorique ? Au-delà de l'observation de grandeurs classiques et au-delà de la description par des grandeurs seulement mathématiques. Parce que, aujourd'hui, tout le monde s'accorde pratiquement à dire : il y a bien un système quantique réel, c'est bien un système physique, ce que ne disait pas Bohr. Bohr s'était donné toute une approche très compliquée : il fallait tenir compte de l'acte d'observation dans la définition du système, etc., ce que vous, les physiciens d'aujourd'hui, vous ne dites plus. Vous savez, bien sûr, qu'il faut faire des expériences pour déterminer les propriétés des systèmes, mais vous ne dites pas : la réalité dépend de nos instruments d'observation. Vous savez qu'il y a une réalité, qu'on va la découvrir par les instruments d'observation, et l'exprimer par le moyen des grandeurs que nous propose la théorie quantique.

Mais j'arrête ici, en te demandant simplement : est-ce que tu ne seras pas d'accord avec moi pour dire qu'il faudrait peut-être remettre en cause la notion étroite de *propriété physique* et de *grandeur physique* dont on parlait jusqu'alors, et qui concernait des propriétés et des grandeurs de type classique (grandeurs à valeurs numériques, directement mesurables, etc.) ? N'est-on pas fondé désormais à parler de *propriétés physiques quantiques* données directement par les *grandeurs* (les variables) *quantiques*, qui ont fait la preuve de ce qu'elles sont *physiques* ?¹

M. Alain Aspect. - Oh ! sûrement, mais ce que j'ai envie de dire, c'est qu'il me semble vital que les philosophes poursuivent l'étude de ce qui se passe aujourd'hui dans les laboratoires. Tu as cité les expériences sur les objets uniques qui se passent, par exemple, dans le groupe de Serge Haroche, au laboratoire Kastler de l'ENS, mais il y a d'autres expériences qui, à mon avis, doivent ouvrir des abîmes

¹ Pour plus de détails sur ce point, voir Paty, Michel : Are quantum systems physical objects with physical properties ?, *European Journal of Physics* 20, 1999 (november), 373-388.

de réflexions pour les philosophes. Ce sont des expériences du genre de celles que l'on fait actuellement dans mon laboratoire avec des condensats de Bose-Einstein. Pourquoi, à mon avis, ça ouvre des abîmes de réflexion ? Parce qu'un condensat de Bose-Einstein, c'est beaucoup d'atomes dans le même état (au même endroit) qui sont tous décrits par la même fonction d'onde, et la description quantique dit que cet objet - qui est un objet gros, où il y a beaucoup d'atomes - c'est quand même une fonction d'onde, avec toutes les bizarreries de la fonction d'onde, c'est-à-dire que les propriétés ne vont quand même commencer à se révéler qu'au moment où on va commencer à faire les mesures, au moment où il va y avoir des projections du paquet d'ondes ; mais, cette fois-ci, ce qu'il y a de tout à fait stupéfiant, c'est ceci : quand il y a un seul photon, je fais la projection du paquet d'ondes, le photon est déterminé, mesuré, détruit et on n'en parle plus. Mais, dans le cas du condensat de Bose-Einstein, tu lances deux condensats de Bose-Einstein l'un contre l'autre, tu détectes un premier atome, ce premier atome te fait une projection du paquet d'onde sur l'ensemble des fonctions d'onde des deux qui sont là, puis tu mesures un deuxième atome, puis un troisième, puis un quatrième, puis un millième, un dix-millième, un cent-millième, et, si tu crois la théorie quantique, progressivement cette fonction d'onde globale évolue, et tu as toute une succession d'événements dont voilà (Σ) un objet unique, gros et quand même quantique. A mon avis, les philosophes ont intérêt à étudier ces choses-là, pour alimenter leur réflexion sur la nature de la réalité physique.

M. Bourgeois. - Eh bien ! merci pour eux. Qui veut intervenir ?
