

# Les fondements philosophiques naturels de la mécanique quantique <sup>1</sup>

Grete Hermann, Østrupgaard (Danemark).

**Résumé :** Le résultat physique de la mécanique quantique, qui bouleverse des conceptions philosophiques naturelles longtemps établies, notamment celles concernant la causalité, impose une limite stricte et insurmontable à la prédiction des processus naturels futurs. L'idée du démon de Laplace, qui connaît parfaitement l'état actuel de la nature, étudie toutes les lois naturelles et peut prédire le cours futur des événements à partir de cette connaissance, perd ainsi toute pertinence. Or, cette idée n'était que l'expression de la conviction que tout événement naturel, sous tous ses aspects, est causé par des événements antérieurs et doit donc être prévisible à partir de ces causes par quiconque connaît les lois de la nature. La croyance en la possibilité illimitée de tels calculs ébranle simultanément la conviction de la continuité du lien de causalité des événements naturels.

L'impulsion expérimentale ayant conduit aux considérations qui ont abouti à l'affirmation de limites insurmontables à la prédictibilité a été fournie par les expériences dites de dualisme. Selon ces expériences, la distinction classique entre les processus de rayonnement, qui consistent en le mouvement rapide de petites particules, et ceux où se propage une onde, est abolie. En physique classique, les rayons alpha et bêta, émis par des éléments radioactifs, étaient considérés comme des rayons de matière car, par exemple, en traversant de la vapeur d'eau saturée, ils laissent des traces en forme de stries, démontrant ainsi la nature discrète des particules en mouvement. Cependant, ces mêmes rayons, lorsqu'ils traversent un réseau ou sont réfléchis par celui-ci, donnent lieu à des phénomènes d'interférence, obligeant ainsi les chercheurs à supposer qu'ils ont affaire à un processus ondulatoire. De même, les rayons lumineux, qui depuis la découverte des phénomènes d'interférence ont été interprétés sans équivoque comme un mouvement ondulatoire, ont présenté des propriétés suggérant leur nature corpusculaire.

La mécanique quantique permet d'expliquer ces expériences en supposant que tout processus atomique peut être représenté en termes d'ondes, et tout processus ondulatoire en termes corpusculaires. Cependant, compte tenu de la nature contradictoire de ces deux modèles, il est impossible qu'un même processus présente à la fois toutes les caractéristiques d'une onde se propageant et toutes les particularités d'un mouvement corpusculaire. La compatibilité des deux modèles n'est donc possible que parce que chacun limite l'applicabilité de l'autre.

Dans les relations d'incertitude maintes fois citées, HEISENBERG a calculé avec précision les limitations que s'imposent réciproquement les modèles ondulatoire et corpusculaire lorsqu'ils sont appliqués à un même processus physique. La plus connue d'entre elles interdit, lors de l'application du modèle corpusculaire, la détermination simultanée et précise de la position et de l'impulsion des particules : si  $\Delta q$  est la précision avec laquelle la position, par exemple d'un électron, est déterminée, et  $\Delta p$  la précision de la détermination de son impulsion, alors la relation  $\Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar$  s'applique, où  $\hbar$  est la constante de Planck.

---

1. Abhandlungen der FRIESSchen Schule (Traité de l'école Friess), nouvelle série, sixième volume, 2e édition, p. 69-152.

Transcription en  $\text{\LaTeX}$  : Denise Vella-Chemla, avril 2026 (traduction par outils Google translate).

En physique classique, la mesurabilité des différentes grandeurs est indépendante. L'état physique d'un système peut donc être caractérisé par la simple énumération des valeurs de toutes les grandeurs physiques présentes. À l'inverse, le formalisme quantique requiert de nouveaux symboles pour décrire cet état, symboles qui expriment la dépendance mutuelle de la déterminabilité des différentes grandeurs. Ces symboles, les fonctions d'onde des systèmes physiques, et le formalisme mathématique qui spécifie les règles de calcul valides pour leur combinaison, sont étroitement liés à la théorie classique en vertu du principe de correspondance de Bohr. La description classique est compatible avec la description quantique, à condition que ses grandeurs restent indéterminées dans une mesure suffisante pour que les relations d'incertitude soient satisfaites.

Inversement, cette correspondance implique que le formalisme de la mécanique quantique ne permet pas de prédire le résultat d'une mesure avec une précision arbitraire. En effet, selon la fonction d'onde qui caractérisait le système physique avant la mesure, il ne permet que de formuler des énoncés probabilistes plus ou moins généraux.

