

Collège de physique et de philosophie Séance du 28 novembre 2011

Bernard d'Espagnat. Nous ouvrons la deuxième session sur la théorie de l'onde pilote. Je voudrais tout d'abord saluer la présence parmi nous de Roger Balian, que vous connaissez tous et qu'il est inutile de présenter.

Lors de la séance précédente, Franck Laloë nous a exposé la théorie de l'onde pilote, en insistant sur ses côtés positifs, en particulier le fait qu'on peut considérer qu'elle résout le problème de la mesure de façon plus convaincante que les autres méthodes, dont la théorie de la décohérence. En revanche, il n'a pas eu le temps d'en développer suffisamment d'autres aspects, y compris certaines difficultés que présente cette théorie. Par conséquent, dans une première partie de la séance d'aujourd'hui, Franck Laloë compètera ce qu'il avait à nous dire.

Ensuite, nous aurons un débat plus général dans lequel ceux d'entre nous qui ont réfléchi eux-mêmes sur la théorie de l'onde pilote nous feront part de leurs idées. J'espère que Michel Bitbol, en particulier, nous fera part des siennes, de même que d'autres ici présents.

Franck Laloë. Je vous remercie. Effectivement, la fois précédente, les questions et interventions ayant été nombreuses, et alors que j'avais parlé durant une heure et demie, il m'avait semblé préférable d'écourter la fin de ma présentation. Bernard d'Espagnat m'a très gentiment accordé du temps supplémentaire pour revenir aujourd'hui sur les conclusions de cet exposé – précisions tout de suite que ce sont des conclusions personnelles.

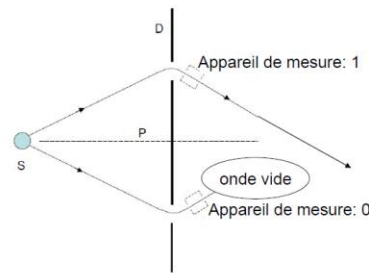
Par ailleurs, Bernard d'Espagnat et moi avons discuté des différents aspects de la théorie de de Broglie et Bohm, en particulier du fait que les ondes vides ne restent pas toujours vides. Je voudrais commencer par revenir sur ce point.

Section 1 – Compléments de Franck Laloë à son exposé

Les ondes vides

Franck Laloë. Revenons un instant sur les ondes vides de Bohm. Un cas très simple est celui de l'expérience d'interférence que nous avons considérée la dernière fois, où une particule peut passer à travers les deux trous d'un écran, pour atteindre ensuite une région où se produisent des effets d'interférence. En théorie bohmienne, au moment où la trajectoire de la particule passe par un des deux trous, elle accompagne l'un des paquets d'ondes et subit les effets de diffraction correspondants qui dévient la trajectoire. L'autre paquet d'ondes, qui passe par l'autre trou, est donc une « onde vide ».

Ondes vides de Bohm: restent-elles vides pour toujours?



De façon générale, nous avons vu que, grâce au mécanisme des ondes vides, en théorie dBB, une décohérence suffisante entraîne l'unicité macroscopique (en particulier celle des résultats de mesure); les difficultés liées à la régression de Von Neumann, le chat de Schrödinger, etc. disparaissent

Toutefois, lorsque les deux paquets d'ondes se rejoignent dans la région d'interférence, le paquet d'onde vide devient à nouveau important puisqu'il participe au pilotage de la particule. La particule « surfe » alors en quelque sorte sur les vagues créées par l'interférence entre les deux paquets d'onde, et c'est ainsi que se reconstruit la figure d'interférence bien connue. Plus tard, une fois que les deux paquets d'onde se sont croisés, du fait de la règle du non croisement, la particule a sauté de l'un à l'autre. Les paquets d'onde s'échangent donc la particule au passage comme deux joueurs qui se passent un ballon. Le paquet d'ondes qui était vide est devenu pilote, et vice-versa.

Ainsi, un paquet d'ondes vide peut parfaitement récupérer sa particule et cesser d'être vide. Si maintenant on insère sur l'une des trajectoires possibles (ou les deux) un dispositif « Welcher Weg » qui renseigne sur le chemin pris par la particule, il se produit le phénomène que nous avons discuté la dernière fois dans le cadre de l'expérience de pensée des « trajectoires surréalistes » d'Englert et al. Il faut alors impérativement tenir compte de la (ou des) variable de position bohmiennes du dispositif en question. S'il ne donne qu'une indication partielle sur la trajectoire, l'effet de cette nouvelle variable bohmiennes sur la trajectoire de la particule test n'est pas trop important. Toutefois les deux ondes issues des deux trous ne sont plus de même intensité. La règle de non-croisement ne s'applique plus, et la probabilité pour que le paquet d'ondes vide et le non-vide s'échangent n'est plus 1 ; il existe cependant toujours une possibilité de « ressusciter » l'onde vide. Mais si la particule test s'intrique avec une seconde, une troisième, etc. particules, dont les variables bohmiennes de position sont toutes affectées, on arrive au cas où l'indication donnée par l'appareil Welcher Weg est une véritable mesure de position. L'intrication va alors trop loin pour qu'il soit possible d'obtenir une résurgence des effets d'interférence. Le paquet d'ondes vide reste vide, et le reste pour toujours.

Ainsi, la possibilité pour une onde vide de récupérer sa particule pour redevenir pilote est intimement liée à la possibilité de refaire apparaître des interférences. Tant que la particule n'est pas intriquée avec des systèmes trop complexes, il reste envisageable de faire jouer à nouveau un rôle à l'onde vide. Une fois que l'intrication est allée trop loin, et en particulier si une mesure a été faite, les ondes vides le restent de façon définitive.

Une autre règle à bien retenir, et sur laquelle nous avons insisté la dernière fois, est qu'en théorie de de Broglie et Bohm il est impératif de tenir compte des variables de position de tous les systèmes. Si l'on construit une théorie qui ne tient compte des variables de

positions de Bohm que pour certains systèmes quantiques, et pas pour d'autres, on arrive aux mêmes incohérences qu'en mécanique quantique lorsque l'on traite classiquement l'appareil de mesure. C'est l'exemple classique de l'écran qui recule, l'objection d'Einstein au congrès Solvay qui a été levée par Bohr. De la même façon, en théorie de Bohm, il convient de faire un traitement symétrique de l'ensemble des systèmes sous peine d'aboutir à une contradiction. C'est l'ignorance de ce point qui donne régulièrement lieu à des articles erronés dans la littérature.

Roger Balian. Vous l'aviez bien indiqué, lors de la précédente séance. J'ai lu le compte rendu et j'ai noté ce point.

Franck Laloë. Oui. Cette fois ci, nous avons ajouté l'idée que ce sont les positions bohmiennes des particules autres que la particule test qui contrôlent la possibilité, ou pas, pour un paquet d'ondes vide de redevenir pilote. En particulier, lors d'une mesure du chemin pris par la particule, il est clair que l'onde vide garde définitivement ce caractère.

Bernard d'Espagnat. En ce qui concerne votre « définitivement » je suis d'accord avec vous *en pratique*, compte tenu du fait qu'il nous est radicalement impossible de construire les montages archi-compliqués dans lesquels une cohérence se manifesterait. En effet, vous avez indiqué que lorsqu'il y a une particule, on pourrait encore imaginer des systèmes ingénieux qui permettraient de retrouver la cohérence. Quand il y en a trois, c'est déjà pratiquement impossible. Et quand il y en a 10 ou 100, c'est encore plus impossible, bien sûr. Mais je tendrais à dire – pour employer l'expression de Bell – que c'est impossible seulement *FAPP* (*for all practical purposes*), car si c'est impossible pour nous, ce n'est pas ontologiquement impossible, me semble-t-il.

Roger Balian. Si l'on tient compte de tous les degrés de liberté de l'appareil de mesure, la décohérence est cachée quelque part. Si on imaginait un dispositif qui faisait revenir ce qui est vu sur l'appareil de mesure, on pourrait la récupérer...

Hervé Zwirn. C'est exactement la même situation que lorsqu'on considère que c'est *FAP* pour la décohérence. Bien sûr, nous ne serons sans doute jamais capables d'imaginer ce dispositif – en pratique. Mais, en principe, on pourrait l'imaginer.

Roger Balian. Si la décohérence est effectuée avec du spin et qu'il y a des échos de spin, on peut imaginer qu'on revient en arrière. La décohérence n'a donc pas été totale. On peut alors la surmonter. C'est pareil dans la théorie de Bohm. Où est la différence ? Je n'en vois pas.

Franck Laloë. Je ne suis pas vraiment certain d'être de votre avis. Vous semblez dire que la théorie dBB appliquée à la décohérence est tout aussi *FAPP* que la théorie standard. Certes, en ce qui concerne le vecteur d'état, la décohérence apparaît en théorie dBB exactement de la même façon qu'en théorie standard, nous sommes d'accord sur ce point. Mais le grand apport de la théorie dBB est la présence d'un ensemble de positions bohmiennes qui effectuent la sélection nécessaire entre toutes les branches du vecteur d'état. Plus n'est besoin de dire « ces branches ne peuvent plus interférer, et je prends donc la décision de les supprimer à la main toutes sauf une ». Ce *deus ex machina* est inutile en théorie de Bohm puisque la dynamique effectue la sélection de la branche pour nous. L'unicité macroscopique, en particulier, des résultats de mesure, découle très naturellement de la théorie dBB. On y passe continûment de la situation où on peut encore récupérer une interférence à une situation où on ne peut plus la récupérer, dans l'état actuel des techniques. Cela nous dit exactement jusqu'où nous pouvons aller avec une technique donnée. Personnellement, je n'appelle pas ça *FAPP*.

Bernard d'Espagnat. Pour moi je souscris d'autant plus volontiers à l'argument que vous venez de développer que je suis, comme vous, extrêmement sensible à la différence *conceptuelle* qu'il y a nécessairement, aux yeux d'un réaliste, entre les deux théories. Elle est qu'en théorie dBB on peut croire que le monde est fait comme elle le décrit. L'Univers est fait de N particules (qui ont chacune une position bien déterminée à chaque instant et évoluent d'une façon extraordinairement compliquée que nous ne parvenons pas à retracer dans tous ses détails) et d'un champ, à savoir la fonction d'onde de l'Univers, défini, lui, dans l'espace de configuration. On peut penser que le monde est réellement fait ainsi. En mécanique quantique standard, en revanche, on n'a pas cette possibilité-là, puisque l'on ne sait pas vraiment ce qui est réel. Puisqu'on n'arrive pas à y établir une distinction non ambiguë entre ce qui est réel et ce qui ne fait que décrire nos impressions et nos prédictions d'observations. Le réaliste aimerait croire qu'il y a, dans la physique, certaines notions qui correspondent à la réalité, il juge que pour ce rôle la fonction d'onde (ou la matrice densité, cela revient au même à cet égard) est le moins mauvais candidat, et néanmoins lors d'une mesure il prend la liberté de considérer que toutes les branches de celle-ci sauf une s'évanouissent, exactement comme si elles n'étaient que mentales (ne représentaient que notre connaissance) ; et cela sans autre justification qu'un « pratiquement tout se présente comme si ». Indéniablement il y a là un énorme *FAPP* qui n'est pas présent en théorie dBB. Quand je parlais de *FAPP* en théorie dBB ce que je voulais signifier c'est que, après qu'une mesure a été faite, si l'on s'astreint à tenir un langage strictement ontologique (pas de renvoi au « pratiquement impossible ») on ne peut pas qualifier la situation d'identique à ce qu'elle serait si l'onde vide n'existait pas, puisque dans des circonstances presque infiniment improbables, et impossibles à susciter, cette onde vide *pourrait* se manifester. Mais je reconnais volontiers que c'est là une tout autre acception du *FAPP*, laquelle, qui plus est, contrairement à la précédente, ne constitue manifestement pas un obstacle à une interprétation réaliste puisque la possibilité toute théorique à quoi elle renvoie se rencontre aussi en physique classique concernant des événements presque infiniment improbables.

