

Chapitre 8 de:

Michel Bitbol, L'aveuglante proximité du réel, Flammarion, 1998

8-HASARD OBJECTIF ET PRINCIPE DE RAISON SUFFISANTE¹

Pour la physique moderne, l'idée classique du déterminisme causal n'est ni vraie ni fausse, mais simplement dénuée de sens physique.

A. Kojève, *L'idée du déterminisme*

Un dernier pas reste à franchir: éclairer certaines caractéristiques jugées mystérieuses de la mécanique quantique en substituant à la conception de la théorie physique comme description désengagée du monde, celle qui en fait un compte-rendu prédictif des engagements possibles dans le monde. L'une des plus intéressantes parmi ces caractéristiques est *l'indéterminisme*. Dans ce bref chapitre, nous allons donc nous attacher à montrer que l'indéterminisme quantique se comprend aisément comme indice de l'inséparabilité du phénomène et de ses conditions de manifestation, plutôt que comme reflet de l'ordre (ou du désordre) d'une nature séparée.

8-1 Hasard subjectif et hasard objectif

Le hasard objectif ne se définit aisément que par antiphrase, et cela constitue un premier indice de la difficulté à surmonter.

Qu'entend-on alors par "hasard subjectif"? Le hasard subjectif est un hasard superficiel, un hasard d'ignorance, qui dissimule sous une suite d'événements apparemment aléatoires un processus naturel suscité par des causes et/ou régi par des lois. Il s'identifie au hasard laplacien, qui s'exprime avant tout en première personne: "*Nous* regardons une chose comme l'effet du hasard lorsque (...) *nous* ignorons (...) les causes qui l'ont produites"². Quand Laplace en vient malgré tout, pour se conformer à un usage courant, à faire référence au hasard en troisième personne, c'est seulement pour en dénoncer le caractère illusoire: "le hasard n'a (...) aucune réalité en lui-même". Le recours au concept de hasard ne traduit donc ici que l'aveu d'un renoncement *provisoire* à la poursuite de l'enquête. Il reste sous-entendu que l'enquête sur les causes pourrait être menée à bien. Soit parce que des moyens disponibles permettent, avec un minimum de persévérance, de la conduire dès à présent à son terme. Soit parce que la théorie

¹ Ce chapitre est une version remaniée de l'article suivant: M. Bitbol, "Qu'est-ce qu'un hasard objectif?", La lettre mensuelle de l'ECF, n°161, 13-16, 1997

² P-S. Laplace, Oeuvres, VIII, p. 25-65 et 69-275; cité par A. Dahan-Dalmedico, "Le déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le déterminisme aujourd'hui", in: A. Dahan-Dalmedico, J.L. Chabert, & K. Chemla (eds.), *Chaos et déterminisme*, Seuil 1992. Voir également P-S. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, Courcier, 1814.

physique en vigueur a une structure mathématiquement déterministe, et laisse de ce fait apercevoir la possibilité (en construisant les moyens instrumentaux appropriés) de remonter le long d'une chaîne des causes bien identifiée. Soit enfin parce qu'adhérant au principe de raison suffisante, on travaille dans la perspective d'une identification future de voies d'accès inconnues à des causes ignorées. Cette dernière attitude n'a *a priori* de valeur qu'heuristique; elle n'opère, jusqu'à plus ample informé, que comme guide et comme projet régulateur pour la recherche. Elle est pourtant fréquemment extrapolée en une affirmation métaphysique: il existe là-dehors, indépendamment de la capacité que nous pouvons avoir de nous en assurer et de les décrire, des causes réelles aux événements.

A l'inverse, évoquer un hasard objectif revient à signifier que des obstacles insurmontables s'opposent au parachèvement de l'enquête étiologique.

La simple indisponibilité de fait des moyens d'investigation ne justifie pas à elle seule qu'on qualifie un hasard d'"objectif", car elle s'énonce impérativement à la première personne. *Nous* ne disposons pas des procédés techniques permettant d'identifier les causes d'un événement. Mais ce "nous", celui de la présente communauté techno-scientifique, est contingent, situé, idiosyncrasique; il ne saurait être investi de l'universalité que suppose l'objectivité.

