

Adresses de *Théorétiques*
revuethéoretique@gmail.com
06 BP 6295 Abidjan 06

© LE PAPHYRUS Éditions, Bouaké 2022

ISBN : 978-2-490574-09-4

ISSN : 2663 3132

Toute reproduction, quel que soit le procédé, est interdite sous peine de poursuites judiciaires.

Théorétiques

Revue africaine d'épistémologie

Vol 1 N°04 décembre 2022

Thème : LIBRE

Les revues scientifiques se rapportant à l'épistémologie sont rares en Afrique. La Revue Théorétiques a été mise au jour pour offrir un espace de publication aux chercheurs exerçant dans ce domaine. Elle vise ainsi à promouvoir la recherche épistémologique sur le continent. Opérant dans l'espace CAMES, sa ligne éditoriale s'inscrit dans les normes éditoriales établies par cette Institution. Théorétiques, Revue africaine d'épistémologie, se destine à publier des contributions originales en matière d'épistémologie *lato sensu*. Revue scientifique à comité de lecture, elle reçoit les contributions d'auteurs de tous horizons dont les réflexions contribuent au développement de la recherche sur les théories et pratiques du Savoir. Théorétiques, dirigée par une équipe de spécialistes, est affiliée à des organisations scientifiques telles que la Société Ivoirienne de Bioéthique d'Épistémologie et de Logique (SIBEL), la Chaire UNESCO de Bioéthique et le laboratoire Logiques, Savoirs, Rationalités (LSR) de l'Université Alassane Ouattara (Bouaké, Côte d'Ivoire).

LE PAPYRUS Éditions
info@lepapyrus.ci
(Côte d'Ivoire)

Remerciements

La rédaction de *Théorétiques*, Revue africaine d'épistémologie, remercie tous les contributeurs à ce numéro ainsi que les évaluateurs. Elle exprime sa reconnaissance envers les différents partenaires : Chaire UNESCO de Bioéthique, Société Ivoirienne de Bioéthique d'Épistémologie et de Logique (SIBEL), laboratoire Logiques, Savoirs, Rationalités (LSR) de l'Université Alassane Ouattara et Papyrus Éditions.

Directeur
Ignace YAPI

Rédacteur en chef
Antoine N'GUESSAN DEPRY

Rédacteurs en chef adjoints
Josué GUÉBO
Christian Kouadio YAO

Comité scientifique

- Charles Zacharie BOWAO, *Professeur*, Logique et Philosophie des sciences, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo
- Lazare Marcelin POAMÉ, *Professeur*, Philosophie de la technique et Bioéthique, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire
- Pierre N'ZINZI, *Professeur*, Philosophie / Épistémologie, Université Omar Bongo, Libreville, Gabon
- Ignace YAPI, *Professeur*, Logique, Histoire et Philosophie des sciences, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire
- Yaovi AKAKPO, *Professeur*, Philosophie / Épistémologie, Université de Lomé, Togo
- Ramses BOA TIÉMÉLÉ, *Professeur*, Philosophie et Épistémologie des sciences endogènes, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
- Antoine N'GUESSAN DEPRY, *Professeur*, Épistémologie et Histoire des sciences, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
- André Liboire M'BANI TSALA, *Professeur*, Bioéthique, Université de Dschang, Cameroun
- Noël N'Doumy ABÉ, *Professeur*, Anthropologie de la santé, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire
- Ludovic Doh FIE, *Professeur*, Esthétique, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire
- Aklesso ADJI, *Professeur*, Phénoménologie, Université de Lomé, Togo
- Michel Akissi GBOCHO, *Professeur*, Logique, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
- Emmanuel CRÉZOIT, *Professeur*, Médecine réparatrice, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire

- Antoine TAKO, *Professeur*, Neurosciences, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
- Arsène KOBÉA, *Professeur*, Physique des particules, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Comitè de lecture

- Ramses BOA TIÉMÉLÉ, *Professeur*, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
- André Liboire M'BANI TSALA, *Professeur*, Université de Dschang, Cameroun
- Antoine N'GUESSAN DEPRY, *Professeur*, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
- Noël N'Doumy ABÉ, *Professeur*, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire
- Abou SANGARÉ, *Professeur*, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire
- Komi KOUVON, *Professeur Titulaire*, Université de Lomé, Togo
- Auguste NSONSISSA, *Professeur Titulaire (HDR)*, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo
- Lucien BIAGNÉ, *Professeur Titulaire*, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire
- Josué GUÉBO, *Maitre de conférences*, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Comitè øditorial

Christian Kouadio YAO, Josué GUÉBO, Lucien BIAGNÉ, Bernadette Adjoua DANGO, Bernard Yao KOUASSI, Simplicite Kouassi KOUAKOU, Faloukou DOSSO

TABLE DES MATIÈRES

Romarc Yves Kouassi GOLI

L'avènement de l'épistémologie non-cartésienne comme
marque de progrès scientifique chez Bachelard..... 7-23

Serge Armand BOUAFFOU & Mahamoudou KONATÉ

De la critique du réalisme dans l'interprétation de
copenhague..... 24-45

Philippe NGUEMETA

Leçons sur la testabilité intersubjective de Popper..... 46-70

Mireille Alathé BODO

La philosophie de la connaissance chez leibniz..... 71-90

Issouf CAMARA

Technicisation du monde et morale de la résistance chez
Günther Anders..... 91-110

Patrice Sablé LEHOUA

Théorieanguilhemienne de la médecine : forces et
faiblesses..... 111-132

Péson SORO

La théorie de la relativité : la révolution einsteinienne de l'espace
et du temps en physique..... 133-153

Offo Élisée KADIO

Claude Bernard : Entre promotion d'une médecine
expérimentale et la réification du vivant..... 154-177

Angèle Amani KONAN

Y a-t-il qu'une logique de la découverte scientifique ?..... 178-195

Bernadette Adjoua DANGO

La théorie de révision de croyances AGM et le raisonnement
par abduction..... 196-213

De la critique du réalisme dans l'interprétation de copenhague

Serge Armand BOUAFFOU*
Mahamoudou KONATÉ*

Résumé

L'interprétation scientifique des phénomènes physiques s'inscrit dans deux visions du monde ou doctrines philosophiques opposées. La première est la doctrine réaliste issue de la physique classique et postulant l'existence d'une réalité indépendante de l'observateur ou du sujet qui expérimente. La seconde approche, dite phénoméniste ou phénoménaliste, est issue de l'interprétation philosophique de la physique quantique. Pour les théoriciens de l'Interprétation de Copenhague ou École de Copenhague, la mécanique quantique en général et le problème de la dualité onde-particule en particulier, obligent à renoncer au réalisme. Ainsi, contre le réalisme, le phénoménisme postule qu'il n'est pas possible de déterminer un seul modèle, ou une seule image, capable de décrire la nature profonde des particules quantiques. À partir d'une démarche historique et analytico-critique, la réflexion tente de comprendre d'une part les raisons de la critique du réalisme par l'École de Copenhague, et d'autre part, mettre en relief quelques implications épistémologiques de la doctrine phénoméniste professée par cette école d'épistémologie.