Alexei Grinbaum. En revanche, on n'a jamais essayé d'imaginer quelles seraient les conséquences spatio-temporelles de cette ontologie bohémienne (N particules) pour la théorie de l'espace/temps. A ma connaissance, cela n'a jamais été exploré par quiconque.

Bernard d'Espagnat. John Bell a un peu essayé d'aborder ce problème (sans, bien sûr, imposer que N soit fixe). Mais il est arrivé à la conclusion qu'ontologiquement il fallait séparer l'espace et le temps. Du point de vue observationnel cela n'est pas gênant car tout (contraction des longueurs etc.) se présente alors comme s'ils étaient combinés de la manière dont la relativité le dit. Mais, en fait, il semble que dans une théorie du type de celle de Bohm, on soit obligé de séparer, conceptuellement, l'espace et le temps.

Alexei Grinbaum. Et de privilégier la position. C'est très lourd, du point de vue de l'espace/temps.

Franck Laloë. Oui, en théorie de Bohm on supprime la symétrie formelle entre position et impulsion qui existe en théorie standard. Est-ce grave ? En tous cas, le gain est qu'on n'a plus à postuler, comme en théorie standard, qu'à partir du moment où la décohérence est telle que personne ne peut raisonnablement dire qu'on arrivera à recréer des interférences, il se produit quelque chose de magique, qu'on ne cherche pas à expliquer, qui est que toutes les branches du vecteur d'état disparaissent sauf une. On l'évite dans le mécanisme de Bohm, parce qu'un mécanisme choisit automatiquement une des branches, ce qui me semble un apport considérable. Pour résumer, il serait probablement juste de dire que l'accusation de *FAPP*, si elle existe en théorie de Bohm, est bien moins justifiée que dans le cadre de la théorie standard.

Bernard d'Espagnat. Tout à fait ! De sorte que pour ce qui est de la résolution du problème de la mesure j'estime comme vous que la théorie de Bohm est hautement plus sympathique, si je puis dire, que n'importe quelle autre.

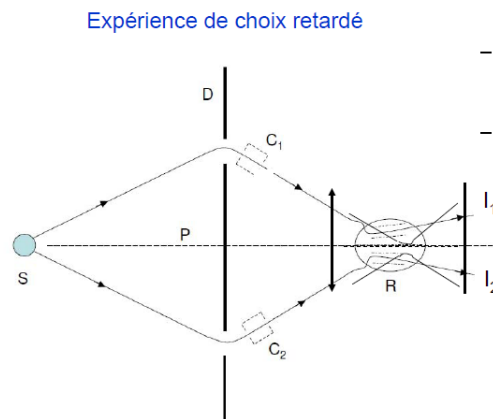
Roger Balian. Personnellement, je ne dirais pas « que de n'importe quelle autre ». Je vous raconterai peut-être ce que j'ai fait. Mais c'est une petite parenthèse, par anticipation.

Suite de l'exposé

Franck Laloë. Alain Aspect avait posé quelques questions sur l'expérience de choix retardé, se demandant si elle ne posait pas de problème conceptuel difficile dans le cadre de la théorie de de Broglie et Bohm. Je pense que non, au contraire, et je voudrais donc revenir sur ce point.

Le choix retardé

Reprenons la même expérience en supposant qu'au tout dernier moment, après que la particule soit passée par l'un des trous de l'écran, l'expérimentateur insère ou non une lentille qui donne l'image des deux fentes. S'il l'insère, la mesure de la position en I_1 ou I_2 de la particule renseigne sur la fente par où elle est passée. S'il ne le fait pas, les interférences sont observées comme habituellement, et il est impossible de dire par quel trou est passée la particule.



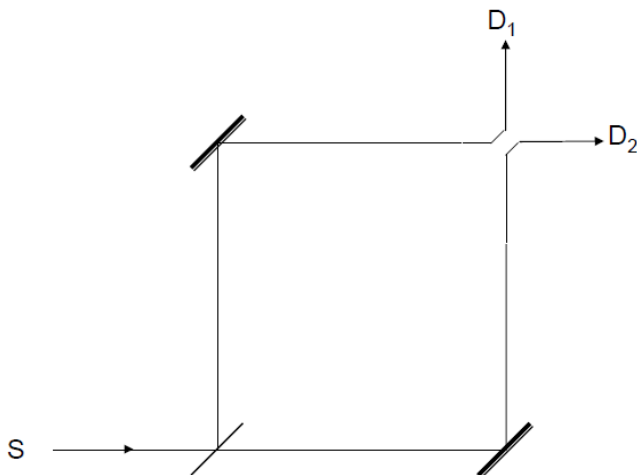
La particule est guidée par les ondes, dont les propriétés dépendent des appareils éventuellement insérés sur leur trajet. Elle se comporte comme un bouchon sur l'eau qui suivrait le mouvement du liquide et aux vagues à sa surface (figure d'interférence), de façon parfaitement locale.

Ici, l'effet du choix retardé fait par l'expérimentateur est de modifier la trajectoire des ondes de la fonction d'onde. En théorie de Bohm, cela modifie immédiatement leur effet de guidage sur la position de la particule qui, un peu comme un bouchon ballotté par les vagues dont le déplacement dépend de celui des crêtes et des creux, ne va pas prendre la même trajectoire dans les deux cas. Rien de particulièrement mystérieux ne se produit, les influences restant d'ailleurs parfaitement locales. Mais ce n'est pas pour autant qu'aucun effet inattendu ne se produit, comme nous allons le voir !

Alain Aspect. Ce schéma expérimental est plus compliqué que le schéma initial de Wheeler. Le choix initial de Wheeler consiste à mettre, ou non, la lame semi-réfléchissante. Conceptuellement, c'est une lame séparatrice qu'on met ou qu'on enlève. Certes, il ne s'agit pas d'un morceau de matière, mais d'un indice de réfraction. Quoi qu'il en soit, l'électro-optique revient à mettre ou ne pas mettre la lame séparatrice.

Le cas de l'interféromètre de Mach-Zehnder est effectivement particulièrement illustratif, même si dans le principe il est simplement équivalent à l'expérience de l'écran deux trous. Supposons que l'on place deux détecteurs D_1 et D_2 à la sortie de l'interféromètre ; on décide au dernier moment, pendant que la position de la particule est dans l'un des deux bras de l'interféromètre. Si une lame semi-réfléchissante est insérée à la sortie, les trajectoires bohmiennes se comportent comme nous l'avons vu la dernière fois. Si la lame est supprimée, les détecteurs D_1 et D_2 deviennent des détecteurs Welcher Weg, mais attention ! Il en faut pas raisonner comme en mécanique classique, en l'absence d'ondes. Du fait de la règle du non-croisement, c'est D_1 qui donne un clic si la particule passe par le haut, et D_2 si elle passe par le bas, donc juste l'opposé de ce à quoi on pourrait s'attendre. La particule bohmienne n'est pas allée en ligne droite alors qu'elle était dans l'espace vide, elle a fait zigzag. C'est une tendance forte des particules bohmiennes que de faire des zigzags qui rendent l'interprétation des trajectoires non-triviale.

Expérience de choix retardé (Mach-Zehnder)



Alexei Grinbaum. On peut faire bien pire ! On peut faire de la post-sélection ou du paradoxe de Hardy, qui mènent à des zigzags incroyables, des retours en arrière...

Franck Laloë. Je pense que vous parlez d'un retour en arrière spatial, pas temporel, c'est-à-dire au sens d'un demi-tour et non d'une remontée dans le temps. Comme nous l'avons vu, si deux paquets d'ondes se croisent et interfèrent, les particules vont prendre des directions inattendues. Chaque fois que les paquets d'ondes se croisent, les particules aiment bien sauter d'un paquet d'ondes à l'autre.

Suite de l'exposé et conclusion

J'en viens à la conclusion que j'avais un peu écourtée lors de notre précédente séance. Je voudrais, là, me montrer plus critique vis-à-vis de la théorie de de Broglie et Bohm en précisant ce qui, à mon sens, constitue de bonnes raisons de ne pas la considérer comme tout à fait satisfaisante.

On peut résumer les caractéristiques principales de l'interprétation de De Broglie et Bohm de la façon suivante:

- plus grande richesse de la description physique
- souvent rejetée, mais pour de mauvaises raisons
- elle réussit brillamment à éliminer tout rôle de l'observateur dans les mesures
- concernant le déterminisme, la situation est plus nuancée
- concernant le réalisme, la théorie ne réussit pas à ré-introduire un réalisme naïf

Richesse de la description

La théorie de de Broglie et Bohm donne une description plus riche que la théorie standard. Cela donne une perspective parfois assez picturale, qu'on aime ou qu'on n'aime pas. C'est une question de goût dont je ne discuterai pas ! Mais elle permet parfois d'aller plus finement dans la description des phénomènes quantiques.

Rejet pour de mauvaises raisons

La théorie de de Broglie et Bohm a souvent été rejetée pour de mauvaises raisons, à commencer par les objections de Pauli à la conférence Solvay de 1927, dont on voit avec le recul du temps qu'elles ne tiennent pas. De façon générale, des critiques de cette théorie ne cessent de paraître, mais la plupart concernent en fait des formes tronquées de la théorie, où toutes les variables bohmiennes ne sont pas prises en compte en présence d'intrication. Il ne faut pas refaire, en théorie bohmienne, les erreurs qu'on a appris à ne pas faire en théorie standard. Il est intéressant de voir que ces débats sont, en quelque sorte, une résurgence des débats historiques des congrès Solvay.

Alexei Grinbaum. Je vous informe que la nouvelle édition complète des actes de cette la conférence Solvay 1927 vient de sortir.

Suite de l'exposé

Le grand succès de la théorie : mécanisme des ondes vides

Franck Laloë. La théorie de de Broglie et Bohm réussit totalement à éliminer tout rôle de l'observateur au cours des mesures. En d'autres termes, il n'y a pas de réduction du vecteur d'état. Ce n'est pas un postulat, mais quelque chose qui apparaît naturellement à partir d'un mécanisme précis de guidage.