A l'autre extrémité du spectre des raisons d'abandonner l'enquête, il y a la pure et simple *inexistence* des causes. Cette inexistence, si elle était avérée, garantirait l'objectivité du hasard au sens le plus fort, pré-critique: celui où l'on peut dire que le hasard est "intrinsèque", qu'il est "ontologique", qu'il caractérise la nature "en-soi". On en exprime l'idée tantôt sur un mode théologique (Dieu joue aux dés³), tantôt sur un mode naturaliste (les "propensions", qui garantissent la stabilité des fréquences et non pas des événements eux-mêmes, sont des *forces* "réelles" inhérentes à la nature⁴). L'ennui est que de telles affirmations restent, au même titre que leurs réciproques, à l'abri de toute possibilité d'attestation expérimentale. La question de savoir si le hasard est "ontologique" ou non, si les "lois ultimes de la nature" sont intrinsèquement indéterministes ou non, est indécidable. Les développements récents des sciences de l'aléatoire ne font qu'illustrer cette indécidabilité. On montre en effet que des apparences déterministes peuvent résulter de l'application de la loi des grands nombres à des événements stochastiques, et qu'inversement des apparences indéterministes peuvent traduire des processus de chaos déterministe sous-jacents⁵.

³ Si on prend le contrepied de la célèbre affirmation d'Einstein: "(Dieu), au moins, ne joue pas aux dés". Lettre à M. Born du 4 décembre 1926, in: A. Einstein - M. Born, *Correspondance 1916-1955*, Seuil, 1972

⁴ K. Popper, *La théorie quantique et le schisme en physique*, Hermann, 1996

⁵ J. Harthong, *Probabilités et statistiques*, Diderot, 1996. Un énoncé du "cinquième conflit des idées transcendantales" de Harthong entre déterminisme et indéterminisme intrinsèques des "lois de la nature" peut être trouvé à la section 6-6.

Des options intermédiaires, plus fortes que la première et moins spéculatives que la dernière, restent cependant disponibles. La principale d'entre elles consiste à lier la thèse d'un hasard objectif au constat du caractère indéterministe des théories physiques actuellement acceptées, c'est-à-dire de toutes les théories dérivées de la mécanique quantique. La mécanique quantique est indéterministe en ce double sens qu'elle ne permet généralement pas de prévoir chaque résultat expérimental particulier avec certitude, et que son formalisme ne contient aucune indication rétrospective *univoque* au sujet d'une hypothétique chaîne des causes ayant pu aboutir à chaque résultat⁶. Plus précisément, la mécanique quantique n'implique pas toujours la reproductibilité exacte des résultats expérimentaux à la suite de préparations optimales identiques. Elle traduit une situation dans laquelle chaque événement ne peut être séparé de circonstances singulières, irréversibles, et incontrôlables.

Ces remarques se traduisent de la façon suivante. La mécanique quantique *n'objective* pas un lien strict entre antécédent opératoire et conséquent événementiel, puisque l'objectiver ce serait le décrire comme valable pour tous, en tout lieu, et en toutes circonstances où l'antécédent se trouve réalisé. Elle établit par contre la parfaite reproductibilité de la relation entre chaque préparation et *une distribution statistique* donnée de résultats expérimentaux. Par le biais de son équation d'évolution (l'équation de Schrödinger), elle garantit également la pérennité de cette relation. On peut donc affirmer, conformément aux définitions précédentes, qu'à travers elle est objectivé un lien entre antécédent opératoire et conséquent *statistique*. Sa structure probabiliste donne bien un contenu à l'idée d'un *hasard objectif*. Simplement, ce contenu est associé à une acception critique plutôt que métaphysique du concept d'objectivité. Le hasard qui prévaut dans le domaine de validité de la physique quantique est qualifié d'"objectif" non pas parce qu'il reflète une caractéristique *absolue* de la nature (sur cela, l'approche scientifique n'a de toutes façons rien à dire), mais parce qu'il exprime un type universel, décrit par la théorie, de *relation* statistique entre les opérations expérimentales et leurs résultats.

