



HAL
open science

Popper, Bohr et la contextualité de la mécanique quantique

Sébastien Poinat

► **To cite this version:**

Sébastien Poinat. Popper, Bohr et la contextualité de la mécanique quantique. *Philosophia Scientiae*, 2021, 25-3, pp.157-175. 10.4000/philosophiascientiae.3199 . hal-03629143

HAL Id: hal-03629143

<https://univ-cotedazur.hal.science/hal-03629143v1>

Submitted on 4 Apr 2022

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.



Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

25-3 | 2021

L'analyse dans les mathématiques grecques

Popper, Bohr et la contextualité de la mécanique quantique

Popper, Bohr and the Contextuality in Quantum Mechanics

Sébastien Poinat



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/philosophiascientiae/3199>

DOI : [10.4000/philosophiascientiae.3199](https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.3199)

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 25 octobre 2021

Pagination : 157-175

ISBN : 978-2-38072-041-9

ISSN : 1281-2463

Ce document vous est offert par Université Côte d'Azur



Référence électronique

Sébastien Poinat, « Popper, Bohr et la contextualité de la mécanique quantique », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 25-3 | 2021, mis en ligne le 25 octobre 2021, consulté le 04 avril 2022. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/3199> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.3199>

Tous droits réservés

Popper, Bohr et la contextualité de la mécanique quantique

Sébastien Poinat

Université Côte d'Azur, Centre de Recherches en Histoire des Idées (CRHI), Nice (France)

Résumé : Durant toute sa vie intellectuelle, Karl Popper a accusé Niels Bohr d'avoir défendu des thèses subjectivistes à propos de la mécanique quantique et d'avoir introduit le concept de sujet au sein de la physique. Or, cette accusation va à l'encontre des textes de Bohr. L'objectif de cet article est de montrer que, dans sa restitution même des positions de Bohr, Popper n'a pas pris au sérieux une thèse centrale défendue par Bohr, qu'on appelle « la contextualité des phénomènes quantiques », et qui a pour conséquence de modifier en profondeur l'acte de mesure et la constitution de l'objet en mécanique quantique. Nous essayons de montrer que c'est cette difficulté dans la restitution des positions de Bohr qui l'a amené à porter son accusation de subjectivisme à l'encontre de Bohr.

Abstract: During his intellectual life, Karl Popper blamed Niels Bohr for defending subjectivist theses about Quantum Mechanics and for introducing the concept of subject in physics. But Popper's accusation contradicts Bohr's texts. The goal of this article is to show that Popper did not take seriously a central point of Bohr's position: the contextuality of quantum phenomena. Quantum contextuality has strong consequences on the nature of measurement and on the constitution of the object in Quantum Mechanics. I try to show that this misunderstanding is the reason why Popper accused Bohr for being a subjectivist.

1 Introduction

Durant toute sa vie intellectuelle, Karl Popper a parlé de mécanique quantique, depuis [Popper 1934] jusqu'à [Popper 1990]. Il l'a toujours fait en s'opposant au

point de vue de Niels Bohr, qu'il appelle « l'interprétation de Copenhague » et qu'il accuse, invariablement, de conduire à des positions subjectivistes dans un domaine, la physique, où elles n'ont pas leur place. Or, Bohr s'est explicitement défendu d'avoir adopté de telles positions subjectivistes et s'est toujours présenté, au contraire, comme animé par le souci de maintenir l'objectivité en physique, même si cette exigence rencontrait des difficultés nouvelles en mécanique quantique.

Plusieurs commentateurs, en particulier [Feyerabend 1969] et [Howard 2012], ont cherché à montrer que l'interprétation de Bohr ne conduit pas à de telles conséquences subjectivistes. Nous souscrivons à leurs conclusions mais nous pensons que le problème n'a pas été pris suffisamment à la racine : non seulement les arguments de Popper peinent à montrer que la position de Bohr conduit finalement à une position subjectiviste, mais l'établissement même des thèses de Bohr par Popper est, de notre point de vue, problématique.

Dans l'interprétation de Bohr, en effet, les phénomènes quantiques ne peuvent pas être définis sans faire mention de tout l'appareillage physique et la mesure ne peut plus être pensée comme un acte de pure observation d'une réalité physique déjà constituée. Cette contextualité des phénomènes quantiques a conduit Bohr à repenser les conditions de constitution de l'objet et l'exigence d'objectivité qui est inhérente à la physique. Or, comme nous tâcherons de le montrer dans notre article, Popper ne restitue pas la thèse de la contextualité défendue par Bohr et voit dans la position de Bohr l'intrusion du sujet et de la conscience humaine. De ce fait, il considère que Bohr a renoncé à l'exigence d'objectivité et a dû adopter une interprétation subjectiviste de la mécanique quantique. L'objectif de notre article est ainsi de montrer que la restitution par Popper des positions de Bohr manque systématiquement la thèse de la contextualité, et que cette omission le conduit à porter son accusation de subjectivisme à l'encontre de Bohr.

Une telle difficulté à restituer la position de Bohr a déjà été soulignée par [Peres 2002] sur un cas particulier. L'article porte sur une expérience de pensée proposée dans [Popper 1982] : il s'agit d'une variante de l'expérience EPR (voir section 4) fondée sur la production de faisceaux de particules intriquées qui s'éloignent dans des directions opposées (A et B). Chaque faisceau passe par une fente, puis vient déclencher des détecteurs. La question est de savoir si, en diminuant la largeur de la fente du côté A , on augmente la dispersion du faisceau du côté B . D'après Popper, alors même que prédire cette augmentation est absurde, c'est à une telle absurdité que conduirait l'interprétation de Copenhague. Au contraire, l'article de Peres vise à montrer que cette prédiction n'est pas conforme à l'interprétation de Copenhague, notamment parce qu'elle ne respecte pas le principe de complémentarité défendu par Bohr. Selon Peres, Popper commet donc une erreur dans la reconstruction du raisonnement de l'École de Copenhague. Nous proposons ici de faire le même type de travail que celui de Peres, mais appliqué à l'ensemble de la restitution par Popper des thèses de Bohr (et non pas seulement sur une expérience particulière).