Mots clés : Épistémologie - Interprétation de Copenhague – Phénoménisme – Physique quantique – Réalisme – Réalité.

*Serge Armand BOUAFFOU, docteur en philosophie, Département de Philosophie, Université Alassane Ouattara (Côte d'Ivoire)

*Mahamoudou KONATÉ, Enseignant-chercheur, Département de Philosophie, Université Peleforo Gon Coulibaly de Korhogo (Côte d'Ivoire)

From the criticism of realism in the copenhagen interpretation

Abstract

The scientific interpretation of physical phenomena falls within two opposing worldviews or philosophical doctrines. The first is the realistic doctrine stemming from classical physics and postulating the existence of a reality independent of the observer or the subject who experiments. The second approach, called phenomenalist comes from the philosophical interpretation of quantum physics. For the theoreticians of the Copenhagen Interpretation or Copenhagen School, quantum mechanics in general and the problem of wave-particle duality in particular, force us to renounce realism. Thus, against realism, phenomenalism postulates that it is not possible to determine a single model, or a single image, capable of describing the deep nature of quantum particles. From an analytical-critical approach, the reflection attempts to understand on the one hand the reasons for the criticism of realism by the Copenhagen School, and on the other hand, to highlight some epistemological implications of the professed phenomenalist doctrine by this school of epistemology.

Keywords : Epistemology - Interpretation of Copenhagen - Phenomenalism - Quantum physics - Realism - Reality.

Introduction

La révolution quantique au vingtième siècle a été d'une portée majeure dans l'élaboration de nouveaux concepts et fondements de base en science et particulièrement dans les sciences physiques. Ces nouveaux concepts et fondements parmi lesquels nous pouvons citer l'indétermination, la subjectivité, la superposition, la dualité onde-corpuscule, etc., trouvent un sens dans la connaissance scientifique qui laisse transparaître d'importantes crises dont celle remettant en cause les principes de base de la science classique. C'est ainsi que le réalisme, en tant que doctrine

principale de la science classique dans l'interprétation des objets et phénomènes physiques, se trouve mis en crise. En effet, dans l'interprétation de Copenhague de la physique quantique, le réalisme s'avère limité dans l'approche et la description des objets et phénomènes physiques dans le monde subatomique. D'où l'intérêt de notre réflexion de comprendre le sens de la critique du réalisme dans l'interprétation de Copenhague. La préoccupation fondamentale de cette réflexion est de savoir si la critique du réalisme scientifique par l'Interprétation de Copenhague est-elle justifiée. L'examen de cette préoccupation, à travers une démarche historique et analytico-critique, nous conduit à la problématique suivante : Quels sont les fondements philosophiques et scientifiques de la doctrine réaliste ? Qu'est-ce qui justifie la critique de cette doctrine dans l'Interprétation de Copenhague ? Quelles sont les implications épistémologiques de la critique phénoméniste du réalisme ?

1. Les fondements philosophiques et scientifiques du réalisme

Par définition, nous pouvons dire que le réalisme est la « doctrine selon laquelle il existe une réalité extérieure distante et indépendante de l'acte par lequel nous la connaissons et qui ne pourrait s'y réduire » (L.-M. Morfaux, 1999, p. 307). Le réalisme est une attitude épistémologique de démarcation du sujet à l'égard du réel. Cette attitude admet l'existence du monde extérieur et indépendant du sujet connaissant ou investigateur. Selon le réalisme, les concepts sont à la fois des constructions mentales ou des produits issus de l'entendement. Quels sont les fondements philosophiques et scientifiques de cette doctrine ?

1.1. Les fondements philosophiques du réalisme

Au niveau philosophique, la doctrine réaliste puise ses éléments théoriques et conceptuels chez les premiers philosophes grecs de l'Antiquité. C'est ainsi que les présocratiques idéalistes postulent déjà l'existence d'un monde réel idéalement simple et ordonné. Dans cette veine, Pythagore et ses disciples défendaient « l'idée que les choses sont des nombres, des collections d'unités ou de points, raison pour laquelle le monde est mathématiquement connaissable » (M. Espinoza, 2012, p. 92).

Pour connaître alors les choses du monde, il faut procéder par démonstration à partir des nombres, des collections d'unités et aussi des points. Dans la même vision, Platon révélait pour sa part que le monde réel se retrouve dans les noumènes c'est-à-dire le monde des idées. Le monde sensible dans lequel nous vivons n'est que la pâle copie d'un monde réel, objectif, source de connaissances et de vérités.

Les fondements philosophiques du réalisme se retrouvent également chez les penseurs rationalistes de l'époque classique, notamment René Descartes et Emmanuel Kant. Parlant du premier, W. Heisenberg (1971, p. 90-91) précise que « la position à laquelle a mené le partage cartésien par rapport à la *res extensa*, était ce qu'on pourrait appeler un réalisme métaphysique : le Monde, à savoir les choses étendues, "existe" ». Pour Descartes, l'univers réel est rationnel et mécaniquement déterminé. Il en déduit qu'il n'existe pas de différence entre les "machines" et les "êtres de la nature" (R. Descartes, 2000, p. 145). Aussi, la saisie de la réalité, pour lui, doit se baser sur une méthodologie qui consiste à aller des éléments les plus simples pour aboutir aux phénomènes et aux êtres les plus complexes. Dans le *Discours de la méthode*, il précise que la connaissance de la réalité basée sur la raison et la vision mécaniste peut permettre aux hommes de se rendre « comme maîtres et possesseurs de la nature » (R. Descartes, 2000, p. 153). À l'instar de Descartes, Kant admet également l'existence d'un monde objectif connaissable par la loi de causalité, qui est la condition de toute expérience. Dans sa vision mécaniste, il considère la loi de causalité comme le principe moteur du réalisme scientifique car « le concept de cause (...) exige absolument que quelque chose A soit de telle sorte qu'une autre chose B en résulte nécessairement et selon une règle purement universelle » (E. Kant, 2006 p. 171).

