

## Le sphinx quantique. Le problème de la mesure

« Qu'est-ce qui est à la fois mort et vivant et n'apparaît jamais comme tel ? », dit le monstre fabuleux. Rares sont les énigmes scientifiques qui ont suscité pareille foison d'interprétations.

par Michael Esfeld

*Sciences et avenir hors série. Le paradoxe du chat de Schrödinger*, No. 148 Octobre / Novembre 2006, pp. 30–34

Situé au cœur de l'interprétation de la mécanique quantique, le problème de la mesure consiste à se demander quel est le rapport entre le domaine microscopique, que décrit la mécanique quantique – le domaine des atomes et de leurs constituants comme les électrons, les protons et les neutrons, appelés de manière générale « systèmes quantiques » par la suite –, et le domaine macroscopique des objets qui nous entourent, décrit par la physique classique. Ce problème ressort de façon claire dans la fameuse expérience de pensée (*Gedankenexperiment*, en allemand) du chat de Schrödinger. Dans un article célèbre de 1935, Erwin Schrödinger considère la situation que nous résumerons de la façon suivante : un chat se trouve dans une boîte fermée, aux parois opaques, avec une petite quantité d'une substance radioactive ainsi qu'un récipient contenant un poison qui, une fois qu'il l'a inhalé, provoque la mort immédiate du chat. Supposons, pour

simplifier la présentation, qu'il s'agit d'un seul atome radioactif. La désintégration de l'atome enclenche un mécanisme qui brise le récipient, entraînant donc la mort du chat.

Le problème de la mesure est un problème précis au sens où il met en jeu deux propositions qui ne peuvent pas être vraies ensemble.

*La proposition de départ.* – Si l'on mesure une propriété d'un système physique, le processus de mesure mène à un résultat numérique bien défini qu'indique l'appareil de mesure.

Immédiatement après la mesure, le système mesuré se trouve dans un état où il possède une valeur définie de la propriété mesurée, à savoir la valeur qu'indique l'appareil. Dans l'expérience de pensée de Schrödinger, on peut regarder le chat comme un appareil de mesure. Cet appareil a pour tâche de mesurer si oui ou non l'atome radioactif s'est désintégré. Ainsi, la proposition de départ dit que l'appareil de mesure qu'est le chat se trouve ou bien dans l'état « vivant », ou bien dans l'état « mort » ; « vivant » indique que l'atome est dans l'état « non désintégré » et « mort », que l'atome est dans l'état « désintégré ».

*La proposition du formalisme de la mécanique quantique.* – Au centre des équations de la mécanique quantique se trouve une dynamique des systèmes quantiques, formulée par une équation qui décrit l'évolution de leurs états dans le temps : l'équation de Schrödinger. Bien qu'elle serve de base pour calculer des probabilités, cette équation décrit l'évolution des

états des systèmes quantiques de façon déterministe. De plus, si un système quantique est pris au départ dans un état où une de ses propriétés possède une valeur numérique définie, l'évolution de son état sera telle qu'il ne possédera plus de valeur définie de la propriété en question : il entre au contraire dans un état qui est une *superposition* de toutes les valeurs possibles de ladite propriété. Ainsi, si ce qui nous intéresse de l'atome radioactif dans l'expérience de pensée de Schrödinger est de savoir si oui ou non il s'est désintégré, on a affaire à deux valeurs définies de la propriété en question : « non désintégré » et « désintégré ». Si au départ de l'expérience l'atome est dans l'état « non désintégré », cet état se développe rapidement de façon à devenir une superposition de « non désintégré » et de « désintégré ».

L'état de superposition concerne non seulement l'atome radioactif, mais – suivant l'évolution des états que décrit l'équation de Schrödinger – tous les systèmes avec lesquels cet atome interagit, notamment le chat. Simplifions en supposant que l'atome radioactif interagit directement avec le chat. On parle alors de *intrication*, ou de *enchevêtrement*, des états de plusieurs systèmes.