Enfin, nous voudrions faire deux remarques destinées à prévenir de possibles malentendus. D'une part, seule la manière dont Popper restitue la pensée de Bohr nous intéresse ici. Ainsi, sauf exception, nous n'aborderons pas l'interprétation cohérente et originale de la mécanique quantique défendue par Popper¹, ni les critiques émises par d'autres auteurs que Popper à l'encontre de l'interprétation proposée par Bohr. Nos analyses ne visent pas à prendre parti pour une interprétation au détriment d'une autre. D'autre part, nous voudrions souligner que Popper a eu le mérite de proposer des objections aux thèses de Bohr, à une époque où il était souvent mal vu de s'opposer à l'interprétation dominante. En outre, les textes de Bohr sont souvent difficiles à comprendre. Aujourd'hui, la situation est différente : la discussion est plus ouverte et, surtout, de nombreux travaux ont été consacrés aux textes de Bohr, qui permettent de mieux comprendre sa pensée (voir ci-dessous, note 11). C'est cette situation nouvelle qui nous permet, aujourd'hui, de relire de manière critique les textes de Popper consacrés à Bohr.

2 L'interprétation de Copenhague selon Popper

Pour Popper, l'interprétation de Copenhague² peut être résumée par son adoption d'une forme de subjectivisme :

En bref, [l'interprétation de Copenhague] dit que « la réalité objective s'est évaporée » et que la mécanique quantique ne décrit pas les particules, mais plutôt notre connaissance, nos observations, ou notre conscience, de celles-ci. [Popper 1982, 37]

Cette interprétation se serait fourvoyée en introduisant le sujet conscient et le « mysticisme » dans la physique³.

D'après Popper, la première source du subjectivisme de Copenhague réside dans son interprétation des probabilités quantiques. De manière générale, les prédictions quantiques sont de nature probabiliste et la question est de savoir quel sens donner à ces probabilités. Popper distingue les interprétations objectivistes et subjectivistes : les premières considèrent les probabilités comme des propriétés des systèmes physiques, alors que les secondes en font des caractéristiques de notre connaissance (ou de notre manque de connaissance).

1. Sur l'intérêt suscité par les analyses de Popper chez plusieurs physiciens de premier plan, on pourra consulter [Shields 2012].

2. Parler d'« interprétation de Copenhague » est problématique car cela passe sous silence les importantes divergences entre Bohr et ses collaborateurs [voir Howard 2004]. Toutefois, c'est ainsi que Popper désigne et pense son adversaire, nous garderons donc cette expression dans cette section.

3. Sur les références au sujet et à la conscience, voir [Popper 1982, 37, 119, 123, 124, 176].

L'interprétation la plus courante en physique est objectiviste⁴ : elle consiste à considérer que pour une expérience aléatoire ayant plusieurs résultats possibles, la probabilité d'un résultat particulier est le poids relatif de ce résultat par rapport à l'ensemble des résultats obtenus dans une série infinie de réalisation de cette même expérience. Cette interprétation est appelée l'interprétation fréquentiste.

Or, d'après Popper, ce n'est pas une telle interprétation que l'École de Copenhague a adoptée, mais plutôt une interprétation subjectiviste. Selon l'interprétation subjectiviste, la probabilité d'un résultat mesure le degré de croyance que nous avons dans sa réalisation. Dans cette interprétation, les probabilités renvoient donc à notre connaissance des événements possibles. D'après Popper, c'est une telle interprétation que l'École de Copenhague a principalement adoptée⁵. À l'appui de son allégation, [Popper 1982, 109–116] donne quelques citations extraites de [Born 1949], [von Neuman 1955] et [Pauli 1954]. Quoiqu'il ne s'appuie sur aucun texte de Bohr, Popper attribue aussi cette interprétation à ce dernier [Popper 1982, 117].

Par ailleurs, Popper considère que cette erreur trouve sa source dans un « préjugé déterministe inconscient » [Popper 1982, 99], que les partisans de l'interprétation de Copenhague auraient entretenu à propos de la physique classique : croyant que celle-ci est forcément déterministe, ils auraient adopté une lecture subjectiviste des probabilités de la thermodynamique et de la physique statistique. Quand il s'est agi d'interpréter les probabilités quantiques, ils leur auraient appliqué la même interprétation subjectiviste, alors même qu'ils ne croyaient plus au déterminisme pour ce qui concerne la mécanique quantique.

L'autre source majeure du subjectivisme de Copenhague selon Popper réside dans les relations de Heisenberg. Celles-ci portent sur des couples de grandeurs physiques qu'on avait coutume d'appeler, au début de la mécanique quantique, des « observables conjuguées » (par exemple la position et l'impulsion, ou le temps et l'énergie). Les relations de Heisenberg s'écrivent ainsi : $\Delta A \cdot \Delta B \geq \hbar$, où A et B sont deux variables conjuguées et où le symbole Δ représente l'écart quadratique moyen.

Dans [Heisenberg 1927], Heisenberg présente les relations qui portent son nom à partir d'une expérience utilisant un microscope. En observant un électron à l'aide d'un microscope, on peut établir sa position. Le résultat de l'expérience comporte une forme d'« imprécision » que l'on peut faire diminuer en réduisant la longueur d'onde du rayonnement interne au microscope. Or, le fait d'éclairer l'électron en l'observant à l'aide du microscope provoque une perturbation, incontrôlable, qui affecte l'impulsion de l'électron. En conséquence, si l'on cherche à établir la valeur finale de l'impulsion de l'électron, il

4. Dans le cadre de notre étude, nous n'exposons pas l'interprétation propensionniste défendue par Popper.

5. Plus précisément, selon Popper, les partisans de Copenhague alterneraient entre une position subjectiviste (principalement) et une position objectiviste (parfois).

faudra tenir compte d'une nouvelle « imprécision » qui affectera le résultat, imprécision qui, cette fois, est d'autant plus importante que la longueur d'onde du rayonnement est grande. Ainsi, selon la longueur d'onde utilisée, on peut diminuer l'imprécision concernant la position ou celle concernant l'impulsion, mais le produit des deux demeure constant et de l'ordre de h (la constante de Planck⁶).

Cet article ouvre la voie à deux manières différentes de comprendre ce qu'est cette « imprécision ». D'un côté, Heisenberg précise au début de l'article que des mots tels que « position d'un objet » ou « impulsion » ne peuvent trouver leur sens et leur définition que dans certaines expériences. Or, si les mots sont définis par les expériences, les grandeurs qu'ils désignent ne sont pas déterminées indépendamment de ces expériences et la latitude exprimée par les relations de Heisenberg est une forme d'indétermination des grandeurs physiques, et non pas seulement l'expression d'une imprécision irréductible de nos mesures.