À côté des philosophes rationalistes, certains penseurs empiristes admettent l'existence d'un univers réel connaissable par l'expérience ou les sens. Retenons que l'empirisme est une famille de positions philosophiques mettant l'accent sur le rôle de l'expérience dans l'acquisition de connaissances. À ce sujet, J. Locke (2001, p. 65) écrit que :

Les sens laissent tout d'abord entrer des idées particulières et meublent un crâne jusqu'alors vide, et l'esprit, devenant en grandissant peu à peu familier avec cer-

taines d'entre elles, elles sont logées dans la mémoire et des noms leurs sont attribués. C'est donc à partir des sens que la connaissance se fonde, pour ensuite, se loger dans l'esprit ou la raison.

L'attitude réaliste de l'empirisme constitue, de prime abord, la posture du sens commun vis-à-vis de la science. Elle consiste à attribuer à la science l'objectif de décrire littéralement la réalité tout en lui reconnaissant la capacité, en vertu de ses méthodes, d'atteindre ce but. En somme, l'empirisme est une attitude sceptique qui met l'accent sur l'expérience et l'observation, et ceci l'amène à mettre en doute les postulats qui vont au-delà de l'expérience directe. Ce doute peut concerner, par exemple, les entités postulées par les théories scientifiques : les électrons pourraient être utiles pour rendre compte de nos observations expérimentales, mais on devrait rester agnostiques quant à leur existence réelle, parce que n'étant pas directement observables par le sens. Pour les empiristes, nous n'avons pas accès à l'essence des choses, nous n'observons pas directement de lois de la nature ni de rapports causaux, seulement des régularités dans nos observations, et donc nous devrions nous contenter de rendre compte de ces régularités observables sans prétendre aller au-delà. Au niveau épistémologique, on retiendra que le réalisme empirique réside dans l'idée que le but de la science n'est pas de décrire la nature fondamentale de la réalité car cette dernière est en principe inatteignable, mais seulement de produire des théories empiriquement adéquates, c'est à dire des théories rendant compte de manière synthétique de tous les phénomènes observables.

1.2. Les fondements scientifiques du réalisme

La physique classique depuis Galilée et Newton se fonde sur plusieurs postulats scientifiques qui justifient l'approche réaliste des phénomènes de la nature. En effet, la physique galiléo-newtonienne, reposant sur le paradigme mécaniste, postule l'existence d'un univers objectif connaissable dans ses structures les plus intimes par l'esprit humain. Cette vision de la science s'est perpétuée avec beaucoup de succès auprès des nouvelles générations de savants entre le dix-huitième et le vingtième siècle. Comme le souligne W. Heisenberg, « la mécanique de Newton et

toutes les autres parties de la physique classique construites d'après son modèle partaient de l'hypothèse que l'on peut décrire le Monde sans parler de Dieu ou de nous-même » (1971, p. 89). La particularité donc du réalisme en physique classique est la description du monde réel en dehors du sujet ou de Dieu. Pour ces savants ou "physiciens réalistes", l'approche des phénomènes physiques devrait tenir compte des postulats scientifiques du réalisme, ce sans quoi il serait difficile de connaître véritablement en science. Dès lors, les fondements scientifiques du réalisme reposent essentiellement sur des postulats. Le premier postulat scientifique cher aux physiciens réalistes est le principe de mathématisation et de mécanisation de l'univers. En effet, pour décrire le monde réel et les phénomènes physiques, Galilée « imposera les deux caractéristiques fondamentales de la science moderne : la mathématisation et la mécanisation » (A. Diemer, H. Guillemin, 2012, p. 11). Comme il le signifie lui-même :

La philosophie est écrite dans ce très grand livre qui se tient constamment ouvert sous nos yeux, l'univers, et qui ne peut se comprendre que si l'on a préalablement appris à comprendre la langue et à en connaître les caractères employés pour l'écrire. Ce livre est écrit dans la langue mathématique, ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques, sans l'intermédiaire desquels il est impossible d'en comprendre humainement un seul mot, et sans lesquels on ne fait qu'errer vainement dans un labyrinthe obscur (Galilée, *Il Saggiatore*, cité par J-C. Boudenot, 2001, p. 17).

L'idée que les mathématiques permettent de décrire et comprendre le monde ou la réalité était déjà connue dans l'antiquité grecque avec les idéalistes mathématiciens que nous avons évoqués plus haut. Toutefois, Galilée attribue un autre rôle aux mathématiques différant de celui des idéalistes mathématiciens. Les mathématiques, selon Galilée, servent de langage et d'instruments (outils) pour mener des expériences empiriques. « Les mathématiques devinrent un instrument toujours plus essentiel des sciences physiques ; les résultats s'exprimèrent en chiffres et les évaluations qualitatives furent rejetées » (C. Ronan, 1988, p. 453). La démarche mathématique galiléenne s'éloigne de la spéculation métaphysique chère aux philosophes de l'antiquité.

Le deuxième postulat scientifique mis à l'honneur par les physiciens réalistes est le principe d'identité ou de non-contradiction : une chose reste unique et ne peut pas être à la fois elle-même et son contraire. La réalité ne saurait être contradictoire dans la vision des physiciens réalistes ; ce qui leur permettait d'avoir une vision claire et nette des choses ou des phénomènes qu'ils étudient. Le principe d'identité ou de non-contradiction est en corrélation avec le troisième postulat scientifique défendu par les physiciens réalistes. Il s'agit du principe du tiers exclu : la possibilité qu'il y ait deux propositions, soit l'une, soit l'autre et non une troisième proposition qui tient compte des deux propositions 1 et 2 en même temps. Par exemple, soit 1 : la proposition que la table existe, soit 2 : la proposition que la table n'existe pas. Mais il n'y a pas de troisième proposition, soit 3 : la table existe et n'existe pas. Avec le principe du "tiers exclu", la réalité nous "saute aux yeux", c'est-à-dire qu'elle se conçoit clairement sans contradiction. Les scientifiques admettaient ainsi qu'« il n'existe pas de troisième possibilité (...) Il est possible que nous ignorions laquelle des deux est vraie, mais dans la "réalité", seule l'une des deux est vraie » (W. Heisenberg, 1971, p. 241). Impossible donc dans la vision réaliste des scientifiques de prendre en compte une troisième possibilité, à savoir la superposition de deux états contraires pour représenter l'état d'un phénomène physique.

