



HAL
open science

Dieu joue-t-il aux dés ?

Michel Paty

► **To cite this version:**

| Michel Paty. Dieu joue-t-il aux dés ?. Sciences et Avenir, 2001, n°. 128, p. 6-7. halshs-00177348

HAL Id: halshs-00177348

<https://shs.hal.science/halshs-00177348v1>

Submitted on 7 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dieu joue-t-il aux dés ?

(La nature et les probabilités)

MICHEL PATY

“Dieu ne joue pas aux dés !”, avait coutume de dire Einstein à propos de la mécanique quantique, présentée comme la théorie fondamentale de la matière atomique et des interactions entre la matière et le rayonnement, et faisant grand usage des probabilités - et même un usage fondamental. On a souvent voulu voir dans cette expression un refus de la mécanique quantique au nom d'une exigence de déterminisme qui réclame d'une théorie des descriptions et des prédictions *certaines*. Et l'on a souvent fait d'Einstein, dans ce sens, un partisan du “programme déterministe” en physique quantique, proposant, avec Louis de Broglie, David Bohm et d'autres, de rajouter aux variables dynamiques classiques soumises aux “relations” d'indétermination de Heisenberg, d'autres variables supplémentaires, mais cachées à l'observation, et qui rétabliraient le déterminisme. Mais il s'en est défendu avec vigueur.

En fait, les choses sont loin d'être aussi simples. Certes, Einstein récusait l'idée que le hasard aît un rôle fondamental dans la nature, ce qui limiterait de manière arbitraire la portée de toute théorie physique et même de toute connaissance scientifique. Il se trouvait, à cet égard, sur la même position que celle défendue par Spinoza trois cents ans auparavant, qui refusait le hasard au nom de la *nécessité absolue* dans la nature. Mais les probabilités, dont la théorie et les applications s'étaient développées entretemps, ne devaient pas nécessairement être assimilées au hasard, même si ce fut la considération de ce dernier qui leur donna naissance. Elles étaient devenues un outil pour la physique, en particulier pour la pénétration des domaines atomique et du rayonnement, auxquels la pensée (et les observations) ne pouvaient accéder directement.

Et Einstein fut même, dans les toutes premières années du XX^e siècle, celui qui introduisit cet outil probabiliste dans un sens *physique*, et non pas seulement mathématique (combinatoire), et qui s'en servit pour découvrir plusieurs propriétés objectives essentielles des systèmes physiques associés aux phénomènes quantiques, comme le caractère dual, corpusculaire et ondulatoire, de la lumière, et les propriétés statistiques non classiques des gaz de photons et de certains atomes (les “bosons”), qui

seraient ensuite rapportées à l'“indiscernabilité des particules quantiques identiques”, un caractère fondamental des objets, ou systèmes, quantiques.

Einstein concevait donc fort bien que les probabilités puissent être un outil puissant d'exploration de la réalité physique, en particulier quand celle-ci échappe à l'appréhension directe des sens et des appareils de laboratoire. Elles nous donnent, pensait-il, des informations statistiques, à partir desquelles il devrait être possible, pour une théorie physique satisfaisante, de remonter à la description d'un système physique (particule, etc.) individuel, description qui serait ainsi “complète”. C'est avec cette idée en tête qu'il interrogea sans relâche, jusqu'à la fin de sa vie, la mécanique quantique : était-elle une théorie physique “complète” dans ce sens ? Contrairement à une idée reçue, Einstein acceptait parfaitement la validité de la mécanique quantique. Mais il critiquait l'idée qu'elle serait complète, et l'“interprétation” (de Bohr et de l'“Ecole de Copenhague”) qui affirmait qu'elle l'était à condition de considérer que la théorie physique porte sur l'*observation* de la réalité, et non sur la *réalité physique* elle-même.