La propriété du chat qui nous intéresse admet les valeurs « vivant » ou « mort ». Cette propriété est corrélée avec la propriété de l'atome radioactif qui peut prendre les deux valeurs « non désintégré » et « désintégré » – cette corrélation est établie à l'aide du mécanisme décrit plus haut. Au départ, il y a corrélation entre la valeur « non désintégré » de la

propriété de l'atome radioactif et la valeur « vivant » de la propriété du chat. De cette interaction il résulte que l'état de l'atome est intriqué avec l'état du chat. Par conséquent, si l'état de l'atome se développe de façon à devenir une superposition entre « non désintégré » et « désintégré », alors l'état du chat se développe de façon à devenir une superposition entre « vivant » et « mort ».

En résumé, le formalisme de la mécanique quantique, c'est-à-dire l'équation de Schrödinger, nous dit que si un appareil de mesure entre en interaction avec un système quantique, l'état de l'appareil devient intriqué avec l'état du système quantique, de sorte que tous les deux se trouvent dans un état de superposition de toutes les valeurs possibles de leurs propriétés. L'intrication indique certaines corrélations précises entre ces valeurs, comme la corrélation entre « vivant » et « non désintégré » et entre « mort » et « désintégré ». Selon la mécanique quantique, l'appareil de mesure – le chat ici – n'est jamais dans un état où il possède une valeur définie – « vivant » ou « mort » – de la propriété que l'on étudie.

Si l'on tient compte de la proposition de départ (1) et de la proposition du formalisme quantique (2), le problème de la mesure devient : 1) non seulement le sens commun, mais toute expérience scientifique présuppose qu'un processus de mesure mène à un résultat défini, comme ou bien « vivant » ou bien « mort » pour le chat, corrélé avec ou bien « non désintégré » ou bien « désintégré » pour l'atome ; 2) si l'on applique l'équation de Schrödinger à une situation de mesure, on

n'obtient jamais une valeur définie ni pour l'appareil de mesure ni pour le système quantique, mais toujours une intrication des états des deux systèmes qui est une superposition de toutes les valeurs possibles des propriétés étudiées – ainsi, le chat se trouve dans un état de superposition de « vivant » et « mort » corrélé avec l'atome se trouvant dans un état de superposition de « non désintégré » et « désintégré ».

La résolution de ce problème aboutit à deux interprétations différentes de la mécanique quantique : ou bien on retient la première proposition et l'on adapte le formalisme de la mécanique quantique de sorte qu'il admette une seule valeur définie comme résultat de mesure ; ou bien on retient la seconde proposition et l'on modifie le sens commun et les présuppositions de l'expérience scientifique afin de les rendre compatibles avec une vision du monde suivant laquelle il y a toujours et pour tous les systèmes des états de superposition et jamais des valeurs définies des propriétés. Chacune de ces deux interprétations inclut le domaine microscopique des systèmes quantiques, ainsi que le domaine macroscopique des objets familiers tels que les appareils de mesure et les chats. A cause de l'interaction entre les systèmes microscopiques et les systèmes macroscopiques, interaction qui mène à l'intrication des états suivant le formalisme de la mécanique quantique, il n'y a pas de position intermédiaire permettant de dire à la fois que l'intrication est une caractéristique universelle des systèmes quantiques au niveau microscopique

et que les systèmes macroscopiques possèdent toujours des valeurs définies de leurs propriétés. Si les systèmes macroscopiques possèdent toujours des valeurs définies de leurs propriétés, alors les systèmes quantiques avec lesquels ils interagissent – dans un processus de mesure par exemple – possèdent également des valeurs définies de leurs propriétés. Par conséquent, les systèmes quantiques connaissent des processus de dissolution des intrications et de réduction des superpositions à une seule valeur définie. Et si l'intrication est une caractéristique universelle des systèmes quantiques au niveau microscopique, alors elle touche également les systèmes macroscopiques, comme les chats.

Pour se tirer d'affaire, n'existe-t-il pas une manière plus simple que d'opter pour l'une ou l'autre des deux interprétations mentionnées ? Ainsi, pourquoi ne pas adopter simplement une interprétation d'ignorance qui consiste à soutenir la proposition suivante : il n'y a pas de superpositions de toutes les valeurs possibles des propriétés des systèmes quantiques et, par conséquent, il n'y a pas d'intrications des états de plusieurs systèmes. Parler de superposition indique notre ignorance des valeurs définies que prennent les propriétés du système quantique. Ainsi, dans l'expérience de pensée de Schrödinger, l'atome radioactif possède toujours ou bien la valeur « non désintégré » ou bien la valeur « désintégré » de la propriété en question – et le chat est toujours ou bien vivant, ou bien mort. Mais on ignore si l'atome possède la valeur « non désintégré » ou la valeur

« désintégré » de la propriété en question. Pour cette raison, on emploie un formalisme qui travaille avec les notions de superposition et d'intrication.