Mais d'un autre côté, Heisenberg fait référence à plusieurs reprises à « la marge d'erreur » ou à « l'imprécision » liée au dispositif expérimental. Or, parler d'erreur ou d'imprécision suggère qu'il y a un écart entre la valeur obtenue et la valeur correcte. Dans cette perspective, la latitude exprimée par les relations de Heisenberg n'est pas une caractéristique des grandeurs physiques elles-mêmes, mais plutôt de notre connaissance de ces dernières. De même, les passages où il est question de la trajectoire des électrons (voir [Heisenberg 1927, 176]) suggèrent que les électrons ont bien à la fois une position et une impulsion, et que les relations de Heisenberg portent sur notre difficulté à les connaître⁷.

Cette dualité des lectures possibles est soulignée par Popper, qui considère que, dans leur ensemble, les partisans de l'École de Copenhague ont hésité entre deux lectures, que Popper appelle « l'interprétation objective » et « l'interprétation subjective » des relations de Heisenberg [Popper 1934, 223–224]. Selon la première, « il est inadmissible, incorrect, ou métaphysique, d'attribuer à la particule quelque chose comme “une position-avec-un-moment”, ou un “parcours”, déterminé avec précision ». Selon la deuxième, au contraire, l'électron possède bien à la fois une position et une impulsion, mais en réalisant une mesure, le sujet introduit une perturbation qui affecte ces deux grandeurs. Ainsi, la connaissance des grandeurs conjuguées est irrémédiablement affectée d'une imprécision minimale et la mécanique quantique exprime une limite de notre connaissance de la matière.

Popper est surtout préoccupé par l'interprétation subjective [Popper 1982, 54] parce que, combinée à l'interprétation subjective des probabilités, elle rend

6. Heisenberg analyse d'autres expériences qui le conduisent à chaque fois aux mêmes relations.

7. Sur le vocabulaire utilisé par Heisenberg et par ses traducteurs pour caractériser ses relations (« indétermination », « imprécision », « incertitude »), voir [Lévy-Leblond & Balibar 1998].

possible plusieurs affirmations subjectivistes que l'École de Copenhague aurait défendues. D'une part, selon Popper, ses partisans ont accepté de parler d'une dualité de nature pour la lumière et les objets quantiques, qui seraient à la fois des ondes et des corpuscules. Bien sûr, aucune entité ne peut être réellement à la fois une onde et une particule, et prise en un sens objectiviste, la dualité de nature serait une contradiction dans les termes. Mais en adoptant une lecture subjectiviste des formules de la mécanique quantique, la dualité ne porte plus sur la matière mais sur notre connaissance et finit par exprimer les imperfections ou les limites de cette dernière.

D'autre part, les partisans de l'interprétation de Copenhague auraient également soutenu une thèse subjectiviste concernant « l'effondrement de la fonction d'onde » (ou du « paquet d'ondes ») [Popper 1982, section 8]. La « fonction d'onde » représente l'état du système. Son étalement avant la mesure correspond au fait que plusieurs résultats sont possibles. En revanche, après la mesure, l'état du système est égal à l'état propre correspondant à la valeur propre mesurée. L'étalement initial de la fonction d'onde a brutalement disparu : celle-ci s'est effondrée. Popper attribue à l'interprétation de Copenhague la thèse selon laquelle c'est l'intervention du sujet qui produit cet effondrement : en disposant un appareil de mesure, le sujet obligerait la nature à sélectionner une valeur parmi toutes celles qui sont possibles. Ce serait donc finalement l'accroissement de la connaissance du sujet qui produirait cette modification brutale de l'état du système : voilà, dit Popper, l'ultime conséquence du subjectivisme de Copenhague et des absurdités auxquelles il conduit ses partisans. À ses yeux, c'est même le statut de la physique comme science qui est menacé :

Si l'on interprète les formules de Heisenberg dans un sens tout à fait subjectif, le statut de la physique comme science objective se trouve mis en péril. [...] Et c'est ainsi que toute la théorie subjectiviste de la probabilité envahit le royaume de la physique. [Popper 1934, 237]

3 La position de Bohr

Bohr s'est toujours défendu d'avoir adopté des thèses qui conduisent à une forme de subjectivisme, et la lecture de ses textes ne plaide pas en faveur de l'accusation portée par Popper. Pour ce qui est de l'interprétation des probabilités, Bohr exprime des positions qui relèvent de l'interprétation fréquentiste⁸, que Popper lui-même considérait comme objective⁹. À plu-

8. Sur ce point, nous ne sommes pas d'accord avec [Howard 2012, 44] qui affirme que Bohr n'a jamais pris de position explicite concernant l'interprétation des probabilités.

9. Afin de demeurer dans le cadre de notre étude et parce que Popper lui-même considère que l'interprétation fréquentiste est objective, nous laissons de côté les critiques que l'on peut adresser à cette interprétation, y compris celle qui porte sur son objectivité.

sieurs reprises, Bohr fait ainsi référence au fait que la mécanique quantique résout des problèmes statistiques, ou qu'il faut comprendre les probabilités quantiques de manière statistique (voir [Bohr 1929, 26, 31, 88, 89, 100] et [Bohr 1991, 153, 163, 199, 200, 206, 234, 302]). Quand il doit donner un sens physique aux probabilités, il fait ainsi référence à des séries statistiques et à des poids relatifs. À propos de la probabilité de désintégration d'un atome de radium, il écrit :

Si l'on considère un certain nombre d'atomes de radium, tout ce qu'on peut en dire, c'est qu'il y a une probabilité déterminée pour *qu'une certaine fraction de ce nombre se désintègre par seconde.*
[Bohr 1929, 99, nous soulignons]

L'argumentation de Popper au sujet de l'interprétation des probabilités par Bohr peut surprendre. D'une part, aucune des citations données par Popper à l'appui de son affirmation n'est issue de textes de Bohr¹⁰. D'autre part, il choisit de fonder son analyse sur un « préjugé déterministe inconscient » au sujet de la physique classique [Popper 1982, 99], alors même que c'est contraire à ce que Bohr écrit explicitement. De ce fait, il nous semble que cet aspect de la critique de Popper est, globalement, le moins instructif.

Bohr n'a pas non plus soutenu une position subjectiviste concernant les relations de Heisenberg. Pour étayer notre affirmation, il faut repartir de ce que Bohr considère comme le point de départ de son interprétation : le postulat quantique¹¹. Ce postulat, qui exprime selon Bohr « l'essence de la théorie », consiste en ceci que « tout processus atomique présente un caractère de discontinuité, ou plutôt d'individualité, complètement étranger aux théories classiques, et caractérisé par le quantum d'action de Planck » [Bohr 1929, 50].