Le fait que ce formalisme ne permette que des prédictions limitées ne garantit pas l'insurmontabilité des limitations identifiées. Ceux qui en doutent n'ont pas à s'attaquer pour autant au formalisme lui-même. Il se peut fort bien que ce formalisme continue de prouver sa valeur à l'avenir, comme il l'a fait jusqu'à présent. Mais qu'est-ce qui nous empêche de supposer qu'avec l'expansion des connaissances physiques, de nouvelles formules et règles ne viendront pas s'y ajouter, lesquelles, combinées à l'approche formelle actuelle, permettront à nouveau de formuler les prédictions susmentionnées ? Tout repose sur la réponse à cette question.

Il est tentant de déduire l'impossibilité d'une telle extension directement du principe d'incertitude. Si la position et la quantité de mouvement d'une particule ne peuvent être mesurées simultanément avec une précision arbitraire, comment peut-on faire des affirmations fiables concernant son mouvement futur, lequel est déterminé précisément par sa position et sa quantité de mouvement actuelles ?

Toutefois, cet argument repose sur l'hypothèse que, malgré les relations d'incertitude, l'électron, en tant que particule au sens classique, possède à chaque instant une position précise et une quantité de mouvement précisément déterminée, lesquelles, en l'absence de perturbations extérieures, déterminent son mouvement futur, et que cette cause du processus physique subséquent demeure à jamais inobservable. Les relations d'incertitude sont ainsi interprétées subjectivement et ne semblent rien dire sur la nature des systèmes physiques.

Le fait de déduire ces relations du dualisme des concepts d'onde et de particule rend cette interprétation subjective incompatible : la subordination de chaque processus atomique aux caractéristiques de la représentation ondulatoire limite l'application de la représentation particulaire de telle sorte que toutes les caractéristiques des points de masse en mouvement au sens classique ne peuvent pas également être des propriétés de l'électron en mouvement.

Cependant, si, d'après ces considérations, l'électron ne possède pas simultanément une position et une quantité de mouvement précises, alors sa position et sa quantité de mouvement précises ne peuvent être déterminantes pour son mouvement ultérieur. Si cette hypothèse s'avère erronée, on peut alors se demander s'il existe d'autres caractéristiques dont dépend le déroulement du mouve-

ment et à partir desquelles celui-ci peut être prédit. Le formalisme de la mécanique quantique ne reconnaît pas de telles caractéristiques. Mais cela ne justifie pas de les déclarer impossibles.

Des considérations similaires découlent des discussions portant sur de nombreuses autres tentatives visant à démontrer que les limites de la prédictibilité sont, en principe, insurmontables. Bien que tous ces arguments soulèvent d'énormes difficultés qui entravent toute tentative de dépasser ces limites actuelles de la prédictibilité, ils laissent en suspens une question cruciale : en effet, dans chaque état d'un système physique caractérisé par la mécanique quantique, il existe des mesures dont les résultats ne peuvent être prédits à partir de la connaissance de cet état. Mais qu'est-ce qui empêche l'approche physique par ailleurs conventionnelle de rechercher de nouvelles caractéristiques, d'affiner la détermination de l'état des systèmes physiques grâce à elles, et d'y trouver la raison des résultats de mesure jusqu'alors imprévisibles ?

Quiconque nie catégoriquement la possibilité de telles caractéristiques se heurte au principe d'incomplétude de l'expérience. Il n'existe pas d'autre critère permettant d'appréhender toutes les circonstances essentielles d'un domaine naturel que la capacité à comprendre tous les processus de ce domaine en fonction de leurs lois intrinsèques. Or, la capacité à déduire de ces lois naturelles des prédictions validées empiriquement atteste de leur reconnaissance.

Par conséquent, il ne peut y avoir qu'une seule raison suffisante pour abandonner la recherche des causes d'un processus observé, la considérant comme fondamentalement infructueuse : que l'on connaisse déjà ces causes.

La mécanique quantique, qui prétend être à jamais limitée dans la prédiction des résultats de mesure, se trouve donc confrontée au dilemme suivant : soit elle nomme les causes qui déterminent entièrement ces résultats – comment peut-elle alors empêcher les chercheurs de rechercher ces causes dans des cas particuliers et d'en déduire le résultat de la mesure ? soit elle ne nomme pas ces causes – comment peut-elle alors, sans préjuger arbitrairement de l'exploration de domaines inconnus de la nature, exclure la possibilité de futures découvertes de ces causes ?