Le célèbre “argument EPR” représente le point culminant des interrogations d'Einstein sur ce sujet. Or, si l'on suit le raisonnement de cette “expérience de pensée”, tel qu'Einstein l'a explicité à de nombreuses reprises, on y constate une hiérarchie des propositions qu'il met en jeu. L'existence d'une *réalité physique*, celle de systèmes physiques individuels, est posée en premier lieu, puis l'exigence d'une *théorie complète* capable de décrire ces derniers. Un critère, ou *principe de localité* ou de *séparabilité locale*, est ensuite invoqué pour réaliser ce projet (afin d'assurer l'indépendance mutuelle de deux sous-systèmes libres d'un système englobant). Einstein montre alors que ce critère, qu'il posait en principe, est en contradiction avec la description des systèmes conçus comme individuels. Il reste la solution, compatible avec la séparabilité, d'une description seulement statistique des systèmes considérés.

On peut voir, dans l'expression familière “Dieu ne joue pas aux dés”, un simple résumé de cette conclusion, bien plutôt qu'un refus pur et simple d'une description probabiliste. “Dieu”, c'est-à-dire, comme pour Spinoza encore, la Nature, la réalité, et la possibilité de sa description par la pensée physique, sont au centre de ses remarques sur l'interprétation de la mécanique quantique. Pour les raisons décrites, la description proposée par la mécanique quantique n'était, à ses yeux, que statistique (comme au jeu de dés), puisqu'elle était impuissante pour les systèmes individuels... Cette insuffisance tenait, pour lui, à celle des concepts de la mécanique quantique, trop proches de ceux de la mécanique classique, et il préconisait, pour aller plus loin, une approche moins directe et plus fondamentale.

Depuis lors, les développements de la physique quantique ont permis de dépasser la limitation qu'Einstein voyait à la portée de la théorie, en lui donnant tort sur un

point, et raison sur un autre. L'étude des corrélations entre des sous-systèmes du type EPR (théorème de Bell, expériences d'Aspect) a mis en évidence la *non-séparabilité locale* comme une *propriété physique* de ces systèmes, contrairement à l'hypothèse de séparabilité ou de localité d'Einstein, et rien ne s'oppose donc plus en principe à la possibilité de description individuelle de tels systèmes par la théorie quantique. D'autre part, des *systèmes physiques individuels* ayant des propriétés quantiques ont pu être mis en évidence, notamment par leur propriété d'interférer avec eux-mêmes, et être décrits, conformément à l'exigence d'Einstein...

Ces deux types de propriétés physiques, désormais constatées au niveau des phénomènes, étaient déjà présentes dans la formulation "mathématique" de la mécanique quantique (par le "principe de superposition"), ce qui ne peut que donner du poids à l'idée que la mécanique quantique est une "véritable" théorie physique, qui contient son interprétation physique avec sa forme même (ses grandeurs et ses équations); au lieu qu'on avait longtemps cru que ce n'était qu'un formalisme mathématique muni d'une interprétation physique supplémentaire rapportée aux conditions d'observation (interprétation "orthodoxe", ou "de Copenhague").

Dans ce cas, la théorie quantique nous donnerait un accès direct (en termes symboliques, théoriques) aux phénomènes et aux systèmes proprement quantiques. Les probabilités y joueraient deux rôles distincts. L'un, au niveau de la représentation théorique, est celui d'une fonction, portant un contenu physique, spécifique aux systèmes quantiques : plutôt que la probabilité elle-même, c'est l'"amplitude de probabilité", ou "fonction d'état" (vulgairement appelée "fonction d'onde"), soumise au "principe de superposition", qui porte ces caractères, dont l'effet se retrouve dans la probabilité proprement dite (qui est le module de cette amplitude élevé au carré). La probabilité ici, fait sens pour un système ou un événement individuel. L'autre rôle des probabilités se manifeste au niveau expérimental, où les résultats, de nature statistique, sont directement comparables aux fréquences données par ces probabilités.