La « discontinuité » renvoie à ce qui a été découvert grâce aux travaux de Planck sur le corps noir, puis à ceux d'Einstein sur les photons, à savoir que les échanges d'énergie sont des multiples d'une grandeur minimale, appelée le « quantum d'action » et qui est de l'ordre de la constante de Planck. Contrairement à la mécanique classique, les processus quantiques ne peuvent donc pas être décrits par des fonctions continues, dont la valeur pourrait être aussi proche de zéro que l'on veut. Par ailleurs, ces échanges sont « incontrôlables », au sens où ils comportent une part d'indétermination (par exemple le moment précis où ils ont lieu).

L'« individualité » renvoie à l'idée que les éléments qui interagissent de façon élémentaire au niveau atomique finissent par former un tout inanaly-sable. Lors d'un échange élémentaire d'énergie, on peut caractériser la situation initiale et la situation finale, mais pas les situations intermédiaires car celles-ci

10. De surcroît, ces citations ne portent pas sur la mécanique quantique.

11. Notre restitution de la position de Bohr se limitera aux aspects utiles pour notre étude. Pour une restitution plus complète, on pourra se référer à [Chevalley 1991], [Faye 1991], [Bitbol 1996], [Poinat 2014, Partie I]. Par ailleurs, nous laisserons de côté les premières thèses de Bohr, celles défendues avant 1925.

correspondent aux valeurs interdites du fait de la discontinuité des processus atomiques. Si les états intermédiaires ne peuvent pas être décrits, alors les composants forment un tout indivisible pendant l'interaction.

Bohr considère par ailleurs que le postulat quantique s'applique aux mesures quantiques. Par conséquent, la discontinuité et l'individualité associées au postulat quantique se manifestent aussi lors d'une mesure quantique. Le caractère d'individualité du postulat quantique appliqué à la mesure signifie que, pendant le processus de la mesure, le système mesuré et l'appareil de mesure forment un tout indivisible. Bohr écrit ainsi : « on ne peut pas [...] attribuer ni au phénomène ni à l'instrument d'observation une réalité physique autonome » [Bohr 1929, 51]. Ici, Bohr applique ce qu'il a dit de façon plus générale à propos de l'individualité associée au postulat quantique. Pendant une mesure, la seule réalité est globale, inanalysable :

il est impossible de séparer nettement un comportement indépendant des objets, de leur interaction avec les instruments de mesure définissant le système de référence. [Bohr 1991, 225]

Les phénomènes quantiques dépendent des appareils de mesure pour leur apparition et leur définition, et on ne peut pas parler d'eux indépendamment des appareils de mesure. Le postulat quantique implique donc, selon Bohr, la thèse de la contextualité : les grandeurs physiques que l'on mesure ne peuvent pas être détachées du contexte global et attribuées à un objet supposé exister par lui-même.

D'autre part, la discontinuité associée au postulat quantique conduit à considérer que toute mesure provoque un échange d'énergie au moins égal à la constante de Planck. Or, à l'échelle atomique, un tel échange n'est pas négligeable et il faut donc renoncer à une supposition que nous pouvions faire en mécanique classique, à savoir que « l'observation d'un phénomène ne lui causait aucune perturbation essentielle » [Bohr 1929, 50]. La prise en compte de l'échange d'énergie lors de la mesure conduit Bohr à opposer deux types de description d'un système quantique : d'un côté, l'application des lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion aux systèmes quantiques correspond à ce que Bohr appelle la « description causale » (ou « principe de causalité ») ; de l'autre, la localisation du système dans l'espace et dans le temps est la « représentation spatio-temporelle » des systèmes quantiques. Si on veut établir la description causale d'un système, il faut empêcher toute modification (d'origine extérieure) de son état d'énergie. Par conséquent, il faut idéalement renoncer à toute mesure, et donc aussi à la représentation spatio-temporelle. Réciproquement, si on veut localiser le système dans l'espace-temps, il faut l'observer par une mesure et, idéalement, il faut donc renoncer à la description causale de ce système. Ainsi, alors que les deux descriptions sont possibles conjointement en mécanique classique, il n'en va plus de même en mécanique quantique où « le postulat quantique nous oblige à renoncer à une description à la fois causale et spatio-temporelle » [Bohr 1929, 51]. Par ailleurs, on ne peut se passer d'aucune des deux descriptions, qui sont nécessaires pour

épuiser l'ensemble des informations disponibles sur un système. C'est pourquoi il faut considérer qu'elles sont à la fois incompatibles et complémentaires :

dans la théorie quantique, un élément tout à fait nouveau, incontrôlable, surgit à chaque observation par suite de l'interaction finie avec l'instrument de mesure. [...] [L]a mesure des coordonnées de position d'une particule [...] entraîne toujours une rupture complète dans la description causale de son comportement dynamique; de même, la connaissance de son impulsion n'est obtenue qu'au prix d'une lacune dans sa description spatio-temporelle. C'est précisément cet état de choses qui traduit nettement le caractère complémentaire de la description quantique des phénomènes atomiques. [Bohr 1929, 64]

Dans la pratique, les contextes expérimentaux ne réalisent qu'imparfaitement les conditions idéales de l'une ou de l'autre des descriptions, et on peut tendre plutôt vers les unes ou plutôt vers les autres, mais pas vers les deux à la fois. C'est comme cela qu'il faut comprendre les relations de Heisenberg selon Bohr : elles donnent la mesure de l'incompatibilité irréductible des deux descriptions et des contextes expérimentaux qui leur sont associés. Les grandeurs d'énergie et d'impulsion sont associées à la description causale, celles de position et de temps à la description spatio-temporelle. Plus on s'approche des conditions qui permettent de déterminer les premières, plus on s'éloigne de celles qui permettent de déterminer les secondes, et réciproquement. Les relations de Heisenberg donnent la valeur numérique du jeu qui existe forcément entre les possibilités de détermination des grandeurs conjuguées :

Il existe une relation réciproque générale entre les incertitudes minimales avec lesquelles les vecteurs d'énergie-impulsion et d'espace-temps associés aux « individus » [c'est-à-dire aux systèmes] peuvent être *respectivement définis*. Cette relation peut être considérée comme une expression symbolique très simple de la nature complémentaire de la description spatio-temporelle et du principe de causalité. [Bohr 1929, 57, nous soulignons]

N'est-il pas possible, toutefois, de surmonter cette incompatibilité en faisant se succéder les contextes expérimentaux? Si les deux descriptions d'un même système quantique ne sont pas possibles au même moment, pourquoi ne pas les établir successivement, puis les considérer comme valables conjointement pour un seul et même objet? Si on pouvait considérer les grandeurs physiques comme indépendantes des contextes expérimentaux qui leur donnent sens et les attribuer au seul système quantique considéré, on pourrait conserver ce qu'une description nous a permis d'obtenir (par exemple l'impulsion) et ajouter ce que l'autre apporte (la position). Mais c'est précisément ce que nous ne pouvons faire en raison de la contextualité des phénomènes quantiques : si on change de contexte, on ne peut plus parler des grandeurs qui lui étaient associées. Les grandeurs conjuguées

sont donc irrémédiablement incompatibles en raison de la contextualité [Bohr 1991, 207–208].