Le quatrième postulat scientifique du réalisme est celui de l'universalité ou du principe absolu : les mêmes lois mathématiques et physiques s'appliquent partout et sont dès lors universelles. Le temps est absolu et ne dépend donc pas des humeurs ou des croyances individuelles et même de la situation dans l'espace où l'on se trouve. Si, par exemple, deux observateurs, l'un au rez-de-chaussée d'un ascenseur et l'autre dans l'ascenseur en mouvement vers le haut de l'immeuble, devraient interpréter le temps d'après leurs horloges respectives, ils ne constateront en fonction du principe universel du temps, aucun décalage horaire. Le temps leur sera donc simultané et absolu¹. Les différents espaces dans lesquels les

1- Sur ce point, Albert Einstein, bien qu'il soit un physicien réaliste, ne partage pas la même approche de simultanéité et d'absoluité que défend la science classique. Voir sa théorie de la relativité restreinte et générale dans laquelle il pose les limites au temps absolu et à la gravitation de Newton.

deux observateurs ont été, n'ont pas du tout influencés le temps absolu affiché sur leurs horloges. Ainsi, d'après les propos de W. Heisenberg (2018, p. 53):

Sur le terrain de la physique newtonienne, où l'espace et le temps passent pour être complètement indépendants l'un de l'autre, puisque dans cette physique la vitesse relative d'un rayon lumineux par rapport à l'observateur doit nécessairement dépendre de l'état de vitesse de l'observateur.

Le temps et l'espace non seulement sont indépendant l'un de l'autre, mais le sont également des observateurs et de tout autre corps. Le temps continue, ainsi, à s'écouler uniformément dans les espaces différents. Le cinquième et dernier postulat scientifique du réalisme est celui de la séparabilité entre sujet et objet dans la connaissance du monde. Bien avant qu'il y ait intervention du sujet pour connaître la nature, celle-ci existait *a priori* en fonction des lois qui la régissaient. Ainsi, « la nature semblait se dérouler selon les lois dans l'espace et dans le temps ; en décrivant ce déroulement on peut faire abstraction de l'homme et de son intervention » (W. Heisenberg, 2000, p. 123). Il en découle que le monde existe réellement sans que l'homme n'intervienne forcément pour l'étudier.

Les différents postulats de la physique classique fondent ainsi l'assurance que le caractère manifeste des vérités scientifiques est établi sur la réalité. C'est toujours la définition traditionnelle de la vérité qui prime, c'est-à-dire cette adéquation sans détours de nos représentations de la réalité avec les faits. C'est en quelque sorte l'esprit optimiste cartésien et baconien qui gouverne la physique classique et ses principes : la vérité se donne dans son caractère manifeste en tant qu'elle se distingue nettement de l'erreur. Pour M. L. Lareymondie (2006, p. 28), « le monde de la physique est alors un monde macroscopique que l'on peut voir, toucher, déplacer, peser, etc., se manifestant par des entités qui sont clairement individualisées et divisibles par la pensée ». Aussi la physique classique a-t-elle toujours gardé un lien solide avec les intuitions des entités physiques ayant une position définie, localisable dans l'espace ou effectuant des mouvements précisément déterminables. Elle s'exerce sur la réalité dans la simple limite des relations expérimentales avec les phénomènes. C'est certainement cette option réaliste qui limite la marge de manœuvre

de la physique classique pour accéder à la réalité complexe, n'ayant pas de propriétés physiques qui se donnent à nos capacités sensorielles ou que l'on peut quantifier par nos instruments ordinaires de mesure. D'où la critique du réalisme par les théoriciens de l'École de Copenhague.

2. Des limites du réalisme à l'approche phénoméniste de la réalité

Au début du XXe siècle, avec l'avènement de la révolution quantique, la physique a connu de profonds changements dans ses principes et concepts les plus fondamentaux. L'interprétation de ces changements, par les physiciens de l'École de Copenhague, conduit à une mise en crise des principaux postulats de la science classique y compris la vision réaliste du monde.

2.1. Les limites du réalisme dans l'approche des phénomènes physiques

Le réalisme scientifique qui contribua au plein succès de la physique classique trouve ses limites dans l'interprétation de Copenhague de la physique quantique. Mais qu'est-ce que l'interprétation de Copenhague ? De façon générale, l'Interprétation de Copenhague ou École de Copenhague désigne l'interprétation de la mécanique quantique commune aux principaux membres fondateurs de cette école d'épistémologie à savoir Niels Bohr, Marx Born, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan et Paul Dirac. Malgré quelques divergences entre ces théoriciens, C. Chevalley (1985, p. 289) note que :

L'interprétation de Copenhague est un tout formé d'éléments indissociables, du moins pour ses fondateurs ; elle associe en effet un formalisme mathématique, développé principalement par Born, Jordan, et Dirac, une interprétation physique dite statique proposée par Born en 1927, une méthodologie, résumée dans l'expression de principe de réduction aux observables, et une sorte de clause de cohérence générale assurée par l'adjonction de la notion de complémentarité à la terminologie de la physique classique.

Cette définition, malgré son aspect empirique, a l'avantage de mettre en relief l'accord qui existait entre les membres du groupe au sujet de la nature des problèmes posés par la mécanique quantique.

La première critique du réalisme par l'École de Copenhague se situe au niveau de la séparation introduite par la science classique entre le sujet

connaissant (l'homme) et l'objet à connaître (le monde). W. Heisenberg (2000, p. 142) précise à ce sujet que :

L'ancienne division de l'univers en un déroulement objectif dans l'espace et le temps d'une part, en une âme qui reflète ce déroulement d'autre part, division correspondant à celle de Descartes en *res cogitans* et *res extensa*, n'est plus propre à servir de point de départ si l'on veut comprendre les sciences modernes de la nature.