On peut concevoir, d'une manière générale, que d'autres domaines d'application de la théorie mathématique des probabilités puissent illustrer ce rôle "fonctionnel" des probabilités, significatif au niveau individuel dans une description théorique, et distinct de la statistique au niveau de la mesure pour des ensembles (par exemple, la description des aspects structurels, et non plus en termes de trajectoires particulières, dans la physique des systèmes dynamiques). En ce sens, notre pensée physique des probabilités a évolué par rapport à celle des commencements de la physique quantique et de la conception que s'en faisaient Einstein et ses contemporains. Cette évolution a très vraisemblablement à voir aussi avec celle qu'a connue la théorie mathématique des probabilités elle-même, notamment depuis les travaux de Kolmogorov.

Les probabilités, comme les autres grandeurs mathématiques, peuvent désormais être conçues indépendamment d'une signification pratique ou sensible qui semblait immédiate, pour être investies d'une autre façon, plus abstraite, dans des considérations physiques, permettant ainsi d'ouvrir de nouvelles voies théoriques.

Einstein, lettre à Max Born (7 sept. 1944) (*in* A. Einstein, M. Born, *Correspondance 1916-1955*, Seuil, Paris, 1969) : “ Tu crois au Dieu qui joue aux dés, et moi à la seule valeur des lois dans un univers où quelque chose existe objectivement, que je cherche à saisir d'une manière sauvagement spéculative. (...) Le grand succès de la théorie des quanta dès son début ne peut pas m'amener à croire à ce jeu de dés fondamental, bien que je sache que mes confrères plus jeunes voient là un effet de la fossilisation”.

Lettre à Michele Besso (30 nov. 1949) : “Actuellement paraît un livre [P.A.. Schilpp (ed.), *Albert Einstein, philosopher scientist*, 1949] (...) J'y défends le Bon Dieu contre un prétendu jeu de dés continuels.” *In* A. Einstein, Michele Besso, *Correspondance*, Hermann, Paris,).

Dans une lettre à Niels Bohr (4 avril 1949), Einstein évoque “la question cruciale de savoir si Dieu joue vraiment aux dés ou pas, et si nous devons nous en tenir à une réalité accessible à la description qu'en peut donner la physique”. (*in* Einstein, *Oeuvres choisies, I : Quanta*, Seuil, Paris, 1989).

Et dans une autre, à Erwin Schrödinger (22 déc. 1950) : “Il m'apparaît cependant certain que le caractère (en principe) statistique de la théorie n'est qu'une conséquence de l'incomplétude de la description. Cela ne nous renseigne pas sur le caractère déterministe de la théorie ; en effet, ce concept reste tout à fait nébuleux tant que l'on ne sait pas ce qui doit être donné pour déterminer l'«état initial» («coupe»)”. (*in* Einstein, *Oeuvres choisies, I : Quanta*, Seuil, Paris, 1989).

Einstein, “Réflexions élémentaires concernant l'interprétation des fondements de la mécanique quantique”, *in Scientific papers presented to Max Born*, Oliver and Boyd, Edimbourg, 1953 : “Pour conclure, et en généralisant notre propos, nous dirons que la mécanique quantique décrit des ensembles de systèmes ; elle ne décrit pas un système individuel. En ce sens, la description par la fonction Ψ est une description incomplète du système individuel ; ce n'est pas une description de son «état réel»”. (*in* Einstein, *Oeuvres choisies, I : Quanta*, Seuil, Paris, 1989).

Michel Paty docteur ès-sciences et docteur en philosophie, est directeur de recherche au CNRS dans l'Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot. Il est auteur des ouvrages : *Einstein philosophe* (Presses Universitaires de France, Paris, 1993) ; *Einstein ou la création scientifique du monde*, Belles lettres, Paris, 1997 ; *Einstein les quanta et le réel* (à paraître) ; *Matière et concepts* (EDP-Sciences, à paraître) ; *La physique au xxè siècle* (EDP-Sciences, à paraître). Il co-dirige la nouvelle revue internationale *Epistémologiques (Philosophie, sciences, histoire)*, Discurso-editorial/ EDP-Sciences (São Paulo, Paris) et collabore à la revue *Passages* (Paris).