Cette stratégie visant à attribuer une objectivité au hasard par l'entremise de la structure des théories physiques admises, n'est cependant pas dénuée de faiblesses. Il est vrai que l'absence d'identification d'un éventuel lien univoque entre antécédents et conséquents n'est plus tant rapportée aux insuffisances d'un état *actuel* de nos moyens technologiques, qu'aux bornes imposées par la théorie physique à toutes les investigations qu'elle conduit à tenir pour *possibles*. Mais il ne faut pas perdre de vue qu'une théorie physique, aussi bien corroborée qu'elle soit, reste fragile, et même deux fois fragile. Elle l'est en raison de sa

⁶ Les "histoires consistantes de Griffiths" représentent bien des tentatives de reconstitution rétrospective d'une chaîne des causes entre deux expériences, mais ces reconstitutions *ne sont pas* uniques, et elles *ne peuvent pas* l'être sous peine de s'inscrire en faux contre les prédictions probabilistes de la mécanique quantique. Voir R. Omnès, *The interpretation of quantum mechanics*, Princeton University Press, 1994; voir également la section 2-2 du présent livre.

sous-détermination par le champ d'expérience qu'elle régit, et elle l'est aussi en raison de sa réfutabilité par des expérimentations qui sortiraient par inadvertance de ce champ. Hypostasier le hasard objectivé par la mécanique quantique, cela reviendrait par conséquent à première vue à fonder une croyance sur une *méthode* théorique dont ni l'exclusivité ni l'avenir ne sont assurés. La méthode de la physique classique, à savoir l'emploi d'équations différentielles aux solutions déterminées de façon univoque par des conditions initiales, favorisait la croyance en un déterminisme naturel. Puis, la méthode de la physique quantique, à savoir la manipulation de commutateurs, de "relations d'incertitude", ainsi que d'amplitudes de probabilité, s'est mise à favoriser la croyance en un indéterminisme naturel. En attendant, on ne peut pas l'exclure *a priori*, un nouveau changement de méthode⁷.

8-2 Contextualité et indéterminisme

En première analyse l'enseignement que nous offre la mécanique quantique sur le hasard s'avère donc assez sibyllin. Ce que nous venons de souligner c'est qu'on ne saurait faire servir la mécanique quantique, pas plus d'ailleurs qu'aucune autre théorie scientifique, à une argumentation en faveur d'un hasard "vrai" ou *Ontologique*. L'objectivité du hasard dont elle traite reste suspendue à un changement toujours possible du mode d'objectivation qu'exprime son formalisme. Même en s'en tenant au domaine de validité de la mécanique quantique, il suffit en pratique de changer de *niveau* d'objectivation pour modifier considérablement l'appréciation qu'on peut avoir au sujet du caractère objectif ou subjectif du hasard qu'elle affronte. Par exemple, si le site d'objectivation est celui des "variables cachées" de la théorie de Bohm de 1952, plutôt que les distributions statistiques ou les vecteurs d'état qui permettent de les engendrer, l'indétermination des résultats expérimentaux est attribuable à un processus de chaos déterministe⁸. Pour peu que le pouvoir heuristique de cette dernière théorie (ou de cette "interprétation", comme a fini par l'appeler Bohm) soit reconnu, dans un domaine d'investigation même limité, la tentation de supposer que les lois de la nature "sont" déterministes risque de grandir à nouveau.

La simple circonstance qu'une théorie (ou une "interprétation") comme celle de Bohm soit viable, suffit à rendre inopérant l'argument probabiliste le plus fort qu'on produit habituellement en faveur de l'idée que la mécanique quantique traduit un "hasard vrai" plutôt qu'un simple "hasard d'ignorance". Cet argument repose, rappelons-le⁹, sur l'invalidité, dans le cas général, de la règle standard d'additivité des probabilités d'événements disjoints. En effet, le type non-

⁷ Sur ce point, voir L. Soler, "Les régularités phénoménales requièrent-elles une explication?", in: M. Bitbol & S. Laugier (eds.), *Physique et réalité, un débat avec Bernard d'Espagnat*, op. cit.