La rupture d'avec l'approche traditionnelle de la séparation entre le sujet/homme et l'objet/phénomène est ce qui caractérise la structure fondamentale atomique. Dans la conception de la science classique inaugurée par Galilée, Descartes et Newton, le sujet était réduit au simple rôle de spectateur, car il n'avait aucune influence sur le monde qu'il observe. Autrement dit, la science classique postule l'existence d'un monde objectif indépendant de l'observateur ou du sujet connaissant. Cependant, les découvertes en science moderne et précisément dans la mécanique quantique, révèle les limites de l'approche de la physique classique dans sa manière de concevoir le monde. En effet, dans l'univers subatomique la séparabilité entre sujet et objet, non seulement, n'est plus possible mais n'a également aucun sens. Au contraire, pour mieux appréhender l'univers dans sa structure fondamentale, c'est-à-dire, au niveau subatomique, il faut accorder une place majeure au sujet/observateur dans le processus de la connaissance. De ce fait, l'on doit remplacer la division classique sujet/objet par la non-séparabilité entre sujet et objet ou l'interaction sujet-objet.

La deuxième critique de la doctrine réaliste dans l'interprétation de Copenhague, se situe au niveau de la certitude ou réalité absolue. À cause de la complexité des phénomènes au sein de l'atome, l'idée de l'existence d'une réalité absolue est difficilement soutenable. En fait, les objets quantiques ou phénomènes microscopiques se comportent « comme le malheureux chat de Schrödinger (...) qui était vivant et mort en même temps » (M. Frayn, 1999, p. 9). Il est alors difficile de voir dans quel état précis entre vivant et mort le chat se situe. La particule également n'a pas d'endroit ou d'état précis, « elle passait par deux fentes au même moment (...) la particule est ici, la particule est là » (M. Frayn, 1999, p. 28-29).

Dans le langage de l'École de Copenhague, on dit que la particule est dans une superposition d'états. Les études menées par l'interprétation de Copenhague conduisent ainsi à des paradoxes sur l'existence d'une réalité objective et absolue.

La troisième et dernière limite du réalisme se situe au niveau de la loi de causalité. D'après M. Bitbol (2016, p. 81), « en physique microscopique on ne puisse généralement prédire de façon certaine un phénomène en s'appuyant sur ses causes ». L'ancienne image "cause et effet" semble être en désaccord avec l'univers complexe des atomes. Si les physiciens dans une vieille habitude recherchent toujours les causes des événements ou phénomènes en cours dans l'univers, ils ne peuvent le faire dans l'infiniment petit parce qu'ils seront confrontés à d'énormes difficultés liées aux comportements des particules subatomiques. Dans le cas de l'atome de radium B par exemple, W. Heisenberg (2016, p. 208) souligne que :

Un atome de radium B isolé, nous ne pouvons pas – et c'est là que se manifeste effectivement une certaine défaillance de la loi de causalité – indiquer la cause qui fait qu'il se transforme précisément à cet instant-là et non pas plus tôt ou tard, qu'il émet l'électron dans cette direction-là et non pas dans telle autre. Et pour de nombreuses raisons, d'ailleurs, nous sommes persuadés qu'une telle cause n'existe pas.

Il en découle que le déroulement d'un phénomène dans l'univers quantique est coupé de sa cause. L'impossibilité d'identifier la cause d'un phénomène au niveau subatomique est une mise en crise du réalisme scientifique, qui ambitionnait d'expliquer les effets d'un phénomène à partir de sa cause. Les différentes limites du réalisme scientifique vont encourager les physiciens quantiques à chercher une autre interprétation possible des phénomènes physiques. Pour ce faire, ils vont quêter en direction de l'approche phénoméniste ou phénoménaliste des faits physiques.

2.2. Le recours au phénoménisme dans l'interprétation des faits

Le phénoménisme ou phénoménalisme est une doctrine philosophico-scientifique qui rejette la réalité de la substance et n'admet que l'existence des phénomènes et leurs images dans la pensée ou *idées*, dont les opérations se réduisent au jeu empirique de l'association, sans qu'il y

ait lieu de faire de l'esprit ou de la raison une faculté à part qui nous distinguerait radicalement des animaux. Il ressort de ce qui précède que le phénoménisme tient compte de l'expérience pour pouvoir décrire ce que c'est que le phénomène et que la réalité en elle-même sans l'expérience ne peut être saisie. Historiquement, nous pouvons trouver les arrière-fonds philosophiques du phénoménisme chez les philosophes empiristes tels que Locke, Berkeley, Hume, etc. Comme le souligne Heisenberg (1971, p. 93-94) :

À l'inverse de Descartes, Locke maintient que toute connaissance est finalement basée sur l'expérience (...) Le pas suivant fut franchi par Berkeley : si effectivement toute notre connaissance est tirée de la perception, déclarer que les choses existent réellement n'a pas de sens (...) Cette argumentation fut ensuite poussée jusqu'à l'extrême scepticisme par Hume, qui nia induction et causalité et en arriva donc à une conclusion qui détruirait la base de toute science empirique, si on la prenait au sérieux.

L'idée qui ressort de ce qui précède est qu'on ne peut connaître sans l'expérience. L'expérience est la base donc de la connaissance ; c'est à partir d'elle qu'on peut savoir si le phénomène existe ou n'existe pas. Sans l'expérience, la chose ou phénomène n'existerait pas réellement. C'est cette position phénoméniste que va alors adopter les partisans de l'interprétation de Copenhague. Le phénoménisme a des bases solides qui lui permettent de s'imposer en physique quantique. Il s'agit premièrement de l'indétermination et de la subjectivité et secondement de l'interaction sujet-objet. Pour ce qui est de l'indétermination et de la subjectivité dans l'interprétation des faits, l'être humain ne découvre pas un phénomène réel mais plutôt un phénomène adapté à ses procédés ou méthodes d'investigation. Le phénomène qu'il découvre est donc subjectif. En fait, ce qu'on pense connaître en science peut être perçu comme un simple produit de la perception individuelle et ne saurait être la réalité ou certitude absolue. Cette "approche subjective ou relationnelle" phénomène-être humain puise sa source philosophique dans la Grèce antique avec Protagoras et Pyrrhon. Comme le souligne Michel Bitbol (2016, p. 65) :

L'idée que notre science peut seulement accéder à des relations, et non pas aux hypothétiques déterminations absolues de ce qui *est*, remonte à un passé très an-

cient. Elle a été avancée, de Protagoras à Pyrrhon, comme argument sceptique apte à saper les fondements de la connaissance.