Sur la base des analyses précédentes, il apparaît que la position de Bohr peut difficilement être accusée de subjectivisme. D'une part, il considère que les relations de Heisenberg portent sur la possibilité de définir les grandeurs conjuguées, et non pas seulement sur la possibilité de les mesurer. D'autre part, la notion de trajectoire disparaît dans les analyses de Bohr : les grandeurs de position et d'impulsion étant associées à des contextes expérimentaux incompatibles, il n'y a pas de contexte dans lequel cette notion trouverait un sens et pourrait être définie. À aucun moment, Bohr n'envisage de considérer que les relations de Heisenberg mesureraient l'imprécision avec laquelle on pourrait connaître la trajectoire des électrons ou des photons (voir en particulier [Bohr 1929, 51] et [Bohr 1991, 209]). Il n'est donc pas question ici des limites de la connaissance humaine et Bohr n'a pas adopté l'interprétation que Popper appelait « subjective » des relations de Heisenberg. De façon plus générale, toute l'analyse de Bohr repose sur le postulat quantique et ses conséquences sur l'acte de mesure, à savoir l'échange incontrôlable d'énergie et la contextualité. Or, tous ces processus sont supposés se dérouler au sein de la matière, entre systèmes physiques, et ils sont indépendants du sujet humain, de sa conscience, ou de sa connaissance. Ce sont des processus qui incluent tout le contexte expérimental, mais qui demeurent purement physiques.

L'accusation de subjectivisme, enfin, n'est pas non plus recevable pour ce qui concerne l'« effondrement du paquet d'ondes ». Pour Bohr, la fonction Ψ est un outil prédictif et ne reflète aucune réalité physique. Il n'y a donc pas lieu de dire que le sujet provoquerait un quelconque processus physique lors de la mesure. Bohr le dit explicitement au V^e Congrès Solvay de 1927, à propos de l'échange entre Dirac et Heisenberg sur la question de savoir si, lors de la réduction du paquet d'ondes, on a affaire à un choix opéré par la nature (Dirac) ou par l'observateur (Heisenberg). Bohr écrit :

ces terminologies paraissent l'une et l'autre bien douteuses, car il n'est guère raisonnable d'attribuer à la nature une volonté au sens habituel et, d'autre part, *l'observateur ne peut avoir aucune influence sur les événements qui peuvent apparaître dans les conditions qu'il a préparées.* [Bohr 1949, 224–225, nous soulignons]

Le seul rôle que Bohr fait jouer au sujet concerne la question du langage. Bohr considère en effet que les concepts et le langage de la physique classique, bien qu'ils soient inadaptés pour décrire les phénomènes quantiques en raison du postulat quantique, demeurent indispensables pour décrire nos expériences :

D'aussi loin que les phénomènes puissent transcender le domaine des explications de la physique classique, la description de tous les résultats d'expérience doit être exprimée en termes classiques. La raison en est simple : par le mot d'« expérience », nous nous référons à une situation où nous pouvons dire à d'autres hommes

ce que nous avons fait et ce que nous avons appris ; il en résulte que la description du dispositif expérimental et des résultats des observations doit être exprimée en un langage dénué d'ambiguïté, se servant convenablement de la terminologie de la physique classique. [Bohr 1949, 207]¹²

Pour Bohr, le langage de la physique classique est nécessaire parce qu'il permet le type d'objectivité requise par la science et la communication entre scientifiques. En raison du fait qu'on ne peut plus faire abstraction du contexte, le langage quantique n'est pas du tout adéquat pour parler des expériences physiques. En revanche, au niveau macroscopique, le quantum d'action est négligeable : les interactions entre systèmes macroscopiques ne sont pas soumises à l'indivisibilité du postulat quantique et on peut les décrire indépendamment du contexte. Pour décrire ce qu'on a fait pour préparer l'expérience et pour obtenir les résultats de mesure, on pourra donc utiliser le langage de la physique classique, dit Bohr. Comme on le voit, les analyses qu'il mène sur le langage et la communication entre sujets sont guidées par l'exigence d'objectivité¹³.

Par rapport à la question de la constitution de l'objet scientifique, la nouveauté selon Bohr est que le phénomène quantique inclut l'appareillage : si l'on veut maintenir la référence à un objet, il faut le construire à partir du tout constitué du système et des appareils de mesure. Bohr déplace donc la frontière de l'objet, en y incluant l'appareillage, mais il ne la déplace pas jusqu'à inclure le sujet au sens traditionnel. En un sens, on peut dire qu'il inclut un sujet purement physique, constitué des appareils de mesure, mais pas le sujet humain¹⁴. C'est en ce sens qu'il faut comprendre l'utilisation que fait Bohr des termes « subjectif » et « subjectivité » : ces termes renvoient aux conditions physiques d'observation des phénomènes, et non pas à la subjectivité humaine (ses sentiments, ses passions, ou sa conscience). Ainsi, explique Bohr, la théorie de la relativité a amené à un réexamen de la question de la subjectivité à travers la question de la simultanéité : à quelles conditions pouvons-nous dire que deux événements ont lieu au même moment ? Il ne s'agit pas du tout de verser dans la psychologie, ni d'analyser les contenus de conscience d'un sujet humain [Bohr 1929, 91-92], mais seulement de réfléchir aux conditions physiques et techniques dans lesquelles nous pouvons faire des observations.

Ainsi, Bohr ne s'en tient pas à l'objet classique, conçu indépendamment de l'appareillage, mais il ne renonce pas à l'objectivité : il se contente de définir une nouvelle forme d'objectivité, en y incluant la mention du contexte expérimental, tout en s'interdisant d'y inclure aussi le sujet humain. Cette nouvelle objectivité est ainsi pleinement solidaire de la thèse de la contex-

12. Souligné par Bohr. Voir aussi [Bohr 1929, 89].

13. Voir par exemple lorsque Bohr précise qu'il développe ses analyses « sans avoir, bien entendu, l'intention d'introduire une quelconque mystique inconciliable avec l'esprit scientifique » [Bohr 1929, 109].