⁸ D. Bohm & B.J. Hiley, *The undivided universe*, op. cit. p. 24-25

⁹ M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, op. cit. § 1-3-8

disjonctif de lien probabiliste établi par la mécanique quantique entre *événements manifestables expérimentalement* n'est pas compatible avec l'affirmation que ces événements se produisent d'eux-mêmes bien que nous les ignorions; et il n'est pas davantage compatible avec l'affirmation plus spécifique selon laquelle des séquences d'événements survenant d'eux-mêmes sont régies par une loi déterministe ignorée. Mais l'exemple de la théorie de Bohm nous a montré que rien n'empêche d'imaginer qu'il existe des processus sous-jacents, non manifestables dans leur totalité sur le plan expérimental, et qui *eux* obéissent soit directement à des lois déterministes soit à des règles probabilistes s'accordant avec une notion de "hasard d'ignorance". Dans cette perspective, les distortions constatées entre les règles probabilistes quantiques et les règles probabilistes standard (interprétables en termes de "hasard d'ignorance"), pourront être expliquées par des interactions mutuelles instantanées entre les processus sous-jacents, et/ou par l'influence que doivent exercer les instruments de détection sur les processus sous-jacents pour produire les événements expérimentaux dont la mécanique quantique régit les probabilités. Au total, la mécanique quantique ne déroge pas au théorème général d'indécidabilité des sciences de l'aléatoire. Rien dans la structure de ses prédictions ne *force* à affirmer qu'à quelque hypothétique "niveau ultime" les événements naturels sont gouvernés par le seul hasard.

En deuxième analyse, pourtant, si on sait lire les réflexions précédentes entre les lignes, la mécanique quantique comporte une leçon à la fois intéressante et dénuée d'ambiguïté à propos du hasard. Car s'il est vrai qu'on ne peut pas s'en prévaloir pour avancer une quelconque thèse *Ontologique* à propos du caractère déterministe ou indéterministe des "lois de la nature", on peut s'appuyer sur elle pour fournir de précieuses indications au sujet des limites de la fécondité *épistémologique* du principe de raison suffisante. Le principe de raison suffisante n'a été considéré comme fécond par les générations précédentes de chercheurs scientifiques que parce qu'il les poussait à concevoir des réseaux de liens univoques pouvant sous-tendre les phénomènes connus, à désigner un type d'expérience permettant de mettre ces liens en évidence, et à définir ainsi des classes de nouveaux phénomènes. Or, il est possible de montrer (par des raisonnements méta-théoriques plutôt qu'intra-théoriques, cette fois), que toute théorie possédant la double capacité de régir par des lois (éventuellement déterministes) les propriétés intrinsèques d'objets individuels, *et* de reproduire les prédictions *déjà corroborées* de la mécanique quantique, a parmi ses implications *l'inaccessibilité à l'expérience* des processus déterministes sous-jacents qu'elle invoque¹⁰. Les processus déterministes postulés par les théories à variables (ou plutôt à processus) caché(e)s n'ouvrent à aucune extension de l'univers des *phénomènes expérimentaux*.

¹⁰ M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, op. cit. p. 359-360.

En somme, ni le retour du déterminisme, ni la remise au premier plan d'un concept de hasard *subjectif* ne sont exclus, mais un tel déterminisme renouvelé demeurerait purement formel, sans répondant empirique, c'est-à-dire *infécond*. La mécanique quantique n'interdit pas de conserver au principe de raison suffisante sa fonction d'idéal régulateur abstrait dans la sphère des idéalités mathématiques, mais elle pose des bornes à son utilisation comme guide concret de la recherche expérimentale, et elle lui retire donc une bonne partie de ce qui faisait sa valeur aux yeux des auteurs de la révolution scientifique du dix-septième siècle.