Déterminisme

C'est là que le bât commence à blesser ! Certes, la théorie de Broglie Bohm fournit un schéma où tout peut paraître déterministe, puisque tout est conséquence des positions initiales bohmiennes. Mais, par ailleurs, nous l'avons vu, ces positions sont tirées au hasard et on ne peut pas modifier cette distribution initiale, que les Bohmiens appellent « distribution quantique ». On est donc en face d'une théorie qui considère que tout est déterministe, mais fonction d'entités qu'on ne pourra jamais changer et jamais connaître. La nuance avec une théorie indéterministe devient donc subtile...

A mon sens, du point de vue du déterminisme, le triomphe bohémien n'est pas aussi net qu'on pourrait le penser.

Alain Aspect. J'entends de plus en plus souvent des gens très sérieux, dont Nicolas Gisin ou Sandu Popescu, insister sur le fait que ce qui est sans doute le plus étonnant dans tout ce qu'on a actuellement avec la téléportation etc., est le rôle absolument majeur et fondamental joué par le hasard et l'indéterminisme. Cela permet d'avoir une non-localité apparente tout en empêchant d'envoyer des informations plus vite que la lumière. Ils insistent sur le rôle absolument crucial de ce qu'ils appellent « le hasard fondamental ». Cela évoque un peu ce que vous êtes en train de dire.

Franck Laloë. Oui.

Alain Aspect. Si on pouvait le contrôler, alors on pourrait envoyer des choses plus vite que la lumière.

Franck Laloë. Absolument.

Alexei Grinbaum. Toute la cryptographie est fondée sur ce hasard fondamental. Sinon, la cryptographie quantique ne présenterait pas grand intérêt cryptographique.

Alain Aspect. Ce n'est pas évident du tout. Le schéma d'Eckert de cryptographie, par exemple, fonctionne sur ce que je viens de dire. Ce n'est donc pas une évidence *a priori*. Il y a 30 ans, Franck Laloë et moi-même savions très bien que la raison pour laquelle on ne pouvait pas utiliser la non-localité quantique pour transmettre de message plus vite que la lumière venait de cet indéterminisme fondamental. Monsieur d'Espagnat le savait encore avant nous, je pense. Mais cela ne semblait pas évident à tout le monde. Je pense d'ailleurs que tout le monde n'est pas absolument d'accord avec cela. Quoi qu'il en soit, je l'entends de plus en plus souvent, y compris de la part de personnes extrêmement solides, sérieuses et compétentes.

Rappelez-vous le débat sur les inégalités de Bell. Au début, tout le monde croyait que le déterminisme était indispensable. Puis, sont apparues les premières théories non déterministes et à variables cachées – à commencer par celle de Bell.

Franck Laloë. Autant sur l'unicité macroscopique, je pense qu'il y avait un 15-0 très net du côté de la théorie de de Broglie, autant sur le déterminisme, je n'accorde de point ni à un côté ni à l'autre. Bien sûr, si on le souhaite, on peut dire que tous les résultats des mesures effectuées dans l'Univers sont trivialement conséquences des positions initiales de l'ensemble des particules dans le Big-Bang, c'est-à-dire à la création de l'Univers. Mais dans la mesure où on ne peut avoir aucune action sur la distribution initiale, on ne s'est pas vraiment débarrassé de l'indéterminisme.

Alain Aspect.... cela n'a-t-il quand même pas une importance pour le libre arbitre ? L'hypothèse du libre arbitre confère le droit de choisir arbitrairement la position sur l'appareil de mesure.

Alexei Grinbaum. Il n'y a pas d'observateur, chez Bohm. Comment formule-t-on une quelconque position de libre arbitre dans une telle théorie ?

Alain Aspect. Nier le libre arbitre me semble une position sans aucun intérêt. En tant qu'expérimentateur, je choisis d'orienter mon polariseur. On n'a pas le droit de me dire que cela n'existe pas. Ma question est la suivante : ne s'agit-il pas d'un schéma dans lequel le fait que j'ai le droit de choisir l'orientation de mon polarisateur est en fait une illusion ?

Roger Balian. Quand on change l'orientation d'un polariseur, on change entièrement les trajectoires.

Alain Aspect. Non, puisqu'il paraît que les positions sont déterminées au début.

Hervé Zwirn. C'est la discussion que nous avons eue à la fin de notre précédente réunion. Il est question de la petite différence, subtile mais qui existe quand même, entre l'indéterminisme quantique habituel qui peut laisser une place à ce libre arbitre, et l'indéterminisme bohémien, qui ne lui laisse aucune place. En effet, on voit bien qu'à partir du moment où les positions initiales de toutes les particules de l'Univers sont fixées au moment du Big-Bang, même si on ne peut jamais les connaître (il y a donc une incertitude épistémique), tout le reste est fixé, en termes physiques purs. Il n'y a plus de libre arbitre. Le choix qu'opère l'expérimentateur pour fixer la position était déjà écrit au moment du Big-Bang. Tandis qu'en mécanique quantique, l'indéterminisme est rejoué à chaque fois – puisque même en connaissant totalement l'état à un moment donné, il reste une incertitude. Pour nous, en tant qu'observateurs ou théoriciens, le résultat est le même : cela reste indéterministe. Epistémiquement parlant, nous ne sommes pas plus avancés. Mais, physiquement parlant la différence est de taille : en théorie de Bohm, tout s'est joué au départ, tandis qu'en mécanique quantique, on rejoue à chaque fois, ce qui peut laisser une part au libre arbitre. En revanche, en théorie de Bohm, il n'y a aucun libre arbitre.

Bernard d'Espagnat. Cela me paraît très juste, effectivement.

Suite de l'exposé

Réalisme

Franck Laloë. La théorie de Broglie Bohm ne réussit pas à réintroduire un réalisme simple et naïf, puisque nous sommes contraints d'accepter que la réalité indépendante de nous existe mais qu'elle se décrit sur deux niveaux. Si l'on admet la contrainte relativiste qui interdit d'envoyer un signal plus vite que la lumière, on doit aussi admettre qu'on ne peut pas modifier la distribution des positions bohmiennes. Personne ne peut manipuler ces éléments de réalité. On doit alors accepter deux types de réalité, qui sont en fait très différents :

- le niveau de réalité associé aux fonctions d'onde (dont de Broglie et Bohm disent que ce sont des champs aussi réels que le champ électrique et le champ magnétique), que nous pouvons manœuvrer (en changeant des potentiels extérieurs par exemple) mais qui ne se propage pas dans l'espace habituel, mais dans celui des configurations (six dimensions pour deux particules) ;
- le niveau de réalité décrit par les positions bohmiennes, qui ne peut pas être manipulé directement, mais qui est directement observable et se propage dans l'espace habituel à trois dimensions. Cela correspond à une réalité qui échappe à toute action humaine directe. Nous pouvons agir indirectement sur les positions bohmiennes, en agissant sur les fonctions d'onde (en guidant alors différemment les particules, comme dans l'expérience du choix retardé), mais nous ne pouvons pas directement prendre une distribution bohémienne et la « squeezer », en l'aplatissant dans un sens et en l'élargissant dans l'autre.

Il me semble donc qu'une sorte de dualisme réapparaît à ce stade – qui ne figurait pas au programme initial de de Broglie et Bohm. De plus ce dualisme est asymétrique : la réalité des fonctions d'onde agit sur les positions bohmiennes, tandis que ces dernières n'ont aucun terme de rétroaction sur la fonction d'onde. Nous n'arrivons pas à l'espèce d'unification dont nous avons rêvé, ni à une vue parfaitement simple, puisque nous arrivons à nouveau sur une conception de la réalité indépendante compliquée par l'existence de ces deux niveaux. C'est, pour moi, là où la théorie de Broglie Bohm achoppe. A mon sens, le programme initial qui a motivé cette théorie n'est pas entièrement satisfait.

On remarque au passage la tension qui existe entre la mécanique quantique et la relativité se retrouve en mécanique bohmienne. La reprocher à la théorie bohmienne tout en l'acceptant de la théorie standard n'est pas équilibré. Mais il subsiste que la théorie bohmienne ne simplifie en rien les calculs, sans apporter une clarification totale des concepts en compensation. Pour finir, à mon avis, les interprétations qui proposent de modifier l'équation de Schrödinger (GRW, Pearle) sont bien plus prometteuses et intéressantes, mais c'est une autre histoire. J'en ai terminé et je vous remercie.

Bernard d'Espagnat. Nous vous remercions chaleureusement.
Passons maintenant, si vous le voulez bien, à la seconde partie de la séance.

Section 2 – Débat

Bernard d'Espagnat. Quelles sont, parmi nous, les personnes qui ont réfléchi à ces questions ou qui ont lu des écrits sur le sujet et qui voudraient communiquer à ce propos ?
Michel Bitbol ?

Michel Bitbol. Je n'ai pas de vraie nouveauté à vous exposer à ce sujet, mais je vais vous rappeler un certain nombre d'objections philosophiques pouvant être avancées contre la théorie de de Broglie - Bohm. Cette théorie fait-elle ce qu'elle annonce ? Est-elle satisfaisante lorsqu'elle est mesurée à l'aune son propre programme de recherche ontologique ? Sur ce dernier point, j'ai de grands doutes.

Le premier problème, que j'ai eu l'occasion d'évoquer lors de notre précédente réunion, est la multiplicité des ontologies qu'on doit avancer si on veut réaliser le programme d'interprétation réaliste de Bohm dans tous les domaines de validité des théories quantiques. Il existe, bien sûr, l'ontologie originale de la théorie de 1952, une ontologie de particules ayant des trajectoires intrinsèquement définies, régies par des champs classiques et par un nouveau champ quantique. Mais il y a aussi une autre ontologie, radicalement différente. C'est celle qui a permis de tenir compte des effets relativistes dans l'équivalent bohmien de la théorie quantique des champs. Cette ontologie n'est plus du tout une ontologie de points matériels se déplaçant le long d'une trajectoire continue, mais une ontologie de champs avec des niveaux ponctuels instantanés d'excitation. Dans cette autre ontologie, il n'y a plus rien de tel qu'un point matériel qui a une continuité dans l'espace et dans le temps, mais, au contraire, des événements instantanés qui peuvent surgir, au moment d'une mesure par exemple. Cette représentation n'a vraiment presque rien à voir avec l'ontologie initiale de particules. Il suffit de lire quelques lignes de Bohm pour s'en rendre compte : « L'utilisation du terme descriptif 'particule' dans ce contexte quantique nous égare complètement »¹. Enfin, il existe une troisième ontologie que Bohm lui-même considère comme la plus profonde de toutes. C'est une ontologie qui considère comme étant fondamental une structure sous-jacente non spatio-temporelle, un « ordre implicite » dit Bohm, d'où émergerait secondairement « l'ordre explicite », c'est-à-dire l'ordre des événements et des phénomènes que l'on constate au moyen des sens et des instruments expérimentaux, dans l'espace et dans le temps ordinaires. Voilà donc trois ontologies pour un même projet de reconstitution d'une ontologie. Cela nous interroge. Certes, on pourrait considérer que Bohm s'est finalement arrêté sur une bonne ontologie, et que cette ontologie est la troisième. Mais on ne peut pas manquer d'être troublé par le fait que, dans l'histoire de son propre travail, il y a eu une sorte de dérive des images

¹ D. Bohm, *Wholeness and Implicate Order*, Ark Paperbacks, 1980

ontologique. La mise à l'écart successive des ontologies antérieures chez un seul chercheur nous fait penser, en plus aigü, à ce que disait l'épistémologue Larry Laudan au sujet des anciennes ontologies physico-chimiques qui comportaient des entités aussi caduques que le phlogistique, le calorique, ou l'éther : qu'est-ce qui nous garantit que nos ontologies scientifiques présentes ne seront pas également abandonnées ? Et qu'est-ce qui garantit dès lors qu'elles désignent des étants réels ?