Pour ce qui est de l'interaction sujet-objet, Niels Bohr et Werner Heisenberg sont connus pour en être les plus grands défenseurs contemporains. Toutefois, historiquement bien avant eux et l'ensemble des théoriciens de l'École de Copenhague, on trouve les prémices philosophiques de cette conception des phénomènes chez Protagoras et Démocrite. D'après E. Schrödinger (1992, p. 71-72) :

La simple affirmation que toute observation dépend à la fois du sujet et de l'objet – lesquels sont inextricablement mêlés –, cette affirmation n'a rien de nouveau, elle est presque aussi vieille que la science elle-même. Bien que les vingt-quatre siècles qui nous séparent des deux grands savants d'Abdère, Protagoras et Démocrite, ne nous aient transmis que peu de documents à leur sujet et peu de citations de leurs œuvres, nous pouvons dire que tous deux, à leur manière, ont affirmé que toutes nos sensations, perceptions et observations ont une forte coloration personnelle, subjective, et ne nous font pas connaître la nature des choses en elles-mêmes.

Dans l'interprétation de Copenhague, le phénomène de la dualité onde-particule est en effet à l'origine du principe de complémentarité. Celui-ci postule qu'il n'est pas possible de déterminer un seul modèle, ou une seule image, capable de décrire la nature profonde des particules quantiques. Nous ne pouvons éviter de faire appel à une pluralité d'images pour décrire l'ensemble des informations dont nous disposons sur ces particules physiques. En particulier, les images corpusculaires et ondulatoires sont toutes deux nécessaires pour couvrir cet ensemble d'informations relatives à l'objet physique. Or, si elles sont nécessaires, elles sont aussi incompatibles car on ne peut être à la fois une onde et un corpuscule. Elles ont donc valeur de symbole, c'est-à-dire ici d'image seulement partiellement adéquate et dont la pertinence varie d'une situation expérimentale à l'autre. L'approche phénoméniste aboutit ainsi à des conclusions bouleversantes ou déroutantes aussi bien pour le sens commun que pour les scientifiques. Nous tenterons dans la prochaine section de dégager quelques implications épistémologiques de l'approche phénoméniste des objets et phénomènes physiques.

3. Les implications épistémologiques de la critique du réalisme

Parmi les nombreux débats soulevés par l'approche phénoméniste de l'interprétation quantique, nous mettrons l'accent sur deux problèmes majeurs. Il s'agit d'une part du problème du déterminisme scientifique et d'autre part, de la nature et du rôle de l'expérience dans les sciences physiques.

3.1. Le problème du déterminisme scientifique

Le principe du déterminisme occupe une place majeure dans la conception classique de la physique. C'est à partir de ce principe que la science parvient à idéaliser toutes les représentations du corps dans l'espace et permet ainsi aux savants de comprendre le fonctionnement de notre univers mécanique. D'après le principe déterministe, « tous les phénomènes naturels sont liés les uns aux autres par des relations invariables ou lois » (L.-M. Morfaux, 1999, p. 80). Cela signifie qu'il est possible de savoir d'avance le résultat d'une prédiction et que le hasard n'a pas sa place dans l'étude des phénomènes physiques. Cette doctrine scientifique très célèbre et constructive trouve sa forme la plus achevée sous la plume du mathématicien et physicien S. P. Laplace (1986, p. 32-33) pour qui :

Tous les événements, ceux mêmes qui par leur petitesse semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature, en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du soleil (...) Les événements actuels ont avec les précédents une liaison fondée sur le principe évident, qu'une chose ne peut pas commencer d'être, sans une cause qui la produise (...) Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre.

Il ressort de ce passage que notre monde fonctionne comme une grande machine reliée d'avec ses petites pièces qui la déterminent. Il est dès lors possible de comprendre la cause d'un événement en cours et de prédire son futur. Toutefois, le postulat déterministe est-il défendable à l'échelle des phénomènes microscopiques ?

À l'opposé des partisans du déterminisme, l'interprétation de Copenhague postule l'indétermination ou incertitude comme principe de base en physique quantique. Une « indétermination exactement conforme à celle que prévoient les relations de Heisenberg » (M. Bitbol,

2003, p. 2) disant, qu'il est impossible de déterminer la position et la vitesse de la particule atomique. Cette impossibilité conduit à une remise en cause du paradigme déterministe dans l'explication des phénomènes physiques. D'après l'interprétation de Copenhague, nous remarquons « une certaine défaillance de la loi de causalité » (W. Heisenberg, 2016, p. 208) dans l'infiniment petit c'est-à-dire l'univers microscopique. Cela, parce que les particules élémentaires dans l'atome sont imprévisibles ; nous ne connaissons pas exactement d'où proviennent ces particules. Nous ignorons de quel espace géographique sont-elles issues et de quelle manière se déplacent-elles. Il ressort de ce qui précède que d'après l'interprétation de Copenhague, la chose en soi est liée au monde physique ; certes liée, mais difficilement détectable et saisissable. La chose en soi paraît telle qu'elle est, parce que l'expérience en physique subatomique se base sur des statistiques (probabilités) ; elle n'est pas objective et constitue une difficulté pour le déterminisme. Ainsi, nous ne pourrions conclure au même résultat s'il arrivait que différents observateurs expérimentent un phénomène ou objet. Dans le cas du radium, Heisenberg (1990, p. 52) précise que c'est « arbitrairement qu'on (...) peut interpréter une expérience physique des méthodes de caractère tout à fait différent ». Il existe une interdépendance entre observateur et objet observé ; et ce constat nous conduit non seulement à remettre en doute le principe du déterminisme, mais aussi à renoncer à l'objet réel (chose en soi) en physique.

Dans le domaine du monde subatomique, les choses ne se comportent pas comme celles que nous observons dans notre monde. En effet, dans le monde des phénomènes observables, il est possible de déterminer le mouvement de certains objets dès lors que nous avons une certaine valeur de leurs conditions initiales. Cette conception déterministe caractérisant la mécanique newtonienne, n'est pas valide lorsqu'on essaye de l'appliquer aux objets quantiques. Dans le monde subatomique, les objets, par leur nature à la fois ondulatoire et corpusculaire, ne peuvent plus être localisés de façon rigoureuse. La preuve de cette affirmation réside dans les travaux que E. Schrödinger a fait en la matière. En fait, le physicien Autrichien Erwin Schrödinger a montré par expérience que, lorsqu'un électron est mis en collision contre un atome, il devient impossible de

déterminer la direction que cet électron empruntera après le choc. Schrödinger a montré en effet qu'après la collision, l'électron peut repartir dans n'importe quelle direction : d'où il établit une équation par laquelle on peut déterminer l'onde de choc. Cette fameuse équation de Schrödinger, détermine la probabilité avec laquelle nous pouvons retrouver l'électron dans une direction donnée plutôt que dans une autre.