La stérilité du principe de raison suffisante dans la conduite de certains moments de l'investigation scientifique n'empêche cependant pas qu'on l'emploie au second degré pour une enquête réflexive; c'est-à-dire une enquête sur les causes de sa propre stérilité. Pourquoi ce principe est-il devenu doublement inefficace, selon une orientation aussi bien prédictive que rétrodictive, dans le domaine de validité spécifique de la mécanique quantique? Des réponses satisfaisantes à cette question ne sont pas hors de notre portée.

Remarquons d'abord que K. Popper a fourni une explication plausible de l'infécondité prédictive du principe de raison suffisante dans les cas d'auto-connaissance. "Nous avons démontré, écrit Popper, que l'auto-prédiction est impossible, et ce même au cas où l'on parviendrait à construire un prédicteur réunissant toutes les capacités d'une intelligence laplacienne (...) c'est-à-dire un prédicteur qui représenterait un système physique dont le caractère déterministe serait universellement reconnu. Ainsi, notre preuve ne peut, il est vrai, être utilisée pour réfuter le déterminisme. Mais elle peut être utilisée pour réfuter le déterminisme 'scientifique' (...). Car si l'auto-prédiction est impossible, il s'ensuit qu'un prédicteur ne peut prédire les effets de ses agissements sur son propre milieu (...)"¹¹. Autrement dit, *même* dans un univers supposé régi par des lois déterministes, un prédicteur ne peut pas prévoir les phénomènes s'il est trop inextricablement impliqué dans leur production.

Or, un équivalent de cette situation d'excessive implication se présente en physique quantique, où les instruments de détection des phénomènes sont aussi des conditions de leur émergence. Le caractère inextricable du phénomène et des moyens de sa manifestation (la *contextualité* du phénomène) est, nous le savons, le trait central des situations expérimentales dont les théories quantiques visent à rendre compte. Cela est immédiat en mécanique quantique standard, et cela se traduit par une influence instantanée du contexte instrumental sur les propriétés postulées dans les théories à variables cachées du type de celle de Bohm. Il est à partir de là tentant d'expliquer l'imprédictibilité des phénomènes quantiques par leur contextualité (rendue incontournable par l'incompatibilité partielle des contextes).

¹¹ K. Popper, *L'univers irrésolu*, Hermann, 1984, p. 66

Une telle relation entre contextualité et imprédictibilité a été entrevue en 1927 par Heisenberg, dans l'article qui présente pour la première fois les relations dites d'"incertitude"¹². Mais dans ce texte, la contextualité prend la forme imagée et concrète d'une "perturbation". La perturbation incompressible et incontrôlable par l'agent de mesure est, selon le Heisenberg de cette époque, ce qui empêche de connaître complètement les deux groupes de variables qui composent l'état initial d'une particule; et par conséquent, conclut-il, le principe de causalité, qui lie de façon contraignante un état initial et un état final, reste inapplicable en physique quantique. Malheureusement, l'image de la perturbation de l'objet par l'agent de mesure a aussi un inconvénient majeur qui n'a pas échappé à Bohr et à Heisenberg, et qu'a par la suite souligné Karl Popper. Au fond, cette image consiste à commencer par mettre en scène un univers d'objets dotés de propriétés intrinsèques, puis à invoquer les altérations mutuelles de ces propriétés pour justifier après coup la mise à l'écart du concept de propriété et la généralisation de celui de "phénomène" holistique. A travers elle, on ne suscite la représentation d'un univers d'entités dotées de déterminations propres que dans l'unique but d'en montrer l'inanité ou, ce qui revient au même dans le cadre encore prégnant d'une épistémologie vérificationniste, l'inaccessibilité de principe.