14. C'est un point qu'avait déjà souligné [Feyerabend 1969].

tualité. Or, Popper se trouve dans l'impossibilité de discuter la proposition de Bohr en matière d'objectivité, puisque la contextualité fait défaut dans sa restitution de la pensée de Bohr : de ce fait, Popper le présente comme s'il renonçait à toute forme d'objectivité¹⁵, alors qu'il ne renonce qu'à une forme particulière de l'objectivité. De nouveau, c'est la difficulté à restituer la thèse de la contextualité qui conduit Popper à formuler son accusation de subjectivisme et à passer à côté d'un véritable examen critique des thèses de son adversaire.

4 L'article EPR et la contextualité

Le fait que Popper n'ait pas saisi cet aspect de la pensée de Bohr est confirmé par l'analyse de [Einstein, Podolsky *et al.* 1935]¹⁶ et de la manière dont Popper comprend le débat entre Einstein et Bohr. L'article EPR est un article particulièrement riche et la restitution que nous en faisons ici est très sélective¹⁷. Le raisonnement développé dans l'article est fondé sur ce que les auteurs appellent le « critère de réalité » :

si, sans perturber le système en aucune façon, nous pouvons prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à 1) la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de la réalité physique correspondant à cette grandeur physique.
[Einstein, Podolsky *et al.* 1935, 225]

Ce critère énonce ainsi deux conditions distinctes : une condition de prédiction certaine et une condition d'absence de perturbation.

Le critère de réalité est ensuite appliqué à la situation suivante : supposons que deux systèmes (notés I et II), initialement séparés et indépendants l'un de l'autre, interagissent entre les temps $t = 0$ et $t = T$, de sorte que l'état du système global soit intriqué pour ce qui concerne les grandeurs de position et de quantité de mouvement. Le caractère intriqué implique ceci : si l'on fait une mesure de la position sur le système I, alors on peut prédire avec une entière certitude le résultat d'une mesure de position sur le système II. Inversement, si l'on fait une mesure de la quantité de mouvement sur le système I, alors on peut prévoir avec une entière certitude le résultat d'une mesure de quantité de mouvement sur le système II.

15. Parfois, les formulations de Popper distinguent la conscience et les appareils de mesure, voir notamment [Popper 1982, 42, 124]. Mais Popper considère qu'il s'agit fondamentalement d'une seule et même doctrine [Popper 1982, 119], et cela ne change pas son accusation de subjectivisme.

16. Nous utiliserons l'appellation courante pour cet article : « l'article EPR ».

17. Une abondante littérature est consacrée à cet article. Parmi d'autres références, on pourra lire [D'Espagnat 1994, chap. 9], [Bitbol 1996, section 3.2], [Bächtold 2008, chap. 3] et [Fine 2020].

L'intérêt de l'état intriqué est qu'il semble remplir les deux conditions du critère de réalité. D'une part, la condition portant sur la prédiction certaine est remplie par simple application des propriétés de l'intrication. D'autre part, on ne fait aucune mesure sur le système II : tout est déduit de mesures qui peuvent être faites sur le système I. Par conséquent, pour que la condition sur l'absence de perturbation ne puisse pas s'appliquer, il faudrait supposer que la mesure sur le système I perturbe instantanément à distance le système II. Or, les systèmes I et II peuvent être très éloignés l'un de l'autre et, en principe, la prédiction peut suivre immédiatement la mesure. Toute action perturbatrice liée à la mesure devrait donc se propager instantanément jusqu'au système II. D'après les auteurs, il est raisonnable de supposer qu'une telle action à distance n'a pas lieu.

Finalement, écrivent-ils, on peut appliquer le critère de réalité au système II en lui attribuant une position, et on peut aussi l'appliquer au même système II en lui attribuant une quantité de mouvement. Ainsi, il faut conclure que, pour le même système, il existe deux éléments de la réalité physique correspondant l'un à la position, l'autre à la quantité de mouvement. Or, la mécanique quantique ne donne pas accès à une description conjointe de ces deux grandeurs. Par conséquent, elle est incomplète : elle ne décrit pas de manière exhaustive la réalité physique.

Pour Popper, il est difficile d'échapper à l'argumentation des auteurs et leur conclusion est parfaitement exacte :

le soi-disant paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen [...] n'est pas un paradoxe, mais un argument valide, car il établit simplement ceci que nous devons attribuer aux particules une position et une quantité de mouvement précises. [Popper 1982, 64]

Il lui semble que l'article EPR met aux prises Einstein, le réalisme, le principe de l'action locale, et la thèse de l'incomplétude de la mécanique quantique d'un côté, et Bohr, le subjectivisme, l'action à distance, et la thèse selon laquelle la mécanique quantique est la théorie ultime, de l'autre. Popper considère ainsi que le mieux que Bohr pourrait faire pour éviter la conclusion de l'article EPR, serait de renoncer à l'action à distance.

Pourtant, ce n'est pas comme cela que Bohr répond à Einstein. D'une part, il écarte explicitement toute possibilité d'une action à distance qui perturberait le système II en raison des mesures sur le système I : « il est vrai que dans les mesures considérées, toute interaction mécanique directe du système et des dispositifs de mesure est exclue » [Bohr 1935*b*, 65]¹⁸. D'autre part, il ne conteste pas non plus le critère de réalité en tant que tel.