Le formalisme de la mécanique quantique offre une solution à ce dilemme. Le principe de correspondance de Bohr indique la voie à suivre pour résoudre ces difficultés. Ce principe stipule que, dans le cadre d'application des concepts classiques permis par la mécanique quantique, toute conséquence découlant classiquement de la caractérisation des circonstances données doit également servir de base aux approches quantiques.

Cette approche fondée sur la correspondance fournit désormais, dans certains cas de processus quantiquement imprévisibles, des informations précises sur les paramètres physiques dont dépendent ces processus dans toutes leurs caractéristiques essentielles. Ce sont les cas où un tel processus fait partie d'un processus de mesure et sert à relier l'objet observé à l'instrument de mesure.

Considérons le cas où l'instrument de mesure indique le résultat d'une mesure par la position d'une aiguille. Le passage de la lecture de cette position à l'approche quantique de l'état du système physique observé présuppose une théorie de l'interaction entre le système et l'instrument. Cette théorie, fondée exclusivement sur des concepts classiques, montre comment et dans quelle mesure

la déviation de l'aiguille est conditionnée par l'état de l'objet mesuré, fournissant ainsi des indications pour sa détermination. L'application de tout instrument électrique, optique ou de toute échelle repose donc sur une rétro-inférence de l'instrument de mesure vers l'objet mesuré. Dans cette rétro-inférence, la déviation de l'instrument est expliquée comme l'effet nécessaire du système mesuré sur celui-ci durant le processus de mesure.

Si la mesure en question est de celles dont le résultat ne saurait être prédit par la mécanique quantique, il en va de même, de toute évidence, de la position de l'aiguille de l'instrument de mesure sur lequel le résultat est enregistré. Or, l'interprétation même du processus de mesure explique cette imprévisibilité. Il serait donc vain de chercher la cause de son apparition dans de nouvelles caractéristiques physiques restées jusqu'ici inexplorées. La théorie de la mesure possède déjà un pouvoir explicatif suffisant.

Cependant, la situation ne semble pas différente pour l'état du système mesuré lui-même. Au cours d'un processus naturel, il est aléatoire qu'il soit considéré comme l'objet de la mesure en soi ou que le chercheur ne s'y intéresse que comme moyen de mesurer d'autres processus.

La possibilité de trouver de nouvelles caractéristiques qui déterminent strictement le résultat d'une mesure est donc en fait exclue en mécanique quantique par la seule raison qui suffit comme preuve dans le cas de l'incomplétude de l'expérience : les caractéristiques qui déterminent le résultat de la mesure ont déjà été nommées par la mécanique quantique elle-même.

Cela paraît étrange. Si la mécanique quantique peut expliquer pleinement le résultat d'une mesure après qu'elle a eu lieu, pourquoi n'offre-t-elle pas un moyen de le calculer avant la mesure, en se basant sur les explications qui sont démontrées ultérieurement ?

La solution à cette difficulté réside une fois encore dans le principe de correspondance. Les prédictions issues de la caractérisation quantique d'un système ne peuvent jamais dépasser celles déductibles de l'applicabilité limitée des concepts classiques. Si, après avoir effectué une mesure, on explique néanmoins la position imprévisible de l'aiguille par une théorie du processus de mesure, cette théorie réduit ce processus à des états qui n'étaient pas, et n'auraient pas pu être, inclus dans la description antérieure de l'objet et de l'instrument. Ainsi, la description des systèmes en mécanique quantique n'est pas univoque ; elle ne révèle, pour ainsi dire, qu'un seul aspect du système physique que le chercheur peut appréhender à partir de l'observation. Par rapport à cette observation, le système ne possède pas de valeurs précises pour certaines grandeurs physiques et, par conséquent, aucune caractéristique déterminante.

On peut ainsi déduire le résultat d'une mesure précise de ces grandeurs. Cependant, si l'on effectue une telle mesure, qui perturbe le système et le fait passer dans un état différent, on obtient alors des données quantiques précises pour la grandeur mesurée dans ce nouvel état, ainsi que les raisons expliquant précisément cette valeur imprévue. Néanmoins, ces raisons ne permettent pas de prédire le résultat, car elles ne déterminent le système que par rapport à l'observation effectuée lors de la mesure elle-même. Par conséquent, elles ne peuvent être mises à la disposition du physicien à l'avance pour un calcul prédictif.