Je vois encore un autre problème dans la théorie de Bohm, celui de la « structure en surplus ». Faut-il ajouter à la théorie quantique standard ultra-phénoméniste (qui sauve les phénomènes, mais en n'indiquant rien d'autre que des probabilités que les phénomènes expérimentaux se produisent), une structure supplémentaire qui aurait uniquement pour but de satisfaire l'intuition et le besoin d'explication concrète et imagée ? La tradition, en philosophie des sciences, est de répondre à cette question par la négative : on préfère ne pas avoir de structure en surplus, pour la simple raison que celle-ci n'est pas testable isolément par des moyens expérimentaux, et qu'aucun consensus fondé ne peut donc être atteint à son propos. Le contre-argument qu'on peut avancer pour éviter cette conclusion négative est que la perception qu'on a du fait qu'une structure est en surplus ou non peut être historiquement contingente. Par exemple, la mécanique classique est née avec une structure qui avait quelques affinités (pas toutes, il faut bien le dire) avec les images standard du sens commun selon lesquelles le monde est fait d'un ensemble de corps matériels (ou « choses ») soumis à des forces et se déplaçant dans l'espace et dans le temps de façon continue. Mais, au 19^{ème} siècle, bien d'autres conceptions et interprétations de la mécanique classique sont nées, comme la théorie de Hertz (qui ne suppose pas de forces), ou encore les théories énergétistes selon lesquelles l'ultime existant n'est plus la particule dotée d'une certaine quantité d'énergie mais l'énergie elle-même. De toute évidence, ces interprétations énergétistes étaient beaucoup plus affines à ce que nous appelons maintenant le phénoménisme, que les interprétations « chosistes » (comme on le disait à l'époque) : dans l'énergétisme, on s'interdit d'imaginer une représentation très sophistiquée derrière les phénomènes, mais on considère seulement ce qui permet aux phénomènes d'arriver au laboratoire : l'énergie qui est le facteur quantitatif de changement, au laboratoire comme ailleurs. La chronologie du phénoménisme et de la structure ontologique en surplus est ici inversée par rapport à celle de la mécanique classique. La structure ontologique en surplus était déjà présente au temps de la naissance de la mécanique classique, puis elle a été en quelque sorte progressivement soustraite de l'interprétation par un certain nombre d'interprètes de cette mécanique au 19^{ème} siècle. Or, l'interprétation initiale avec structure en surplus n'a pas disparu, et cela malgré la part d'arbitraire que représente ce surplus d'interprétation. Pour quelle raison ? Parce que cette structure en surplus satisfaisait au moins partiellement à une clause de continuité entre la théorie physique et quelques-unes des croyances du sens commun (pas toutes, bien sûr !). Le surplus ontologique faisait l'objet d'un consensus non pas en raison de sa (problématique) capacité à résister à un test expérimental décisif indépendamment du reste de la théorie, mais simplement parce qu'il avait l'avantage de préserver un patrimoine ancien de connaissances partagées.

Bernard d'Espagnat. Je vous suis très bien. Simplement, il me semble que dans l'idée qu'on élimine cette structure, il y a quelque chose de gênant. En effet, cela veut dire que nous sommes vraiment le centre de tout et que notre pensée crée tout le reste, sans aucun substratum. Personnellement, je préfère dire qu'il y a un substratum, mais que nous ne pouvons pas vraiment l'atteindre. Cela me satisfait davantage. J'ai toujours été gêné, dans le positivisme absolu ou l'idéalisme, par cette idée que nous sommes les seuls existants. Je crois que ce sentiment est aussi quelque peu partagé par Hervé Zwirn.

Michel Bitbol. Vous avez raison. En tout cas, je comprends votre position. Au lieu de dire qu'il faut absolument éliminer les structures de surplus, on pourrait simplement considérer qu'il faut rester agnostique sur la structure de surplus, tout simplement parce qu'elle est sous-déterminée. On ne dispose pas d'autre chose que les phénomènes pour dire ce que la structure de surplus pourrait être ; or ces phénomènes ne permettent pas de lever complètement l'indétermination à son sujet. On peut affronter cette difficulté de deux façons : soit considérer que si l'on est phénoméniste ou positiviste, on doit éliminer toutes les structures de surplus ; soit considérer que l'on n'a pas de raison de choisir l'une plutôt que l'autre, et donc s'abstenir aussi bien de les rejeter toutes que d'en préférer une. Mais, dans les deux cas, je pense que cela aboutit à la même attitude épistémologique de prudence

Hervé Zwirn. Sur ce point précis, il me semble que même si l'on veut ne pas s'engager dans le choix, une distinction doit être faite entre les théories purement phénoménistes (qui ne se prononcent pas, mais qui laissent la possibilité d'ajouter des structures de surplus pouvant s'interpréter d'une manière ou d'une autre) et les théories plus fortement contraintes n'autorisant pas une telle liberté. Dans le premier cas, on peut très bien adopter une position consistant à dire « cela me suffit, je ne veux pas en savoir plus ». On est alors instrumentaliste. Mais on peut aussi ajouter la structure de surplus qui convient si l'on veut être réaliste, ou celle qui convient si on ne veut pas l'être. Le choix est libre. C'est une certaine sorte de formalisme phénoméniste minimal. Dans le deuxième cas, on a affaire à des formalismes qui imposent que les éventuelles structures de surplus aillent dans une seule direction – comme le fait la mécanique quantique. En effet, avec cette dernière, on peut très bien se garder de toute interprétation et rester instrumentaliste. Mais si on veut l'interpréter en termes réalistes, cela « coince ». C'est pourquoi, je considère qu'il convient de distinguer les théories qui « coincent » et les théories ouvertes à toute interprétation. Les premières, d'une certaine manière, nous en disent plus. En effet, à partir du moment où elles nous interdisent des choses, elles nous apprennent quelque chose. En revanche, les secondes restent neutres, d'une certaine manière.

De ce point de vue, la mécanique quantique est plus intéressante, parce qu'elle nous interdit de penser des choses qu'on voudrait penser. Evidemment, la théorie de Bohm, qui reproduit les mêmes phénomènes, nous autorise à faire en partie ce que la mécanique quantique nous interdit. Ce qui signifie que, d'une certaine manière, si l'on passe au méta niveau des théories, il est vraisemblable (on le sait depuis longtemps, c'est de l'épistémologie basique) qu'aucune théorie instrumentaliste ne nous empêchera de construire une théorie instrumentaliste alternative autorisant une interprétation diamétralement opposée à l'interprétation de la première. Cette question restera sans doute ouverte à jamais...

Alain Aspect. Je trouve que vous êtes un peu catégorique si l'on se réfère à l'histoire. Peut-être ai-je mal compris vos propos, mais je pense à certains exemples historiques où il s'est finalement passé quelque chose qui a levé l'indétermination. Je pense, évidemment, à l'exemple de l'atomisme. A la fin du 19^{ème} siècle, on pouvait dire que les atomes étaient réels. On pouvait y croire ou non, jusqu'au moment où la technique a tranché. Est-ce inimaginable ici ?

Michel Bitbol. Je crois que l'exemple de l'atomisme du dix-neuvième siècle est un peu différent de ce qui se passe en physique quantique, en fait.

Alain Aspect. Je suis certain que ça l'est !

Michel Bitbol. ... Et ce, pour une raison assez simple. Il n'existait pas, dans la théorie atomiste, une clause interne qui précisait que ce qu'avançaient les atomistes était de toute façon impossible à tester expérimentalement. Or dans la théorie de Bohm, il y a bien quelque chose comme cela. Par exemple, cette théorie indique que la trajectoire de Bohm est déterminée par un potentiel quantique universel, même si l'on ne fait rien. Mais il se trouve que cette trajectoire, par construction de la théorie de Bohm, est inaccessible, puisqu'à chaque fois qu'on met en place un appareil adéquat pour mesurer la position de la particule en un point, on change le potentiel quantique dans son ensemble, et par voie de conséquence la trajectoire. La trajectoire initiale *in abstracto*, celle qui est intouchée par quoi que ce soit, est donc inaccessible par définition interne à la théorie. Il y a donc un problème. L'atomisme ne disait jamais cela. Il ne mettait pas automatiquement, constitutivement, les propriétés qu'il postulait à l'abri de l'attestation expérimentale. Même si les variables de Bohm ne sont pas vraiment « cachées », la trajectoire qu'il postulait en 1952, est clairement hors d'accès de l'expérience.

Hervé Zwirn. Mon propos se référait au concept de sous-détermination des théories par l'expérience (idée mise en avant par Quine), et il va de soi qu'il ne concerne pas les entités observables. Les atomes sont devenus observables et donc cette indétermination ou sous-détermination a été balayée. Je faisais référence aux entités non observables des théories (qu'on appelle quelquefois les entités théoriques par opposition aux concepts observationnels), qui sont postulées pour des raisons d'explication et de compréhension mais qui ne sont pas des éléments directement observables.

Michel Bitbol. C'est cela.

Une autre objection ressort d'une très belle expérience conduite à Londres dans les années 1990 par des partisans de la théorie de Bohm, sur l'interférométrie des neutrons. Les résultats obtenus étaient tels que pour les expliquer par la théorie de Bohm, le seul moyen était de supposer que la masse des neutrons était dispersée dans tout l'espace de l'interféromètre et non pas localisé au point où est censé se trouver le neutron. C'est très troublant philosophiquement, puisqu'on se demande comment une particule peut exister sans avoir de propriétés localisées là où elle existe ! Mais cette dispersion de la masse est peut-être aussi une façon de lever certaines autres difficultés internes à la théorie, à savoir le fait que les particules de Bohm adorent faire des zigzags. Mais si elles font des zigzags et qu'elles ont une inertie localisée, alors il faut exercer des forces localisées sur elles. Or le potentiel quantique n'exerce pas vraiment de force localisée.

Roger Balian. Si.

Michel Bitbol. Le phénomène quantique est censé agir par l'information.

Roger Balian. On peut l'interpréter comme une force.

Michel Bitbol. Bohm écrit que "l'effet du potentiel quantique est indépendant de la force (c'est-à-dire de l'intensité) du champ quantique ψ , mais dépend seulement de sa forme" (Bohm & Hiley, "The undivided universe", Routledge, 1993, p. 31). Cette caractéristique ne ressemble guère à celles d'un potentiel standard.