Ce que Bohr conteste, c'est qu'on puisse appliquer le critère de réalité *conjointement* à la position et à la quantité de mouvement. Pour pouvoir parler de la position du système II, il faut qu'il y ait un appareil qui mesure

18. Suite à l'article EPR, Bohr ne parlera plus de « perturbation » lors de la mesure. Sur ce point, voir [Bitbol 1996, 249-256].

la position du système I. Mais dans cette situation expérimentale, on ne peut pas mesurer en même temps la quantité de mouvement de I, et on ne peut donc pas non plus parler de la quantité de mouvement de II. Bien sûr, il en va de même si on mesure la quantité de mouvement de I : on ne peut plus parler de la position de II. Par conséquent, en raison de la contextualité et de ce qu'elle implique, on ne peut pas parler conjointement de prédictions certaines concernant *à la fois* la position et la quantité de mouvement :

Évidemment, il n'est pas question dans un tel cas d'une perturbation mécanique du système étudié durant le dernier stade critique du processus de mesure. Mais, même à ce stade, la question essentielle est celle d'*une influence sur les conditions mêmes qui définissent les types possibles de prédictions relatives au comportement futur du système*. Comme ces conditions constituent un élément inhérent à la description de tout phénomène auquel le terme « réalité physique » peut être attaché à juste titre, nous voyons que l'argumentation des auteurs cités ne leur donne pas le droit de conclure que la description par la mécanique quantique est essentiellement incomplète. [Bohr 1935a, 702]

Comme nous l'avons dit précédemment, la restitution faite par Popper de la réponse de Bohr confirme les difficultés qu'il a à restituer la thèse de la contextualité. Dans la section 17 de [Popper 1982], Popper propose une analyse détaillée de l'article EPR et de la réponse de Bohr, dont il dit qu'elle n'est pas claire et qu'il n'est pas sûr de l'avoir comprise. Popper commence par reprendre l'affirmation de Bohr selon laquelle les conditions pour faire des prédictions sur la position et celles pour faire des prédictions sur la quantité de mouvement sont mutuellement exclusives. Il restitue aussi l'étape suivante du raisonnement de Bohr, à savoir qu'on peut donc appliquer le critère de réalité successivement, mais pas simultanément. Formellement, la restitution que donne Popper est donc exacte. Mais, curieusement, Popper ne prend pas au sérieux la conclusion de Bohr, à savoir qu'on ne peut pas parler de la vitesse et de la quantité de mouvement comme de grandeurs physiques présentes *simultanément* au sein de la réalité physique :

la suggestion selon laquelle il est dénué de sens de parler de la position et de la quantité de mouvement à moins que nous puissions mettre la particule en rapport avec le système de coordonnées correspondant [soit à la position, soit à la quantité de mouvement] est aussi gratuite que l'assertion selon laquelle il est dépourvu de sens de dire d'un homme qu'il est riche à moins qu'il ne paye l'impôt sur le revenu. [Popper 1982, 149]

Le fait de payer l'impôt sur le revenu *révèle* qu'un homme est riche, mais *ne constitue pas* sa richesse. Il en va de même, selon Popper, de la mesure de la position : elle révèle la position de la particule, mais ne participe pas à la

constitution de cette position. Or, c'est précisément ce que Bohr conteste, au travers de la contextualité : l'acte de mesure est une condition du phénomène.

Ainsi, Popper ne prend pas au sérieux l'idée que la mesure puisse être autre chose qu'une simple mise en évidence d'une grandeur physique qui lui préexiste. Toute affirmation contraire lui semble impensable :

La discussion [entre Einstein et Bohr] portait principalement [sur le simple point selon lequel si je peux librement décider – et si je peux mettre à exécution avec succès ma décision *sans interférer avec vous* – que je souhaite mesurer votre taille et votre poids, il est alors déraisonnable de dire que nous n'avez pas, dans le même temps, à la fois une taille et un poids, mais que vous adoptez l'un ou l'autre en vous adaptant au stimulus de la mesure. [Popper 1982, 149]

« Gratuite », « déraisonnable » : Popper en vient à ne voir là qu'une façon « hautement scolastique » de « défendre une position intenable » [Popper 1982, 149]. Cette thèse de la contextualité lui paraît à ce point inacceptable qu'il a du mal à l'attribuer à Bohr :

je n'affirme pas du tout que c'est ce que [Bohr] voulait dire. Ma critique [...] n'est par conséquent pas dirigée contre Bohr, mais seulement contre ma propre version de sa réponse à Einstein, Podolsky et Rosen. [Popper 1982, 148]

Dans les comptes-rendus qu'il fera ultérieurement de la discussion entre Bohr et Einstein, Popper finira même par omettre cette thèse de Bohr qu'il juge tellement invraisemblable (par exemple dans la préface de [Popper 1982]). De même, lorsqu'il restitue les expériences de [Aspect, Grangier *et al.* 1982], et même s'il concède qu'elles ont été une déception pour lui [voir Redhead 1995], Popper reste fidèle à la lecture qu'il a toujours eue de l'article EPR. Le résultat de ces expériences est une violation des inégalités de Bell, ce qui est conforme aux prédictions quantiques et au point de vue de Bohr, mais contraire aux prédictions auxquelles conduit le point de vue d'Einstein. Pourtant, Popper multiplie les tentatives pour amoindrir leur portée et sauver le point de vue d'Einstein. Il y voit ainsi une remise en cause du principe de l'action locale et du réalisme, mais à aucun moment il n'envisage que ces résultats soient une corroboration du point de vue de Bohr.

Il apparaît finalement que l'article EPR pousse Bohr et Popper dans leurs retranchements. D'un côté, la réponse de Bohr tient tout entière dans la thèse de la contextualité, qui est le dernier rempart contre les arguments d'Einstein et qui apparaît comme étant la clé de voûte de sa pensée. De l'autre, la réponse de Bohr se limitant à réaffirmer la thèse de la contextualité, Popper se retrouve bien en peine pour la restituer, ce qu'il finit par reconnaître. L'article EPR apparaît ainsi comme une confirmation à la fois du rôle central joué par la

contextualité dans la pensée de Bohr et des difficultés de Popper à restituer cette dernière¹⁹.

5 Conclusion

L'objectif de notre article était de montrer que Popper ne restitue pas fidèlement la position de Bohr, en omettant systématiquement la thèse de la contextualité, et de mettre en évidence que cette omission a pour conséquence les accusations de subjectivisme que Popper soutient à l'encontre de Bohr. Sur cette base, d'autres interrogations peuvent être menées, concernant la question du réalisme : quelles modifications la thèse de la contextualité introduit-elle dans le réalisme en général ? Ces modifications sont-elles incompatibles avec le réalisme de Popper ? Ou bien y a-t-il une manière de les concilier, comme le suggère [Howard 2012] ? Ce sont des questions qui permettraient d'aller au-delà de la seule restitution par l'un des thèses de l'autre, et d'examiner sur le fond l'opposition entre Bohr et Popper, questions que le cadre de notre étude n'a pas permis d'aborder.

Remerciements

Pour cet article, nous avons bénéficié des remarques constructives de deux rapporteurs anonymes et nous leur adressons nos remerciements les plus chaleureux.