La conception probabiliste et indéterministe de la science ne sera pas acceptée par A. Einstein. En effet, dans une lettre à Niels Bohr, le père de la physique de la relativité écrit ceci :

Nos espérances scientifiques nous ont conduit chacun aux antipodes de l'autre. Tu crois au Dieu qui joue aux dés, et moi à la seule valeur des lois dans un univers où quelque chose existe objectivement, que je cherche à saisir d'une manière sauvagement spéculative. [...]. Le grand succès de la théorie des quanta dès son début ne peut pas m'amener à croire à ce jeu de dés fondamental, bien que je sache que mes confrères plus jeunes voient là un effet de la fossilisation. On découvrira un jour laquelle de ces deux attitudes instinctives était la bonne. (Correspondance de A. Einstein à N. Bohr, rapporté par S. Bergio, 2002)

Esprit à la fois réaliste et empiriste dans son essence, Einstein n'a pas manqué, au nom du déterminisme, de renoncer à la conception probabiliste à laquelle la mécanique quantique semblait être attachée. Pour lui, une théorie physique digne de ce nom ne pouvait être probabiliste dans ses fondements. Cependant, malgré tous ses efforts, il ne réussit jamais à prouver que le principe d'incertitude était faux. Aujourd'hui nous constatons, qu'il y a une contradiction entre les principes de la physique microscopique, basés sur la mécanique quantique où le hasard semble jouer un rôle majeur, et les principes de la physique macroscopique, basés sur le postulat déterministe de la mécanique newtonienne.

3.2. La nature et le rôle de l'expérience dans la physique quantique

Depuis l'avènement de la physique classique au dix-septième siècle, l'expérience est vue comme un mécanisme qui permet d'attester le bien-fondé des connaissances scientifiques. Si les physiciens ont ainsi pour rôle d'étudier et de connaître les lois fondamentales de la nature, l'intérêt pour eux serait de se fier à l'expérience pour donner du crédit aux théories

qu'ils édifient. Newton en élaborant ses théories, s'est appuyé sur l'expérience pour justifier leurs valeurs et portées. Il fut un empiriste engagé à l'instar de « Francis Bacon (1561-1626) (...) le premier à soutenir le concept d'une expérience cruciale, qui peut décider la validité d'une hypothèse ou d'une théorie » (N. Sfetcu, 2020, p. 6). Toutefois, il s'avère que l'expérience au sens empirique du terme ne peut s'appliquer partout en science à cause de la difficulté d'approcher certains phénomènes telles que les particules élémentaires en mécanique quantique. Que faire alors pour tester et prouver les comportements des particules élémentaires ? Vu les limites de l'expérience empirique au sein de la structure atomique, les théoriciens de l'interprétation de Copenhague, proposent l'expérience de pensée ou expérience mathématique comme une démarche méthodologique pour essayer d'approcher les phénomènes quantiques.

L'expérience de pensée ou expérience mathématique est un procédé qui consiste à imaginer des événements physiques sans forcément recourir à l'expérience empirique ou instrumentale. La particularité de cette forme d'expérience consiste à discuter et à décrire l'événement sans qu'on l'ait empiriquement testé. Sa méthode est d'analyser la situation en fonction de la logique et des mathématiques. La logique et les mathématiques deviennent ainsi une base fondamentale des expériences de pensée. Malgré qu'il soit d'obédience réaliste, Einstein et ses collaborateurs (B. Podolsky et N. Rosen) se servaient beaucoup de cette forme d'expérience dans leurs travaux. Comme l'explique M. Bitbol (2003, p. 2) :

Einstein proposa une interprétation restrictive de la mécanique quantique à peine née, et s'en servit pour critiquer l'idée d'une limitation insurpassable de la détermination des couples de variables conjuguées (position et vitesse), conformément aux relations d'"incertitude" de Heisenberg.

Les arguments d'Einstein contre l'interprétation de Copenhague étaient de démontrer premièrement que deux particules qui sont nées au même moment dans un même système total, ne peuvent entrer en interaction. Étant séparées du système total pour d'autres destinations (sous-systèmes), elles y vont en conservant leurs propres éléments de réalité. Cette hypothèse mathématique qu'on appelle séparabilité ou divisibilité

« permet de parler séparément des éléments de réalité qui sont propres à l'un des deux sous-systèmes » (I. Nikseresht, 2005, p. 191). Pourtant, l'interprétation de Copenhague, sur la même base fondamentale des expériences de pensée va démontrer « les preuves d'indétermination des couples de variables conjuguées fondées sur l'hypothèse d'une perturbation des propriétés de chaque objet individuel » (M. Bitbol, 2003, p. 3). Cela signifie que c'est la mesure qui nous a permis de comprendre que les deux quantons (particules) sont en fait liés et qu'ils interagissent. Dès lors les deux particules, bien qu'éloignées, sont intrinsèquement liées sous l'influence de la mesure.

Les expériences de pensée, bien que n'attestant pas empiriquement les bienfondés d'un ou plusieurs faits, permettent aux savants de démontrer la portée, la pertinence et la cohérence des théories qu'ils défendent. L'expérience dans ce cadre, ne concerne pas que l'instrumentalisation ou les outils de mesure. En physique quantique, par exemple, l'expérience de pensée concerne à la fois certaines conditions où l'on ne peut observer empiriquement ou même mesurer le phénomène. La logique et les mathématiques deviennent ainsi l'ultime source ou solution pour donner des réponses testables et vérifiables. L'expérience empirique peut précéder l'expérience de pensée comme dans le cas où Max Planck découvre que « l'atome ne peut changer son énergie que par quanta discret » (W. Heisenberg, 1971, p. 18). Cela signifie que la matière se comporte de manière discontinue ou sous une forme d'agrégat ou paquet d'énergie connu « sous le nom de quantum élémentaire d'action, parce qu'elle était le produit d'une énergie par un temps » (M. Planck, 1993, p. 77). Il y a aussi des cas où c'est l'expérience de pensée ou mathématique qui précède l'expérience empirique en physique quantique comme dans le cas de l'explication des inégalités de J. S. Bell. Or, cette construction purement mathématique c'est-à-dire basée sur le seul jeu des enchaînements formels, a conduit à ce résultat surprenant de faire prévoir certains phénomènes physiques et astronomiques demeurés jusqu'alors inaperçus et que l'expérience a, en effet, bien confirmés. Le raisonnement mathématique acquiert donc une fécondité et une efficacité qui en fait plus qu'un simple outil : c'est l'outil mathématique qui finit par dicter ses indications aux expérimentateurs.