Franck Laloë. Ce n'est pas le potentiel classique, mais le quantique, qui est très spécial.

Michel Bitbol. C'est exact, le potentiel quantique est très spécial.

Franck Laloë. La mécanique quantique n'a pas transposé toutes les idées classiques.

Michel Bitbol. En effet

Bernard d'Espagnat. Dans le problème de l'atome d'hydrogène dans son état fondamental, on peut dire – et c'est d'ailleurs ce que Bohm dit –, que le potentiel quantique exerce une force qui est opposée à la force d'attraction électrique. Un équilibre s'établit entre les deux. Dans ce cas-là, on interprète bien le potentiel quantique comme une force.

Michel Bitbol. C'est l'équivalent d'une force.

Alexei Grinbaum. Si j'ai bien compris, cela ne dépend pas de cela, de toute façon. Concernant la question de la propriété des particules quantiques, les personnes qui ont fait des expériences sur les neutrons considèrent que ces derniers sont les particules quantiques de la théorie de Bohm, ce qui n'est pas tenable. Les particules quantiques, qui ont des propriétés délocalisées, sont des objets bizarres en soi. Que signifie avoir une propriété délocalisée ? Cela ne dépend pas de la force.

Michel Bitbol. Effectivement. L'objection que j'évoquais était de nature philosophique, et elle tient toujours.

Hervé Zwirn. Il serait intéressant de regarder plus en détail si elle ne tombe pas dans le piège qui a été évoqué.

Michel Bitbol. En tout cas, les partisans de la théorie de Bohm ont considéré que cette caractéristique étrange de la masse des neutrons modifiait profondément leur conception des particules en général. À partir du moment où les propriétés des particules ne sont plus localisées au point où elles se trouvent, les particules ne peuvent plus être que des *bare particulars*, des individus matériels tout nus qui ne portent pas un vêtement de propriétés sur eux.

Bernard d'Espagnat. Même pas la masse !

Michel Bitbol. Exactement ! Pour un neutron, la seule propriété à considérer était la masse. Or elle n'était plus localisée

Bernard d'Espagnat. Par rapport à la notion d'atome philosophique, c'est quand même un sérieux pas en arrière.

Michel Bitbol. Oui. En tout cas, c'est une étrangeté, à tout le moins.

Il existe, certainement, d'autres objections encore contre la théorie de de Broglie Bohm. Je souhaite en souligner une dernière, également d'ordre philosophique. C'est celle selon laquelle, dans cette théorie, l'observation est toujours contextualiste et dépend de la configuration mise en place pour avoir accès à certaines propriétés au moyen d'un appareil. C'est donc l'ensemble de la constitution de l'appareillage qui déforme considérablement la trajectoire. Il s'agit là d'une façon fortement non naïve d'envisager la théorie de la connaissance, puisque ici la connaissance ne fournit plus un accès direct à quelque chose qui existerait indépendamment de l'appareil, mais un accès à une trajectoire sans cesse modifiée

par l'appareil même qui permet de la sonder. S'il en va ainsi, si l'on considère que le rapport entre la connaissance et l'ontologie est très indirect, dans la mesure où la connaissance ne donne pas immédiatement accès aux choses et aux trajectoires telles qu'elles sont, mais seulement à travers des quantités de déformations introduites par les appareils eux-mêmes, alors comment justifier à partir d'elle l'adhérence au sens commun dont se réclament les partisans de la théorie de Bohm 1952 ? En général, le sens commun est associé à une vision naïve de la connaissance : les choses sont telles qu'on les voit, aucune déformation n'est imposée par le fait qu'on regarde ce qui se passe, le monde est fait avec des corps matériels localisés. Mais si l'on commence à introduire des déformations induites par la connaissance, on avoue qu'il n'y a plus aucune garantie de correspondance directe entre la connaissance qu'on a et les choses telles qu'on les décrit. On a donc le sentiment qu'en 1952, la position de Bohm était assez forcée. Il voulait à tout prix retenir au moins une partie des images du sens commun, en l'occurrence la partie qui concernait les trajectoires de particules, tout en fondant ce conservatisme ontologique sur une théorie de la connaissance qui, elle, est complètement non conservatrice et qui accepte qu'il n'y a aucune garantie de la correspondance entre les objets et la connaissance qu'on en prend. Il y a là un manque d'affinité philosophique, entre le désir de retrouver une conception ontologique standard, assez proche du sens commun, et une théorie de la connaissance extrêmement sophistiquée, très loin de ce sens commun.

Je crois que je peux m'arrêter là !

Bernard d'Espagnat. Merci. Nous avons là un panorama d'objections significatives. Qui souhaite encore prendre la parole ?

Roger Balian. J'ai en tête un certain nombre de questions, qui ne sont pas de nature philosophique, mais qui sont davantage des questions de théoricien.

Par exemple un des points qui en théorie de Bohm, me gêne le plus c'est que dans son cadre il n'y a pas d'invariance. Pour ma part, j'aime bien les invariances. La mécanique quantique est invariante unitaire. Le fait qu'il n'y ait pas d'invariance, chez de Broglie et Bohm, me gêne beaucoup. La position joue un rôle particulier : quand on fait une transformation unitaire, en mécanique quantique, rien n'est changé.

Franck Laloë. Vous voulez dire qu'on brise la symétrie de la mécanique quantique entre position et impulsion, ou entre fonction et sa transformée de Fourier.

Roger Balian. Toute la variance unitaire de la mécanique quantique, toute transformation unitaire de la mécanique quantique, puisqu'on choisit une base très particulière, qui est la base position. C'est la base R. Tout se fait dans la base R. C'est quand même embêtant, pour le théoricien qui est habitué à des groupes d'invariances. Cela me gêne beaucoup.

Franck Laloë. Tout le calcul quantique habituel est exactement le même en théorie de Bohm et en théorie classique.

Roger Balian. Oui. Ce sont les trajectoires qui brisent l'invariance unitaire – « brisent » au sens qu'on choisit une base. Elles ne sont pas définies dans une autre base.

Franck Laloë. Elles favorisent une base. Il me semble qu'il n'est pas possible d'employer à juste titre les mots « introduire une dissymétrie », qui évoque autre chose.

Alexei Grinbaum. Il y a deux équations dans la version de Bohm. Une pour les particules, une pour la fonction d'onde. Pour la fonction d'onde, rien n'est brisé.

Roger Balian. En effet. Pour la fonction d'onde, tout fonctionne bien, l'invariance unitaire est là. Mais les particules, elles, ne sont définies que dans une base particulière. C'est choquant, même si ce n'est pas interdit.

Mélanger une chose qui est fondamentalement invariante unitaire à quelque chose qui est dans l'espace ordinaire... C'est peut-être sentimental, mais cela me déplaît beaucoup. La même idée devient un peu dramatique quand on passe à la théorie quantique des champs, parce qu'à la place de la fonction d'onde, il y a la fonctionnelle du champ. On définit la trajectoire comme une équation fonctionnelle du champ au lieu de la définir comme un gradient de la fonction d'onde – et, de même qu'on a choisi entre R et P, il faut choisir entre champ électrique et champ magnétique. Relativistiquement, c'est très embêtant.

Ce n'est donc pas une invariante par transformation de Lorentz. Si même les transformations de Lorentz sont figées, c'est gênant.

Par ailleurs, j'aimerais dire un mot de l'analogie que je vois entre le point de vue de Bohm et celui de Heisenberg quant à la dynamique. J'aime assez le point de vue de Heisenberg, sur la mécanique quantique, en ce qu'il dissocie complètement la dynamique de la statistique des probabilités. Dans l'image de Heisenberg, il y a une algèbre observable, qui est définie dans l'espace et qui suit, pour un système isolé, une évolution unitaire totalement réversible et déterministe. Ce qui est indéterministe, c'est juste le choix de la fonction d'onde – ou plutôt de l'opérateur de densité (car, comme vous le savez, je déteste la fonction d'onde, qui vient de la mécanique statistique [?], mais peu importe !). Toute la partie probabiliste est définie dans l'état. Il y a quelque chose d'un petit peu semblable, dans la représentation de Bohm. En effet, les trajectoires sont parfaitement déterministes. On sépare, aussi bien que la théorie de Heisenberg, le côté probabiliste du côté déterministe et dynamique.

Alain Aspect. Je vois bien l'analogie que vous faites, mais comment vous débrouillez-vous, dans Heisenberg, avec le fait qu'il y a un seul résultat à la fin ?

Roger Balian. Je vous transmettrai le papier que nous sommes en train de rédiger. Vous répondre ici prendrait beaucoup trop de temps. Je peux toutefois essayer de le faire en deux mots. Quand on se met en représentation de Heisenberg, il y a l'objet et l'appareil. Quand on regarde l'évolution de toutes les observables possibles, du système et de l'appareil, il y a, parmi ces observables, celles de l'objet plus l'appareil que l'on veut mesurer [?] et toutes celles qui ne commutent pas avec les premières. Quand on prend la dynamique de Heisenberg, toutes les observables qui ne commutent pas avec celles qu'on est en train de mesurer disparaissent et s'annulent à la fin de la mesure. A la fin de la mesure, il ne reste plus qu'une algèbre abélienne, que l'on peut décrire par des probabilités ordinaires et non pas par des probabilités non commutatives.

Alain Aspect. A la fin, il y a quand même des probabilités.

Roger Balian. Ce sont des probabilités ordinaires.

Alain Aspect. Vous ne faites donc pas l'économie d'un postulat supplémentaire.

Roger Balian. En effet. On fait un postulat supplémentaire, selon lequel lorsqu'on a des probabilités ordinaires, cela signifie, comme pour tout événement ordinaire, que chaque événement arrive avec sa propre fréquence. Mais le point important est que l'on passe les

probabilités quantiques non commutatives, qui disparaissent car il ne reste plus que des choses qui commutent à cause de la dynamique interaction appareil/objet.

Je vous enverrai notre texte dès que la rédaction sera terminée.

Hervé Zwirn. Le fait que tout ce qui ne commute pas s'élimine est-il le même mécanisme que dans le choix de la base préférée en théorie classique de la décohérence ?

Roger Balian. En gros, cela y ressemble. Mais l'analyse en termes de fonction d'onde ou, plutôt, de matrice densité s'entend *for all practical purposes*. Quand l'appareil est grand, c'est uniquement avec une probabilité nulle, négligeable, que ce que je dis est vrai. C'est parce que l'appareil est grand qu'on a le droit de dire cela.

Hervé Zwirn. Cela signifie qu'on fait le chemin équivalent à celui du choix de la base préférée et qu'on fait aussi celui qui mène à la matrice diagonale en théorie classique de la décohérence avec une trace partielle...

Roger Balian.... je ne fais surtout pas de trace partielle, parce que cela revient à tricher.

Hervé Zwirn. On arrive presque au même point, mais un cran plus loin : lorsqu'on fait une trace partielle, on se retrouve quand même avec des probabilités qui ne sont pas classiques, tandis que là, on arrive à des probabilités classiques. C'est le même chemin au départ, mais il y a un détour pour arriver un tout petit peu plus loin sans trace partielle.