Le théorème de John Stewart Bell (1928-1990), publié en 1964, apporte une réponse claire à cette question. Ce théorème montre que si les corrélations d'intrication entre les systèmes quantiques – et donc les états de superposition de toutes les valeurs possibles des propriétés des systèmes quantiques – admettaient une interprétation d'ignorance, alors il existerait une limite supérieure pour ces corrélations. Or, dans tous les cas d'intrication d'états, la théorie quantique prévoit des corrélations qui dépassent la limite imposée par le théorème de Bell. Ces corrélations ont été confirmées par des expériences. Par conséquent, le théorème de Bell montre qu'on ne peut pas simplement adopter une attitude instrumentaliste envers la mécanique quantique : il n'est pas possible d'accepter les prédictions de la mécanique quantique sans accepter également les principes sur lesquels se basent ces prédictions, à savoir notamment la superposition et son corollaire, l'intrication d'états de différents systèmes.

Alors, est-il possible d'avoir le beurre et l'argent du beurre en matière d'interprétation de la mécanique quantique ?

Autrement dit, peut-on adopter une interprétation qui accepte les superpositions et les intrications d'états au niveau des systèmes quantiques et qui permette en même temps de reconnaître des valeurs définies comme résultats de mesure sans changer le formalisme de la mécanique quantique, c'est-

à-dire sans modifier l'équation de Schrödinger ? Le progrès physique le plus significatif en rapport avec le problème de la mesure depuis l'époque de Schrödinger est la *théorie de la décohérence*. En bref, la décohérence signifie qu'en réalité les intrications et les superpositions persistent, même lors d'un processus de mesure. Elles nous sont cependant inaccessibles, en tant qu'observateurs locaux qui n'ont pas d'accès expérimental à la réalité comme tout. Il nous semble donc avoir affaire à des systèmes possédant chacun des valeurs définies des propriétés observées.

La théorie de la décohérence ne résout donc pas le problème de la mesure. Elle permet cependant de le concevoir de façon claire : existe-t-il des états de systèmes physiques – microscopiques et macroscopiques – qui possèdent des valeurs définies ? Si oui, comment la dissolution de l'intrication quantique s'effectue-t-elle, la décohérence n'étant pas suffisante ? Ou bien tous les systèmes physiques, y compris ceux qui nous sont familiers comme les chats, sont-ils soumis aux intrications quantiques, la décohérence expliquant pourquoi le monde nous apparaît comme s'il y avait des systèmes possédant des valeurs définies de leurs propriétés ? Dans un article publié en 1957, le physicien Hugh Everett développe l'idée suivant laquelle la dynamique de Schrödinger est la seule dynamique des systèmes quantiques. Les intrications d'états sont par conséquent universelles. Aucune dissolution d'intrications n'intervient, pas même dans un processus de mesure. La mesure est un processus comme

tous les autres, prolongeant simplement les intrications de sorte que tous les systèmes se trouvent dans des états de superposition de toutes les valeurs possibles de leurs propriétés. En un mot, le chat de Schrödinger n'est jamais mort : il continue éternellement à exister dans une superposition « vivant » et « mort » (*lire, ci-dessus, « les Branches de l'univers »*). Cette position est *radicale*, parce qu'elle implique que le monde est en fait très différent de la manière dont on le perçoit et dont on le conceptualise. Elle peut employer la décohérence afin d'expliquer pourquoi le monde apparaît comme si le chat de Schrödinger est ou bien vivant ou bien mort.

Un autre type d'interprétation, *modérée*, cherche à rendre la théorie quantique cohérente avec les autres théories et descriptions du monde, y compris l'expérience que l'on a des objets macroscopiques qui nous entourent. Cette position s'engage à supposer que la dynamique qu'exprime l'équation de Schrödinger n'est pas la dynamique complète des systèmes quantiques. On modifie l'équation de Schrödinger en postulant l'existence d'une dynamique qui mène à la dissolution des intrications et à la réduction des superpositions, de sorte que les systèmes possèdent des valeurs numériques définies de leurs propriétés. En conséquence, il y a des systèmes quantiques qui possèdent réellement des valeurs définies de leurs propriétés. Tandis que l'équation de Schrödinger est déterministe, les propositions de modification de cette équation introduisent en règle générale un élément

indéterministe. Par conséquent, suivant ces positions, les probabilités quantiques sont des probabilités objectives dans la nature (*lire, ci-contre, « les Réductions de superpositions spontanées »*).