Bibliographie

ASPECT, Alain, GRANGIER, Philippe, *et al.* [1982], Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment : A new violation

19. De notre point de vue, [Howard 2012] ne tire pas bien les leçons de l'article EPR quant à la discussion par Popper des thèses de Bohr. D'une part, bien que publié en 2012, [Howard 2012] a été initialement écrit en 1981 et a été à peine modifié ensuite par l'auteur. De ce fait, il occulte [Popper 1982], alors même qu'il s'agit d'un ouvrage majeur entièrement consacré à la mécanique quantique, et il ne peut pas tirer profit des parties de cet ouvrage consacrées à l'article EPR. Il ne peut ainsi pas analyser les passages où Popper reconnaît qu'il a des difficultés à saisir la réponse de Bohr, ni sa manière (problématique) de restituer le débat et les implications de l'article EPR, comme nous avons cherché à le faire ici. D'autre part, l'article d'Howard ne prend pas au sérieux la réponse de Bohr à l'article EPR [voir Howard 2012, 48] et ne montre pas que l'article EPR fait apparaître la contextualité comme étant un élément central de la pensée de Bohr. Pour ces deux raisons, et en dépit de son intérêt par ailleurs, [Howard 2012] ne met pas en évidence que la thèse de la contextualité est la source d'une difficulté systématique de Popper à restituer les thèses de Bohr.

of Bell's inequalities, *Physical Review Letters*, 49, 91–94, doi : 10.1103/PhysRevLett.49.91.

BÄCHTOLD, Manuel [2008], *L'Interprétation de la mécanique quantique. Une approche pragmatiste*, Vision des sciences, Paris : Hermann.

BITBOL, Michel [1996], *Mécanique quantique. Une introduction philosophique*, Paris : Flammarion.

BOHR, Niels [1929], *La Théorie atomique et la description des phénomènes*, Paris : Gauthier-Villars, *Atomteori og Naturbeskrivelse*, Copenhague : L. Bogtrykkeri, 1932. Trad. fr. par A. Legros et L. Rosenfeld (à partir de la version allemande du texte), rééd. Sceaux : Éditions Jacques Gabay, 1993. La pagination de nos citations correspond à l'édition française.

— [1935a], Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?, *Phys. Rev.*, 48, 696–702, doi : 10.1103/PhysRev.48.696, trad. fr. dans [Bohr 1991]. La pagination de nos citations correspond à la traduction française.

— [1935b], Quantum mechanics and physical reality, *Nature*, 136(3428), 65–65, doi : 10.1038/136065a0, trad. fr. dans [Bohr 1991]. La pagination de nos citations correspond à la traduction française.

— [1949], Discussions with Einstein on epistemological problems in atomic physics, in : *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*, edited by P. Schilpp, Cambridge : Cambridge University Press, 202–241, trad.fr. dans [Bohr 1991] ; la pagination de nos citations correspond à la traduction française.

— [1991], *Physique atomique et connaissance humaine*, Folio, Paris : Gallimard, trad. fr., introd. et annot. par C. Chevalley.

BORN, Max [1949], *Natural Philosophy of Cause and Change*, Oxford : Clarendon Press.

CHEVALLEY, Catherine [1991], *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris : Gallimard, chap. Introduction : le dessin et la couleur, 17–140.

D'ESPAGNAT, Bernard [1994], *Le Réel voilé ; analyse des concepts quantiques*, Paris : Fayard.

EINSTEIN, Albert, PODOLSKY, Boris, *et al.* [1935], Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?, *Phys. Rev.*, 47, 777–780, doi : 10.1103/PhysRev.47.777, repris dans Einstein, A., 1989, *Œuvres choisies*, 5 vol., éd. par F. Balibar, O. Darrigol & B. Jech , Paris : Seuil. La pagination de nos citations correspond à l'édition française.

FAYE, Jan [1991], *Niels Bohr : His Heritage and Legacy. An Anti-Realist View of Quantum Mechanics*, Dordrecht : Kluwer.

- FEYERABEND, Paul K. [1969], On a recent critique of complementarity : Part II, *Philosophy of Science*, 36(1), 82–105, doi : 10.1086/288238.
- FINE, Arthur [2020], The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in quantum theory, in : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by E. N. Zalta, Metaphysics Research Lab, Stanford University, Summer 2020 edn., URL <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/qt-epr/>.
- HEISENBERG, Werner [1927], Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Zeitschrift für Physik*, 43(3), 172–198, doi : 10.1007/BF01397280.
- HOWARD, Don [2004], Who invented the “Copenhagen Interpretation”? A Study in mythology, *Philosophy of Science*, 71(5), 669–682, doi : 10.1086/425941.
- [2012], Popper and Bohr on realism in quantum mechanics, *Quanta*, 1(1), 33–57, doi : 10.12743/quanta.v1i1.9.
- LÉVY-LEBLOND, Jean-Marc & BALIBAR, Françoise [1998], Answer to question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle?, *American Journal of Physics*, 66(4), 279–280, doi : 10.1119/1.18873.
- PAULI, Wolfgang [1954], Wahrscheinlichkeit und Physik, *Dialectica*, 8(2), 112–124, doi : 10.1111/j.1746-8361.1954.tb01125.x.
- PERES, Asher [2002], Karl Popper and the Copenhagen interpretation, *Studies in History and Philosophy of Science Part B*, 33(1), 23–34, doi : 10.1016/S1355-2198(01)00034-X.
- POINAT, Sébastien [2014], *Mécanique quantique : du formalisme mathématique au concept philosophique*, Visions des sciences, Paris : Hermann, préface par J. Benoist.
- POPPER, Karl [1934], *Logik der Forschung*, Vienne : Springer, trad. fr. par N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, *La Logique de la découverte scientifique*, Paris : Payot, 1973 (avec les appendices).
- [1982], *The Postscript to The Logic of Scientific Discovery, III*, Londres : Hutchinson and Company, trad. fr. par E. Malolo Dissakè, *La Théorie quantique et le schisme en physique*, Paris : Hermann, 1996.
- [1990], *A World of Propensities*, Bristol : Thoemass Antiquarian Books, trad. fr. par A. Boyer, *Un univers de propensions*, Combas : L’Éclat.
- REDHEAD, Michael [1995], Popper and the quantum theory, in : *Karl Popper : Philosophy and Problems*, edited by A. O’Hear, Cambridge : Cambridge University Press, 163–176.

SHIELDS, William [2012], A historical survey of Sir Karl Popper's contribution to quantum mechanics, *Quanta*, 1(1), 1–12, doi : 10.12743/quanta.v1i1.4.

VON NEUMAN, John [1955], *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton : Princeton University Press.