L'image de la "perturbation" représente au fond un moment méta-stable de la réflexion sur la mécanique quantique. Elle invite à son propre dépassement, dans deux directions opposées. Soit on prend pleinement au sérieux ses *prémisses* et on essaie de construire une théorie empiriquement adéquate des déterminations inaccessibles qu'on postule; c'est là la stratégie (déjà commentée) des théories à variables cachées. Soit au contraire on prend pleinement au sérieux les *conséquences* holistiques de l'image de la perturbation, à savoir l'indivisibilité du phénomène quantique, son insurpassable *relativité* à un contexte expérimental, et on élabore une conception de la théorie physique qui ne fasse plus *du tout* appel à une représentation imagée des moments constitutifs supposés du phénomène; c'est là la stratégie que Bohr a adoptée à partir de 1935, non sans quelques affaiblissements et hésitations.

En suivant la seconde stratégie jusqu'à son terme, on constate qu'il est parfaitement possible d'établir un lien formel *direct* entre l'indétermination prédictive et la contextualité, sans avoir besoin de l'intermédiaire douteux fourni par l'image de la perturbation. Dès 1935, Grete Hermann publiait un opuscule dans lequel elle laissait entrevoir un tel lien¹³. Cette jeune philosophe allemande remarquait en effet que les causes éventuelles d'un phénomène quantique *ne peuvent servir à le prévoir*, parce qu'elles ne sont jamais définies qu'après coup, *relativement* aux circonstances mêmes de la production de ce phénomène lors

¹² W. Heisenberg, "The physical content of quantum kinematics and mechanics", in: J. A. Wheeler & W.H. Zurek, *Quantum theory and measurement*, Princeton University Press, 1983

¹³ G. Hermann, *Les fondements philosophiques de la mécanique quantique*, Trad. A. Schnell en collaboration avec L. Soler; Introduction, présentation et postface critique par L. Soler, Vrin, 1996, p. 90.

d'une mesure. Par la suite, le lien contextualité-imprédictibilité fut établi rigoureusement par un théorème de P. Destouches-Février, selon lequel toute théorie prédictive portant sur des phénomènes définis relativement à des contextes expérimentaux dont certains sont mutuellement incompatibles, est "essentiellement indéterministe"¹⁴. La conjecture précédente, selon laquelle la contextualité typique de la situation expérimentale affrontée par la physique quantique *explique* l'indétermination prédictive, repose donc sur des bases sûres.

Par ailleurs, il est facile de montrer que cette même contextualité rend vaine (ou arbitraire) une *reconstitution rétrospective* de la chaîne des causes ayant pu aboutir à un phénomène. Reconstituer une chaîne des causes qui ne soit pas *par principe* dénuée de relations avec l'expérience, cela signifierait en effet établir la séquence des *phénomènes* conduisant, par une chaîne *univoque* de liens, de l'antécédent mis en place au conséquent constaté expérimentalement. Mais, par hypothèse, un phénomène n'est défini que relativement à un contexte expérimental et à son *utilisation effective*. En l'absence de contextes expérimentaux intermédiaires en état de fonctionner, il n'est même pas licite d'évoquer des *phénomènes* intermédiaires; tout au plus ce que H. Reichenbach¹⁵ appelle des "interphénomènes" fictifs. Une reconstitution rétrospective de ce type resterait de ce fait purement conventionnelle, et elle ne serait de plus compatible avec l'algorithme probabiliste de la mécanique quantique qu'à condition d'être *plurivoque*¹⁶.

En résumé, la contextualité rend le principe de raison suffisante inopérant ou arbitraire, selon qu'on en fait un usage prédictif ou rétrodictif. Le hasard objectivé de la physique quantique, bien que ne prétendant à aucune fondation Ontologique, a dès lors vocation à demeurer incontesté.

¹⁴ P. Destouches-Février, *La structure des théories physiques*, P.U.F., 1951, p. 260-280. Ce théorème (comme les règles probabilistes de la mécanique quantique standard qu'il généralise) est parfaitement compatible avec l'existence de théories à variables (ou plutôt à *processus*) caché(e)s. Il porte en effet seulement sur le lien de prédictibilité entre des *phénomènes*, et non pas sur d'éventuels processus principiellement inaccessibles à l'expérimentation.

¹⁵ H. Reichenbach, *Philosophic foundations of quantum mechanics*, University of California Press, 1946

¹⁶ Voir sections 2-2 et 8-1