Roger Balian. C'est un peu plus compliqué que cela. Mais nous sommes loin de Bohm.

Bernard d'Espagnat. Juste une petite question à propos du spin J'en étais resté à l'idée que la théorie de Bohm rencontrait des difficultés de ce côté là. De fait, pendant un certain temps ça a été le cas. Dans le dernier livre de Bohm et Hiley, il me semble que c'est encore assez flou. Franck Laloë, vous nous avez parlé du spin un peu rapidement la dernière fois, car nous manquions de temps. Mais je voulais vous poser la question suivante. Depuis l'an 2000 ou depuis 1995, des progrès ont-ils été opérés dans ce domaine ? Les choses que vous nous avez dites sont-elles extraites de théories récentes ?

Franck Laloë. Je ne sais pas répondre à votre première question, car je ne connais pas suffisamment l'ensemble de la littérature. J'ignorais même qu'il y avait une importante difficulté à traiter le spin dans la théorie de Bohm. Quant à la seconde question, les figures que j'ai montrées sont extraites du livre de Peter Holland, et basées sur des calculs simples avec l'équation de Pauli, sans ajouter de variable bohmiennne associée au spin. La seule variable bohmiennne est la position de la particule, dont la vitesse est donné par le courant de probabilité dans l'espace habituel, obtenu par trace sur les états de spin.

Roger Balian. L'équation de Dirac est une équation d'onde, pas de champ.

Bertrand Saint-Sernin. J'aurais peut-être une question à poser. Au 19^{ème} siècle, Cournot affirme qu'il est réaliste mais qu'il ne croit pas du tout que si le démon de Laplace existait, il verrait un univers déterministe. Le hasard est quelque chose de fondamental dans l'Univers, ce qui n'empêche pas la constitution d'une science ni, dans certains domaines, que

l'on puisse restituer fidèlement certains processus de la nature, comme la chimie de synthèse le montre. Je voudrais savoir si les progrès de la physique au cours du 20^{ème} siècle amènent à reprendre ce problème d'une façon différente. Vers quelle solution va-t-on ? Va-t-on plutôt du côté de Laplace, pour qui le hasard est lié à l'ignorance, ou plutôt du côté de Cournot, pour qui le hasard a un caractère fondamental dans la nature elle-même ?

Roger Balian. Laplace disait-il vraiment cela ? J'ai relu cette fameuse citation de Laplace. Il considère qu'il est idiot d'imaginer qu'on peut connaître toutes les conditions initiales. En réalité, c'est impossible et l'on est obligé de faire des probabilités.

Alain Aspect. Je suis d'accord.

Roger Balian. Cette citation est tirée de la préface du *Traité des probabilités*, précisément pour introduire la notion de probabilité et indiquer qu'on ne peut se passer des probabilités.

Bertrand Saint-Sernin. Ce qui est intéressant, c'est que les deux pensent que les règles du calcul de la probabilité sont les mêmes, mais que, dans un cas, la probabilité est surtout liée à l'ignorance et, dans l'autre, elle reflète le fonctionnement même de la nature. Cournot dit une chose très curieuse dans son dernier ouvrage, *Matérialisme, vitalisme, rationalisme*, paru en 1875 : s'il existe deux sciences, même déterministes, indépendantes (autrement dit, si l'on peut considérer que l'Univers est composé de régions qui se développent au moins pendant un certain temps de façon autonome mais qui sont susceptibles de confluer à un moment donné), on trouve alors du hasard dans la nature. En effet, on trouve la rencontre d'événements imprévisibles qui ont, au fond, une sorte de double d'hérédité ou d'hérédité multiple tenant à ces origines diverses.

Bernard d'Espagnat. C'est le hasard « à la Cournot », au sens de la rencontre de deux séries causales indépendantes.

Bertrand Saint-Sernin. Cela suppose que l'Univers peut être constitué, pour les scientifiques, de régions que l'on peut traiter indépendamment les unes des autres. Par opposition, les Stoïciens qui pensent qu'il y a une interaction générale de tout ce qui existe dans l'Univers, n'arrivent pas à constituer de science, sauf peut-être un peu de logique.

Bernard d'Espagnat. Oui, un réalisme légaliste mais non excessivement dogmatique a longtemps constitué – et constitue encore dans la plupart des disciplines – l'attitude mentale la plus propice au développement scientifique. Et la notion de hasard à la Cournot est sans doute celle qui permet le mieux la conciliation de ces deux exigences un peu contradictoires en apparence. Par ailleurs, à l'époque la situation était plus simple qu'elle ne l'est aujourd'hui parce que du point de vue scientifique aucune découverte théorique ne suscitait de réticences à l'égard du réalisme que les philosophes appellent « naïf » et que nous appelons plus volontiers « conventionnel ».

Bertrand Saint-Sernin. Chez Cournot il n'est pas du tout naïf. Pour Cournot, le paradoxe de la science physique est qu'elle part d'instruments qui ont des particularités, qui ont une singularité et dont la construction a des aspects un peu contingents, pour se fixer ce but extraordinaire et peut-être inaccessible de trouver l'universel. Tous ces aspects-là sont parfaitement saisis, d'autant plus que c'est le premier tiers du 19^{ème} siècle, où l'on épluche de très près toutes les conditions cognitives de la connaissance scientifique. Ce n'est donc pas du

tout naïf, chez Cournot. D'ailleurs, quelqu'un qui est sorti de l'école à 15 ans, qui ne fait rien de particulier durant quatre ans puis qui entre du premier coup cacique à Normale Sciences, ce n'est pas tout à fait le premier venu !

Bernard d'Espagnat. Malgré tout, Cournot considérait deux situations réelles indépendantes. Il estimait donc, me semble-t-il, avoir le droit de considérer des situations qui sont ce qu'elles sont indépendamment de notre connaissance – ce qu'il avait tout à fait le droit de faire à l'époque. Aujourd'hui, cela serait, peut-être, plus délicat.

Bertrand Saint-Sernin. Je pense qu'il a considéré que le problème changeait de nature au moment où la chimie de synthèse est apparue. Si l'on est capable de reconstituer fidèlement des objets naturels ou d'en introduire dans la nature, que la nature n'a pas elle-même produits, on dispose d'un critère empirique pour dire que dans certains domaines (peut-être étroits) on est capable de suivre des processus naturels. Cournot ne va pas plus loin. Il ne considère pas du tout que c'est une perspective universalisable et qui sera valable partout.

Bernard d'Espagnat. On est capable de suivre des processus naturels. Cela peut se comprendre en termes purement phénoménologiques, me semble-t-il. On n'est pas obligé de penser une réalité en soi, derrière.

Bertrand Saint-Sernin. Ce qui me frappe, en vous écoutant, c'est que lorsqu'on se déplace du domaine de la physique au domaine des biotechnologies et qu'on observe l'extraordinaire résistance des gens aux OGM, en France et en Europe, on se dit que le réalisme a une dimension politique et liée à la peur qui est très importante. Les gens se demandent si l'aliment qui leur est proposé, qui est un produit artificiel (en oubliant que toute l'agriculture et tout l'élevage fabriquent des choses artificielles), a les mêmes qualités que le produit naturel qui porte le même nom. Est-ce que l'insuline que prennent les diabétiques, qui est une levure génétiquement modifiée, a les mêmes propriétés que l'insuline naturelle ? Je crois que le problème du réalisme est un problème spéculatif, mais aussi un problème pratique extrêmement important qui entraîne parfois des réactions très forte de rejet.

Alexei Grinbaum. Je voudrais faire deux remarques. Une sur l'état actuel des choses, et une plus historique. Concernant votre question sur ce qui se passe aujourd'hui, depuis la publication de l'ouvrage de Bohm et Hiley. Hiley continue à publier tout seul. Mais il n'y a pas que lui. Il y a également Anthony Valentini, qui est l'un des principaux spécialistes de la théorie de Bohm aujourd'hui. A mon sens, la problématique de l'introduction du spin a plus ou moins été résolue. En revanche, n'a pas été résolu le fait de ne pas retrouver l'invariance de Lorenz. Il n'existe pas vraiment de solution.

Par ailleurs, concernant le dualisme que l'on est obligé d'imaginer dans la théorie de Bohm, c'est-à-dire les deux réalités qu'on est forcé d'admettre, je dois dire qu'au début et avant 1952, la démarche de de Broglie était tout autre. Tout comme Schrödinger, il ne réalise pas tout de suite qu'il s'agit d'une description dans l'espace de configuration et pas dans l'espace réel. Cette lecture actuelle est celle que nous donnons *a posteriori* aux travaux de de Broglie et Schrödinger. En 1927, ils n'en sont pas là. De Broglie essaie de changer la mécanique newtonienne, en refusant les lois de Newton dans l'espace réel (car il ne connaît pas encore l'espace de configuration). Il refuse la première loi de Newton et propose une dynamique fondée sur la vitesse plutôt que l'accélération. En découle ensuite la théorie de l'onde pilote. C'est historiquement assez remarquable, même si nous savons que la démarche de de Broglie a été sauvée par Bohm, qui a décidé de restituer une dynamique fondée sur l'accélération et d'introduire le potentiel quantique – ce qui entraîne deux réalités. Il n'existe

pas de potentiel quantique avant Bohm. Historiquement, il n'y avait donc ni les deux réalités, ni la tentative d'introduire du surphénoménal, du *ubber phenomenal*. Au départ, c'est une démarche de construction de modèle mathématique dans l'espace réel et en réfutant les lois de Newton. Les reproches philosophiques que nous avons listés aujourd'hui concernant la théorie de Bohm ne sont pas nécessairement pertinents si l'on retient la démarche initiale de de Broglie.

Bernard d'Espagnat. Certes. Pour continuer la démarche initiale de de Broglie, il faut bien, toutefois, faire du Bohm.

Alexei Grinbaum. Je suis d'accord. Mais, sur le plan philosophique, ces reproches portent beaucoup plus sur la solution de Bohm que sur les motivations de de Broglie.

Bernard d'Espagnat. D'accord. Mais de Broglie était quand même réaliste.

Franck Laloë. Je crois, sur le plan historique, que ni Bohm ni de Broglie n'étaient conscients de l'impossibilité de manipuler les positions qu'ils avaient introduites. La démonstration du fait que si l'on changeait l'équilibre quantique, si l'on pouvait manipuler les variables, un signal pourrait être propagé plus vite que la lumière date d'il y a moins de 10 ans. De Broglie et Bohm ne connaissaient pas les éléments dont j'ai parlé.

Alexei Grinbaum. En effet. Dans ce sens, la seule façon de sauver la théorie de de Broglie, ce n'est même pas la démarche de Bohm, c'est surtout le papier de Valentini qui, en 2001 ou 2002, montre qu'il n'y a pas de signal qui se propage plus vite que la lumière si on adopte une certaine lecture de la théorie de Bohm. La bonne lecture est très récente. Elle date de 2002. Même Hiley ne la connaissait pas.