Conclusion

Le réalisme scientifique permet-il de connaître véritablement les phénomènes physiques ? À cette question, rappelons que la réalité physique descriptive et perceptible chez les penseurs et physiciens réalistes, est critiquée dans l'interprétation de Copenhague, qui recourt plutôt au phénoménalisme pour décrire les phénomènes physiques. Cette critique de la réalité ou du réalisme scientifique a des implications épistémologiques dont le problème du déterminisme scientifique et la nature de l'expérience dans la physique quantique. La science, dans l'Interprétation de Copenhague, n'est plus, au sens classique du terme, une discipline apte à nous révéler la réalité. Son rôle n'est pas de dire ce que la nature est réellement, mais plutôt de décrire ce que c'est que la nature en interaction ou en relation avec le sujet. Telle est la leçon épistémologique majeure à retenir au terme de notre discussion. Toutefois, il faut noter que l'Interprétation de Copenhague de la physique quantique ne clôt pas définitivement le débat du maintien ou non des postulats réalistes en physique. Mais, cette interprétation évite la croyance en un réalisme naïf qui croirait en un quasi-isomorphisme entre les phénomènes et les choses en soi.

Références bibliographiques

- BOUDENOT Jean-Claude, 2001, *Histoire de la physique et des physiciens : de Thalès au boson de Higgs*, Paris, Ellipses.
- DESCARTES René, 2000, *Discours de la méthode*, Paris, Librairie Générale Française.
- FRAYN Michael, 1999, *Copenhague*, trad. Jean-Marie Besset, Paris, Actes du Sud.
- HEISENBERG Werner, 1971, *Physique et philosophie*, trad. Jacqueline Hadamard, Paris, Albin Michel.
- HEISENBERG Werner, 1990, *Les principes physiques de la théorie des quanta*, trad. B. Champion et E. Hochard, Paris, Gauthiers-Villars.
- HEISENBERG Werner, 2000, *La nature dans la physique contemporaine*, trad. A. E. Leroy, Paris, Gallimard.
- HEISENBERG Werner, 2016, *La partie et le tout. Le monde de la physique atomique*, trad. Paul Kessler, Paris, Flammarion.

HEISENBERG Werner, 2018, *Le Manuscrit de 1942*, trad. Catherine Chevalley, Paris, Allia.

KANT Emmanuel, 2006, *Critique de la raison pure*, trad. Alain RENAUT, Paris, Flammarion.

LAPLACE Simon Pierre, 1986, *Essai philosophique sur les probabilités*, Paris, Christian Bourgois.

LAREYMONDIE Marc De Lacoste, 2006, *Une philosophie de la physique quantique. Essai sur la non-séparabilité et la cosmologie de A. N. Whitehead*, Paris, L'Harmattan.

LOCKE John, 2001, *Essai concernant l'entendement humain*, livre 1, Paris, Alive.

MORFAUX Louis-Marie, 1999, *Vocabulaire de la philosophie et des sciences humaines*, Paris, Armand Colin.

NIKSERESHT Iraj, 2005, *Physique quantique*, Paris, Ellipses.

PLANCK Max, 1993, *Initiation à la physique*, trad. J. du Plessis de Grenédan, Paris, Flammarion.

RONAN Colin, 1988, *Histoire mondiale des sciences*, Paris, Seuil.

SCHRODINGER Erwin, 1992, *Physique et représentation du monde*, Paris, Seuil.

Articles

BITBOL Michel, 2003, «PR (Paradoxe d'Einstein, Podolsky, et Rosen) », *Grand dictionnaire de la philosophie (M. Blay, ed)*, Larousse-CNRS.

EINSTEIN Albert, PODOLSKY Boris, ROSEN Nathan, 1935, « Can Quantum-Mechanical description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review*, vol. XLVII, pp. 777-7780. Traduction française « Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ? », vol. I, pp. 224-230, in Einstein, 1989, *Œuvres choisies 1, Quanta*, Paris, Seuil.

Webographie

BERGIA Silvo, 2002, « Einstein n'accepte pas la mécanique quantique », *Les génies de la science* No 11, <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/einstein-n-accepte-pas-la-mecanique-quantique-4714.php>, consulté le 25 mai 2022.

BITBOL Michel, 2016, « La mécanique quantique comme théorie essentiellement relationnelle », *Revue du Mauss, La Découverte*, 1, No 47, p. 65-86, <https://www.cairn.info/revue-du-mauss-2016-1-page-65-htm>, consulté le 23 janvier 2021.

CHEVALLEY Catherine, 1985, « Complémentarité et langage dans l'interprétation de Copenhague », *Revue d'histoire des sciences*, 38-3-4, https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1985_num_38_3_4007, p. 251-292, consulté le 10 juin 2022.

DIEMER Arnaud, GUILLEMIN Hervé, 2012, « La mathématisation et la mécanisation du monde », https://www.academia.edu/35652625/La_math%C3%A9matisation_et_la_m%C3%A9canisation_du_monde?email_work_card=title, consulté le 05-10-2020.

ESPINOZA Miguel, 2012, « La réalité ultimes : Atomes et relations substantielles », *Scripta Philosophiae Naturalis*, 1, p. 89-115 in https://www.academia.edu/4458256/La_R%C3%A9alit%C3%A9_ultime_atomes_et_relations_substantielles?email_work_card=title, consulté le 05 octobre 2020.

SFETCU Nicolae, 2020, « *épistémologie de la gravité expérimentale-Rationalité scientifique* », Collection Essais, Multimedia Publishing, disponible sur <https://www.setthing.com/fr/e-books/epistemologie-de-la-gravite-experimentale-rationalite-scientifique/>, consulté le 05 avril 2021.

Mise en page : LE PAPHYRUS Éditions
Achévé d'imprimer en Côte d'Ivoire
3^e trimestre 2022
Dépôt légal N° 14931