Cette nature relative de la description par la mécanique quantique devient clairement évidente dans une expérience de pensée instructive<sup>2</sup>.

Supposons que la position d'un électron soit uniquement déterminée par un plan ; sa position exacte dans ce plan est inconnue. D'après le principe d'incertitude, seule la composante de sa quantité de mouvement située dans ce plan peut être déterminée ; sa quantité de mouvement perpendiculaire à celui-ci demeure indéterminée.

La position de cet électron est déterminée par illumination. La lumière diffractée traverse un microscope puis est capturée sur une plaque photographique. Pour simplifier, supposons que l'intensité lumineuse soit réduite de sorte qu'un seul photon intervienne. Selon la dualité onde-corpuscule, ce photon peut être considéré, d'une part, comme une particule entrant en collision avec l'électron selon les lois classiques de l'élastique, et d'autre part, comme une onde déviée par l'électron et se propageant dans le microscope selon les lois classiques de l'optique.

La loi de la quantité de mouvement s'applique à la collision d'un photon et d'un électron : les deux sont déviés lors de la collision ; leurs variations de quantité de mouvement sont égales et opposées.

Pour obtenir une image nette de l'électron, on place la lame dans le plan image du microscope correspondant au plan objet, dans lequel, selon la théorie classique, tous les trains d'ondes émanant d'un point du plan objet sont à nouveau focalisés en un point.

Le point est unifié. Nous utilisons donc le concept classique selon lequel une onde sphérique se propage dans toutes les directions à partir du point de collision et, lorsqu'elle rencontre l'ouverture du microscope, pénètre ses lentilles. L'angle d'ouverture entier du microscope est ainsi impliqué dans ce processus, et il est donc absurde, dans le modèle corpusculaire, de définir une direction précise dans laquelle le photon a été réfléchi par l'électron et est entré dans le microscope. Il s'ensuit que la variation d'impulsion subie par l'électron lors de la collision ne peut pas non plus être déterminée avec précision. Il faudra donc caractériser l'état de l'électron immédiatement après la collision par une fonction d'onde qui spécifie une position précise mais une impulsion moins précise que dans l'état précédent.

On obtient une description tout à fait différente de la collision si la plaque est placée non pas dans le plan image, mais dans le plan focal du microscope. Dans ce cas également, la plaque présentera une image nette, car le photon n'a qu'une certaine distance à parcourir.

Une énergie considérable est nécessaire pour exciter un seul atome de la plaque. Le point du plan focal frappé par le photon est caractéristique de la direction d'entrée de la lumière dans le microscope. Le modèle ondulatoire qui interprète le résultat observé est celui d'un faisceau de rayons parallèles qui, par réfraction dans les lentilles, convergent en un point unique de leur plan focal. La direction d'entrée du photon dans le microscope est donc fixée, mais sa position dans le plan objet à sa sortie après la collision avec l'électron demeure indéterminée. Si l'impulsion du photon avant la collision était connue, la détermination de sa direction après la collision permettrait de calculer sa variation d'impulsion, et donc, d'après le théorème de la quantité de mouvement, celle

---

2. V. WEIZSÄCKER, Détermination de la position d'un électron à l'aide d'un microscope. Z. Physik 70, H. 1 et 2.

de l'électron. Bien que l'électron n'ait subi aucune transformation différente de celle observée dans le premier cas, son état après la collision doit désormais être caractérisé par une fonction d'onde dont la position est imprécise et l'impulsion relativement stable.

La coexistence de ces différentes possibilités signifie manifestement que, selon le contexte observationnel, différentes fonctions d'onde peuvent être obtenues pour un même système et à un même instant – à savoir, pour l'électron immédiatement après sa collision avec le photon. La caractérisation quantique ne s'applique pas, de la même manière que la caractérisation classique, au système physique en soi, c'est-à-dire indépendamment des observations qui permettent de le connaître.

Quelle révision du principe causal de la physique classique est nécessaire à la lumière de ce résultat ? Deux points des considérations précédentes sont ici cruciaux : les limites de la prédiction des événements futurs se sont en effet révélées insurmontables par principe, et pourtant il n'existe aucun événement dont les causes ne puissent être identifiées dans le cadre du formalisme de la mécanique quantique.

Ces deux affirmations semblent se contredire. La première affirme qu'il existe des limites inévitables à l'application des inférences causales et au contrôle qu'elles confèrent à l'homme sur la nature, tandis que la seconde souligne l'applicabilité fondamentalement illimitée des concepts causaux, auxquels tout processus naturel peut être subordonné, en principe, quelles que soient ses caractéristiques physiques.