En résumé, la situation dans l'interprétation de la mécanique quantique est claire : il faut ou bien changer la dynamique de Schrödinger pour admettre que les systèmes – macroscopiques ou microscopiques – possèdent des états où les valeurs de leurs propriétés sont définies, ou bien concéder que le chat de Schrödinger – tous les systèmes macroscopiques en fait – se trouve dans des états de superposition intriqués avec des états de beaucoup d'autres systèmes.

Michael Esfeld est professeur ordinaire d'épistémologie et de philosophie des sciences à l'Université de Lausanne

Michael-Andreas.Esfeld@unil.ch

## POUR EN SAVOIR PLUS

« Are There Quantum Jumps ? », de John S. Bell (*in* « Schrödinger - Centenary Celebration of a Polymath », ouvrage collectif dirigé par Clive W. Kilmister, pp. 41-52, Cambridge University Press, Cambridge, 1987 ; réimprimé dans « Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics », de John S. Bell, pp. 201-212, Cambridge University Press, Cambridge, 1987). • « Mind, Brain and the Quantum - The

Compound “I” », de Michael Lockwood (Blackwell, Oxford, 1989). • « Physique quantique et représentation du monde », d’Erwin Schrödinger (« Points Sciences »/Seuil, 1992).

• « Quantum Mechanics and Experience », de David Z. Albert (Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1992).

## Encadré 1

### La théorie GRW. Les réductions de superpositions spontanées

Afin de tenir compte des valeurs numériques définies comme résultats de mesures, Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber ont proposé en 1986 une modification de la dynamique de Schrödinger. Cette proposition élaborée assume les réductions de superpositions spontanées indépendamment des mesures et peut, en principe, être testée expérimentalement. D’après John Bell, Schrödinger aurait regardé la proposition de Ghirardi, Rimini et Weber comme un pas important dans l’interprétation de la mécanique quantique. D’autres avancées en ce sens proposent des *variables cachées*, notamment la théorie de David Bohm (1917-1992), qui mène cependant aux mêmes prédictions que la mécanique quantique standard (*lire aussi, page 71, « la Théorie de Bohm »*).

Pourtant, une dynamique des réductions de superpositions ne change rien au fait que ce qui est fondamental selon la théorie quantique, c’est l’intrication d’états. Autrement dit, dans une

philosophie de la nature qui se base sur la physique quantique, ce ne sont pas les intrications d'états mais plutôt les cas d'absence d'intrications qui sont à expliquer. Néanmoins, s'il existe une dynamique qui mène à des réductions de superpositions et d'intrications et ainsi à des systèmes quantiques qui possèdent des propriétés avec des valeurs numériques bien définies, on peut affirmer que cette dynamique décrit la base à partir de laquelle se développent ensuite des systèmes physiques complexes, comme les molécules, les organismes et finalement les humains.

M. E.

## Encadré 2

### L'interprétation d'Everett. Les branches de l'univers

La proposition de Hugh Everett d'accepter la dynamique de Schrödinger comme la seule dynamique des systèmes quantiques mène à l'idée qu'il y a différentes branches de l'univers. Le fait que le chat de Schrödinger continue éternellement à exister dans une superposition des états « vivant » et « mort » intriquée avec l'atome radioactif continuant éternellement à exister dans une superposition des états « non désintégré » et « désintégré » veut dire la chose suivante : il y a une branche de l'univers dans laquelle il y a un chat vivant et un atome non désintégré, et une autre branche de l'univers dans laquelle il y a le même chat qui est

mort et le même atome qui est désintégré. Si l'on étend cette position à des exemples avec plusieurs, voire un nombre infini des valeurs possibles des propriétés en question, on arrive à l'idée d'un univers à un nombre infini de branches, les systèmes existant dans l'univers – y compris les observateurs et leur conscience – étant dupliqués un nombre infini de fois à travers toutes les branches de l'univers.

M. E.