Franck Laloë. Je souhaite revenir aux critiques introduites par Michel Bitbol tout à l'heure. L'une d'entre elles est que lorsqu'on mesure la position d'une particule, on la perturbe nécessairement. Certes, nous sommes tous d'accord là-dessus. Mais le but de la mécanique de Broglie Bohm n'est pas de rétablir toutes les idées de la mécanique classique ou la perturbation d'une position peut en principe être rendue arbitrairement faible. Au contraire, cette mécanique dit que ces positions sont constamment pilotées par les fonctions d'ondes ; c'est une vraie mécanique quantique. Le fait que la mécanique de Broglie Bohm admette des arguments du type microscope de Heisenberg n'est pas, à mon avis, une objection très fondamentale. Je dirais même qu'il me semble au contraire tout naturel que lorsqu'une particule pénètre dans l'appareil de mesure, elle soit perturbée par lui. Je ne pense pas que ce soit un argument très fort contre la théorie de de Broglie.

Michel Bitbol. Effectivement, de ce point de vue là, la vision de Bohm 1952 est assez voisine de l'interprétation initiale de Heisenberg : une particule a une trajectoire, et celle-ci est malencontreusement déviée quand on envoie un photon dessus pour l'observer. Mais, depuis Heisenberg, il y a eu Bohr ; il y a eu les surréflexions de Bohr déterminées par la discussion qu'il a eue avec Einstein en 1935. Bohr a compris à cette époque que la l'image selon laquelle il existe une trajectoire prédéterminée qui est ensuite malheureusement perturbée par le moyen d'observation est contradictoire avec sa propre vision de la mécanique quantique. Bohr a donc demandé aux physiciens de ne plus même imaginer une trajectoire initialement intacte et perturbée dans un second temps, mais d'accepter que la seule chose qui a du sens est le phénomène tel qu'il se produit dans le contexte d'un appareillage. Non pas le processus

existant en soi puis la perturbation secondaire par l'observation, mais le phénomène global incluant indissolublement ce qu'il y a, et ce que fait l'appareil.

En somme, Bohr a réfuté l'image de la perturbation, alors que Bohm l'a réintroduite à sa manière.

Alain Aspect. Je suis complètement d'accord avec ce que vous dites. Il faut arrêter de se référer au microscope de Heisenberg comme compréhension de la perturbation. La perturbation n'est pas quelque chose d'aussi naïf. Ce n'est pas parce qu'on envoie un photon sur l'électron que le photon est perturbé. Cela se fait sans contact.

Michel Bitbol. L'idée du microscope de Heisenberg est une belle image, au départ ; une image qui permet de se représenter la nouveauté quantique avec les outils conceptuels de la mécanique classique. Mais, une fois ce bénéfice obtenu, Bohr nous conseille de nous débarrasser de l'échafaudage de représentations issues de la mécanique classique, et de s'engager très franchement dans ce qu'il appelle la compréhension du phénomène indivisible, c'est-à-dire un phénomène qui est indissolublement déterminé par la totalité formée par ce qui est exploré et par l'instrument de l'exploration. D'ailleurs, Bohm le savait très bien. Dans son ouvrage de 1993, il indique que la différence entre Bohr et lui, est que Bohr s'interdit de se représenter ce qu'il ne peut pas connaître, alors que lui-même considère qu'on peut se le représenter même s'il n'est pas expérimentalement accessible.

Franck Laloë. Mon point n'était pas de prendre la défense de l'argument u microscope de Heisenberg. Je suis d'accord avec tout ce que vous dites, et je dis pas que cet argument explique tout. La seule chose que je dit est simplement qu'on ne peut pas réfuter la théorie de de Broglie Bohm sur la base d'un argument qu'on n'utilisera pas contre la théorie standard. Cela me semble illogique. Si l'on accepte quelque chose dans la théorie standard, on l'accepte aussi dans la théorie de Broglie Bohm.

Michel Bitbol. Certes, mais ce qui me gêne dans la théorie de Bohm n'est pas inclus dans la théorie quantique standard. En théorie quantique standard, le microscope de Heisenberg joue simplement le rôle subalterne d'un dispositif heuristique qui permet de s'initier métaphoriquement à la nouveauté de la situation quantique. Alors que dans la théorie de Bohm de 1952, il est plus que cela : il est un moyen pour la représentation théorique de prendre des distances par rapport au détail de ce qui est attestable expérimentalement

Roger Balian. Que l'on fasse de la mécanique quantique ordinaire ou que l'on fasse du Bohm, on est de toute façon obligé de se dire qu'une mesure est l'interaction de deux objets quantiques : un objet quantique qui est l'objet mesuré et un autre objet quantique, qui est l'appareil de mesure. Et comme l'appareil de mesure est grand, il en ressort un résultat qu'on peut y lire. Il s'agit de comprendre ce phénomène mais, en définitive, tout cela est quantique, globalement. L'approximation selon laquelle l'objet est classique et l'appareil le perturbe et celle selon laquelle l'appareil est classique sont toutes les deux fausses. Tout l'ensemble est quantique, mais le résultat de la mesure n'est pas une propriété de l'objet lui-même. C'est une propriété de l'objet telle qu'on l'observe avec l'appareil.

Michel Bitbol. Tout à fait.

Bernard d'Espagnat. C'est donc un abandon du réalisme ontologique.

Roger Balian. Oui.

Bernard d'Espagnat. C'est une importante étape franchie par rapport à la pensée classique qui identifiait la réalité à quelque chose qui existe en soi et qu'on peut connaître.

Alain Aspect. Je suis toujours violemment réaliste.

Roger Balian. Moi aussi, mais la réalité n'est pas l'image que l'on s'en fait, d'une particule qui aurait une position et une vitesse. La réalité est quelque chose qu'on essaie d'aborder.

Bernard d'Espagnat. Ne peut-on pas considérer que le réalisme au sens habituel est la conjugaison de deux idées ? L'une étant que cela fait sens de dire qu'il existe une réalité en soi, indépendante de nous et de ce que nous pouvons savoir, et l'autre que cette réalité est en principe connaissable par l'homme. Le réalisme habituel est la conjugaison de ces deux idées. Ce qui me semble assez clair, au vu de tous les développements de la physique quantique actuelle, c'est qu'il est raisonnable de les dissocier, au contraire. Une fois cette dissociation accomplie par la pensée, aucune donnée factuelle n'interdit, bien évidemment, de conserver la première des deux, ce qui nous évite l'outrecuidance à laquelle je faisais allusion tout à l'heure. Et quant à la seconde on doit la considérer pour le moment avec réserve, tout en gardant, si on le juge bon, l'espoir qu'elle sera un jour vérifiée.

Roger Balian. Non.

Bernard d'Espagnat. Alors que les physiciens classiques pensaient que les choses qu'ils avaient trouvées (comme la relativité générale) donnaient des informations sur la réalité en soi, je pense que maintenant l'attitude raisonnable est une attitude plus modeste qui consiste à considérer que ce n'est probablement pas le cas. Même les choses que nous essayons d'interpréter comme étant des réalités en soi ne le sont pas vraiment. Ce sont des descriptions de la réalité telle que nous la percevons.

Roger Balian. Je dirais les choses de façon un tout petit peu intermédiaire. Premièrement, il est évident que la réalité existe. Deuxièmement, il est non moins évident que l'on ne peut pas connaître totalement la réalité en soi. Mais on peut essayer d'approcher les lois qui existent, grâce à l'outil que sont les probabilités. Les probabilités sont un outil que notre esprit a inventé pour essayer de nous approcher le plus possible de cette réalité en soi dans laquelle nous ne pénétrons probablement jamais, mais que nous pouvons approcher de mieux en mieux. C'est comme cela que je vois le monde. Ou la science.

Bernard d'Espagnat. Je ne vois pas très bien en quoi les probabilités nous permettent d'approcher de mieux en mieux la réalité en soi.

Roger Balian. Quand on passe de la mécanique classique à la mécanique quantique, on approche de mieux en mieux cette réalité.

Bernard d'Espagnat. On approche de mieux en mieux les phénomènes mais rien n'empêche de prendre ce mot dans son acception étymologique : l'ensemble des apparences (au sens de « ce qui apparaît ») qui sont les mêmes pour nous tous.

Roger Balian. Nos théories sont de plus en plus proches de quelque chose. C'est asymptotique. En mécanique classique aussi, il y avait des probabilités, parce qu'on ne

mesurait jamais les choses avec une grande précision. Mais cela ne se voyait pas. Maintenant, nous sommes obligés de faire des théories approchées. Nous avons trouvé les bons outils pour nous approcher le mieux que nous pouvons dans l'état actuel de la science.

Bernard d'Espagnat. Mais on peut aussi dire que, pendant très longtemps, les hommes ont cru que des phénomènes d'éclipses ou autres étaient mystérieux ou démoniaques. Puis ils ont découvert les épicycles, avec la théorie de Ptolémée. Ce faisant, ils ont fait un grand progrès puisqu'ils ont pu *prévoir* (les éclipses en particulier). Puis, avec Newton, ils ont fait un autre progrès. Si vous l'entendez ainsi, alors oui, je suis d'accord. Les épicycles étaient déjà un progrès.

Roger Balian. Oui.

Hervé Zwirn. Je ne suis pas tout à fait d'accord.

Roger Balian. Il y a un côté un peu pessimiste, d'une certaine façon, en ce sens qu'on ne peut pas accéder aux choses en soi.

Alain Aspect. Si.

Roger Balian. « En soi », ai-je précisé.

Alain Aspect. Mais elles existent.

Roger Balian. Bien sûr qu'elles existent. Mais on ne peut pas y accéder. Le monde existe. Et il y a quelque chose d'assez remarquable, qui est que la biologie a fait évoluer notre cerveau de telle façon qu'on arrive à s'en approcher. C'est extraordinaire ! Mais on arrive seulement à s'approcher, on n'y accède pas en soi. En soi, pour moi, ça n'existe pas. C'est là ma vision philosophique personnelle.

Hervé Zwirn. Tu dis qu'on fait des progrès parce que les probabilités nous permettent d'avancer et de nous approcher.

Roger Balian. On est obligé de les utiliser.

Hervé Zwirn. Je suis d'accord avec cela à une condition : faire une distinction de niveaux, que nous n'avons pas faite. Les probabilités sont un outil qui nous permet d'approcher de plus en plus précisément la réalité phénoménale, c'est-à-dire celle qui se manifeste à nos observations. Là, la science fait des progrès. On ne peut évidemment pas le nier. C'est évident. En revanche, cela ne concerne absolument pas la question que nous posons auparavant. C'est curieux, dans ce genre de discussion sur le réalisme, ce glissement s'introduit toujours. Nous essayons de savoir s'il existe ou pas quelque chose, indépendamment des observateurs. Nous répondons par l'affirmative, puis nous passons à la description de ce quelque chose, par l'intermédiaire d'un discours scientifique, pour constater que la science a fait des progrès et que l'on arrive, au travers d'outils comme les probabilités, à décrire de mieux en mieux non pas ce qu'on a postulé comme existant indépendamment de tout observateur, mais l'image phénoménale que nous en avons. Le fait de progresser de plus en plus pour décrire les phénomènes, ce qui est incontestable, ne dit en rien si on s'est rapproché ou pas de ce qu'on a postulé.