Cette contradiction ne peut être résolue qu'en discutant des concepts qui jouent un rôle décisif dans les résultats de mécanique quantique susmentionnés : le concept de prévisibilité des événements naturels d'une part et le lien de causalité d'autre part.

Nous avons déjà évoqué le lien étroit entre ces deux concepts. Le pouvoir explicatif d'une hypothèse physique ne peut être vérifié qu'en prédisant des événements naturels futurs. Sans cette possibilité de vérification, l'affirmation de relations causales perd son caractère de connaissance de la nature.

Cette relation a souvent conduit à supposer que, à proprement parler, il s'agit de concepts identiques et que seule la terminologie linguistique simule une différence. Cette interprétation met en lumière la contradiction entre les deux.

Ceci est inévitable dans les propositions de la mécanique quantique. Si la relation de cause à effet se résume au fait que l'effet peut être prédit si la cause est connue, alors il n'existe pas de causes pour des événements qui sont, par principe, imprévisibles. Le fait que la mécanique quantique présuppose et recherche une explication par une loi naturelle, même pour les événements imprévisibles, montre donc que l'assimilation des deux concepts repose sur une confusion. Le lien causal direct ne concerne que la séquence nécessaire des événements eux-mêmes. La possibilité de prédire cette séquence grâce à la compréhension des relations causales constitue le critère d'une application correcte du concept de causalité. La mécanique quantique exige une distinction rigoureuse entre ces deux concepts.

Quel que soit le critère de son applicabilité, la loi de causalité stipule que rien ne se produit dans la

nature qui ne soit causé, dans toutes ses caractéristiques physiquement vérifiables, par des processus antérieurs, c'est-à-dire que tout en découle nécessairement. En ce sens, la causalité complète est non seulement compatible avec la mécanique quantique, mais elle en est manifestement une présupposée.

Mais qu'en est-il du critère de causalité ?

La mécanique quantique repose elle aussi sur un tel critère et, à l'instar de la physique classique, le fonde sur la possibilité de prédire les événements futurs. Contrairement à la physique classique, cependant, elle rompt avec l'hypothèse selon laquelle toute relation de cause à effet peut être directement testée en prédisant son effet. La mécanique quantique fournit également une explication causale aux événements imprévisibles et vérifie cette explication par des prédictions. Mais cette vérification est indirecte : la cause des événements imprévisibles est déduite, et à partir de l'hypothèse de l'existence de cette cause, des prédictions concernant les événements futurs sont ensuite établies, dont la réalisation est vérifiée empiriquement.

Ce phénomène peut être contrôlé. Dans l'exemple présenté, le noircissement de la plaque est attribué à la collision d'un électron et d'un photon, ce qui permet de déduire l'état observable de l'électron.

La raison pour laquelle la physique classique n'a pas sérieusement envisagé cette nouvelle possibilité de contrôler indirectement les relations de causalité tient au fait que la nature relative de la description quantique de la nature lui est étrangère. Pour la physique classique, la caractérisation de tout système est univoque et indépendante de la perception de l'observateur. Elle suppose donc nécessairement qu'avec une précision d'observation suffisante et une connaissance suffisante des lois qui régissent la nature, l'étude des systèmes physiques permet de déterminer les causes de leur évolution future avec le degré de clarté souhaité, et ainsi de prédire cette évolution.

Les difficultés auxquelles sont confrontés les partisans de la loi de causalité face aux découvertes de la mécanique quantique, à y regarder de plus près, ne proviennent pas du principe de causalité lui-même. Elles découlent plutôt de l'hypothèse tacite selon laquelle la connaissance physique appréhende adéquatement les phénomènes naturels indépendamment du contexte d'observation. Cette hypothèse se traduit par la prémisse que toute relation causale entre des processus engendre une prédiction de l'effet à partir de la cause, voire que la relation causale est identique à la possibilité même de cette prédiction.

La mécanique quantique exige de résoudre cette confusion entre divers principes de philosophie naturelle, d'abandonner l'hypothèse de la nature absolue de la connaissance naturelle et de traiter le principe de causalité indépendamment de celle-ci. Elle n'a donc nullement réfuté la loi de causalité ; mais elle l'a clarifiée et affranchie d'autres principes qui ne lui sont pas nécessairement liés.