Roger Balian. Si.

Hervé Zwirn. Non, car l'écart entre les deux peut rester aussi grand qu'on veut. Imaginons qu'il existe quelque chose, que « ça » existe et que ce « ça existe » se manifeste à nous à travers une certaine image phénoménale qui est à une distance donnée du "ça" (au sens d'une métrique que je ne peux pas décrire bien sûr et dont la nature même empêche d'être décrite). Imaginons ensuite que cette image phénoménale était difficile à comprendre et à décrire du temps de Grecs et que, petit à petit, nous nous en rapprochions. Pour autant, la distance que j'ai postulée entre le « ça » et cette image phénoménale n'a pas diminué du tout. Nous n'avons absolument pas progressé dans cet intervalle-là. Donc, nous n'avons pas répondu à la question initiale de savoir si nous décrivons de mieux en mieux ou pas la réalité en soi. Nous savons simplement que nous décrivons de mieux en mieux la réalité des phénomènes.

Roger Balian. Je dirais cela un petit peu autrement, en indiquant que nous nous faisons des images qui ressemblent de plus en plus à la réalité.

Hervé Zwirn. Non. Elles ressemblent de plus en plus aux phénomènes.

Roger Balian. Elles ressemblent de plus en plus parce que nous sommes capables d'agir de mieux en mieux.

Alain Aspect. Si, à la fin, on est capable d'agir, on ne peut que penser qu'on s'est un peu rapproché.

Roger Balian. Oui. Il y a progrès.

Alain Aspect. Je vais être obligé de partir.

(Alain Aspect quitte la réunion.)

Hervé Zwirn. Nous agissons dans notre monde des phénomènes, sur lequel nous avons de plus en plus d'emprise, indéniablement. Mais le saut logique qui consiste à passer de cette conclusion à celle selon laquelle nous nous sommes rapprochés de la réalité en soi (quel que soit le sens qu'on donne à ce mot) n'est pas permis.

Roger Balian. Nous ne sommes pas capables de faire mieux qu'une image de la réalité en soi, mais nous sommes capables de faire des images probablement plus proches – « plus proches » ne signifiant rien pour moi, puisque la réalité en soi existe peut-être pour moi, en tant qu'animal doué de raison, mais me sera toujours inaccessible puisque j'en fais partie et que je suis un animal comme les autres.

Bernard d'Espagnat. Il me semble que nos points de vue se rapprochent.

Pour en revenir aux épicycles, il est vrai que nous avons progressé quand nous avons découvert que les éclipses pouvaient être expliquées au moyen de la théorie de Ptolémée, avec des épicycles. Mais ensuite, on s'est aperçu que, d'une certaine manière, la description était complètement erronée. Autrement dit, on a fait un progrès quand on a découvert les épicycles et la théorie de Ptolémée, mais c'est plutôt un progrès dans la connaissance des phénomènes qu'une avancée dans la direction de la meilleure connaissance de la réalité en soi – puisque,

finalement, la réalité en soi telle que Newton puis Einstein prétendirent nous la décrire est vraiment complètement différente.

Roger Balian. Je ne dirais pas cela.

Bernard d'Espagnat. Il me semble en tout cas qu'on ne peut pas dire qu'il y a eu une avancée continue dans l'image qu'on s'est faite du monde. Ce ne fut pas une longue route tranquille.

Roger Balian. Je ne dirais pas cela ainsi. Un dessin au crayon est moins informatif qu'une photo en noir et blanc qui est elle-même moins informative qu'une photographie en couleur : on s'approche de plus en plus de l'objet qu'on veut représenter.

Bernard d'Espagnat. Pour que la métaphore soit pertinente il faut quand même admettre que dans le dessin au crayon on a dû beaucoup effacer.

Roger Balian. Bien sûr, le dessin au crayon est bien plus imparfait que la photographie en couleur, mais il n'empêche que c'est une façon de s'approcher de la réalité. De même, les épicycles étaient une façon de s'en approcher. Cette image était moins bonne que celle de Newton, qu'elle-même est moins bonne que celle d'Einstein etc.

Bernard d'Espagnat. Le cheminement fut, disons, plutôt chaotique en apparence mais je reconnais bien volontiers que dans notre pouvoir de synthèse et de prévision (autrement dit, dans notre « connaissance de la réalité empirique ») il y a eu au total une avancée vraiment considérable, comportant un fort élément sous jacent de continuité dû pour une bonne part à l'emploi des mathématiques.

Roger Balian. C'est ainsi que je vois le progrès scientifique.

Michel Bitbol. Je pense quand même que Monsieur d'Espagnat a raison. Comme l'a rappelé Hervé Zwirn, on confond souvent deux choses : la réalité au sens empirique et la réalité au sens de ce qu'il y a avant l'empirique et qui cause l'empirique (on pourrait dire l'empirique et le métempirique, pour employer le vocabulaire de Vladimir Jankélévitch). Ce sont deux choses très différentes. On peut parfaitement s'approcher autant qu'on veut de la réalité empirique sans effleurer en quoi que ce soit le domaine métempirique. Par exemple, si vous ajoutez un nombre extraordinaire d'épicycles, vous arriverez à reproduire aussi bien que la théorie newtonienne ou même que la théorie einsteinienne la trajectoire des planètes. Mais, au fond, vous n'aurez rien fait de plus que reproduire les phénomènes. Vous n'aurez en rien élucidé la nature des planètes, de la gravitation etc.

Roger Balian. Je ne dirais pas cela. Augmenter le nombre d'épicycles, c'est compliquer la théorie. Les nouvelles théories, comme celle du Newton, sont plus simples. Et c'est très probable, puisque ça marche.

Michel Bitbol. Effectivement, il y a en plus le critère de simplicité.

Roger Balian. Et le critère « ça marche ».

Michel Bitbol. Il faut à la fois « ça marche » et « c'est simple ». « Ça marche » ne suffit pas en soi.

Roger Balian. Si l'on est capable d'agir, cela signifie que si on avait mis tous les épicycles, on aurait eu un mal fou à y parvenir. Là, on y parvient plus facilement. On est donc plus près de la réalité.

Michel Bitbol. En vérité, le critère de simple adéquation empirique ne suffit pas à se persuader qu'une certaine représentation est une bonne image d'une réalité extérieure « en soi ». Il faut plus que cela. Il faut des critères supplémentaires que Larry Laudan appelle des critères ampliatifs (car ils amplifient le domaine qui fonde la théorie en allant au-delà de la seule attestation expérimentale). Parmi ces critères, on trouve l'unité, la simplicité, la beauté... Mais ce ne sont pas des critères pleinement convaincants. Nous pouvons nous demander si ce n'est pas notre esprit qui est en jeu, lorsque nous avançons de tels critères, si ces critères ne dépendent pas de nous, de nos préférences esthétiques et intellectuelles plutôt que de la réalité extérieure à nous que nous déclarons vouloir élucider.

Hervé Zwirn. Je voudrais même enfoncer un peu plus le clou. Il y a un paradoxe dans le fait de dire à la fois qu'il existe quelque chose d'indépendant de nous (de notre esprit) et qu'une théorie qui nous semble, en tant qu'êtres humains, simple doit être vraie (c'est-à-dire correspondre à ce quelque chose) puisqu'elle est simple. Ou la réalité existe indépendamment de nous et la notion de simplicité, qui est complètement liée à l'être humain, n'a rien à voir avec la vérité. Ou bien ce qu'on veut décrire est une création de l'esprit humain et on peut, dans ce cas-là, retenir un critère de simplicité lié à notre esprit. Si ce qui existe ne dépend absolument pas du cerveau humain, ce n'est pas parce que c'est simple que ça y correspond.

Roger Balian. Bien sûr. J'ai dit que c'était plus simple *et* plus efficace.

Hervé Zwirn. L'efficacité est un critère que nous pouvons effectivement admettre, mais la simplicité... Elle est, certes, souvent invoquée, dans les théories scientifiques. Si une théorie est plus simple, elle est plus pratique, elle est plus belle. Mais dire cela, c'est vraiment mesurer à l'aune de notre cerveau. Or il n'est pas acceptable d'utiliser une mesure à l'aune de notre cerveau alors même qu'on parle de l'existence de quelque chose qui est complètement indépendant de ce cerveau. Il y a là une erreur de raisonnement. Peut-être que s'il existe quelque chose qui est complètement indépendant de notre cerveau, ce quelque chose fonctionne-t-il de manière totalement différente de ce qui nous paraît simple. Pourquoi est-ce que parce que c'est simple, ce serait plus vrai ? Il n'y a pas de raison.

Alexei Grinbaum. En philosophie de la mécanique quantique, il n'existe que deux façons d'être réaliste à propos des entités : celle d'Everett et celle de Bohm. Souvent, les physiciens tendent à rejeter les deux. Cela ne préjuge pas de leur droit de croire que « ça existe » ou « ça donne le sentiment d'être une entité ». Mais le réalisme spontané, s'il est développé systématiquement, doit toujours se heurter, en quelque sorte, à ce choix entre Everett ou Bohm. Sinon, ce n'est pas un réalisme des entités comme position philosophique mais simplement un pressentiment. C'est, normalement, quelque chose que les physiciens vivent très mal. En effet, ils veulent croire aux entités, mais le réalisme philosophiquement défendable se révèle être autre que le réalisme des entités. C'est autre chose. C'est un point de vue philosophique que vous surajoutez à la théorie physique. Si l'on veut être réaliste à propos de la mécanique quantique il n'existe que les deux solutions que je viens d'évoquer. Ou alors, il faut adopter une forme de réalisme beaucoup plus imagée, comme le réalisme des structures.

Franck Laloë. J'ai parlé de la théorie de Broglie Bohm en essayant de la défendre parce que c'était le programme qui m'était proposé. Mais je voudrais préciser qu'à mon sens, la façon la plus intéressante de modifier la mécanique quantique n'est pas celle-là. Je trouve beaucoup plus constructives et intéressantes les théories qui modifient l'équation de Schrödinger, comme celles de Bohr ou Ghirardi.

Roger Balian. Et qui pourraient être testées.

Bernard d'Espagnat. Nous pourrions, évidemment, en discuter aussi. Pour ma part, à propos de la théorie de Ghirardi, Rimini et Weber, j'en étais resté à l'idée (qui m'avait d'ailleurs été confirmée par Ghirardi, il y a longtemps) qu'elle n'était probablement pas relativiste. Est-ce que cela s'est arrangé, depuis ?

Alexei Grinbaum. La version initiale de la théorie GRW n'était pas relativiste. En revanche, celle de Pearle, qui est un autre spécialiste de ce genre d'approche, respecte les contraintes nécessaires.

Bernard d'Espagnat. Il est tard. Je vous propose de clore la séance. La prochaine se tiendra le 16 janvier. Matteo Smerlak nous parlera de la théorie de Rovelli et de son application à la résolution du problème EPR. Il nous montrera comment, grâce à cette théorie, retrouver de la localité – mais en lâchant beaucoup de lest du côté du réalisme.