

“CONSTRUCTION D’OBJET” ET OBJECTIVITÉ EN PHYSIQUE QUANTIQUE¹

par

Michel Paty²

Résumé

Michel Paty: “Construction d’objet” et objectivité en physique quantique. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33** (126): 61-77, 2009. ISSN 0370-3908.

Le domaine de la physique quantique ne peut être approché qu’indirectement, à l’aide de constructions abstraites de concepts; ces derniers sont organisés en une théorie cohérente et puissante, qui paraît correspondre à la “nécessité des phénomènes”, c’est-à-dire à quelque chose d’objectif. Dans l’“interprétation de la mécanique quantique”, cette objectivité (dans un sens général) est admise, mais ce à quoi elle renvoie fait problème: s’agit-il de phénomènes donnés dans leur observation ou d’objets physiques réels (dont il faudrait alors préciser dans quel sens on l’entend)? On examine si ce débat peut être articulé sur celui entre construction ou objectivité posé de nos jours à la philosophie de la connaissance par les études sociales sur les sciences. Un élément important d’appréciation est fourni par l’examen de la nature de la correspondance entre les concepts théoriques et ce qu’ils désignent: dans quelle mesure la représentation, d’abord abstraite, par construction, devient-elle ensuite “directe”, “concrète”, “intuitive”, selon la connaissance phénoménale elle-même à laquelle elle en vient à correspondre?

Mots-clés: Abstrait, Concept, Concret, Construction, Études sociales, Formalisme mathématique, Interprétation, Objectivité, Objet physique, Observation, Phénomènes, Philosophie de la connaissance, Physique quantique, Propriétés, Réductionnisme anthropo-sociologique, Réel, Représentation (abstraite, concrète, directe, intuitive), Théorie physique.

¹Conferencia de posesión como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, el 7 de noviembre de 2007.

²Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7–Denis Diderot. Université Paris 7–Denis Diderot, Centre Javelot. 2, place Jussieu – F-75251 Paris–Cedex 05. Tél. 33 (0)144278644 (secr.: 46) – FAX 33 (0) 144278647. Cour. él. (e-mail): michel.paty@univ-paris.diderot.fr

Abstract

The domain of quantum physics can be attained at only indirectly, through abstract constructions of concepts; these last are organized into a coherent and powerful theory, that seems to correspond to the “necessity of the phenomena”, i.e to something objective. In the “interpretation of quantum mechanics”, objectivity (in a general sense) is admitted, but doubt is cast on to what it does refer: to phenomena given through their observation or to real physical objects (the meaning of which should be explicitly stated)? We examine whether this debate can be articulated with that between construction or objectivity set forth nowadays to philosophy of knowledge by the social studies of science. An important element of appreciation is provided by examining the nature of the correspondence between theoretical concepts and their signified: up to which degree does the theoretical representation, that is first by construction of an abstract character, become thereafter a “direct”, “concrete”, “intuitive” one, due to the phenomenal knowledge itself to which it comes to correspond?

Key words: Abstract, Concept, Concrete, Construction, Mathematical Formalism, Interpretation, Objectivity, Object (physical-), Observation, Phenomena, Philosophy of Knowledge, Physical Theory, Properties, Quantum Physics, Reductionism (anthropo-sociological-), Real, Representation (abstract -, concrete -, direct -, intuitive -, Social Studies.

Resumen

La aproximación del dominio de la física cuántica solamente puede ser indirecta, con la ayuda de construcciones abstractas de conceptos; esos están organizados en una teoría coherente y potente, la cual parece corresponder a la “necesidad de los fenómenos” es decir a algo objetivo (en un sentido general). Según la “interpretación de la mecánica cuántica”, tal objetividad es admitida, pero su referencia (quiero decir: eso a lo cual ella se refiere) es problemática: ¿son fenómenos dados en su observación, o son objetos físicos reales (que deben explicitarse en algún)? Examinamos aquí si ese debate puede situarse con relación al debate entre construcción u objetividad tal como se propone hoy, frente a la filosofía del conocimiento, por los estudios sociales sobre las ciencias. Un elemento importante de apreciación es fornecido por el examen de la naturaleza de la correspondencia entre los conceptos teóricos y lo que ellos apuntan: ¿en qué medida la representación, inicialmente abstracta, por construcción, se transforma después en “directa”, “concreta”, “intuitiva”, según el propio conocimiento fenomenal a que ella llega a corresponder?

Palabras clave: Abstracto, Concepto, Concreto, Construcción, Estudios sociales, Fenomenos, Filosofia del conocimiento, Fisica cuantica, Formalismo matematico, Interpretación, Objetividad, Objeto fisico, Observación, Propiedades, Reduccionismo antropo-sociologico, Real, Representación (abstracta, concreta, directa, intuitiva), Teoria fisica.

1. Introduction

La physique quantique donne assez communément, au public, aux philosophes, mais aussi aux physiciens eux-mêmes, l'impression d'être construite de toutes pièces par la pensée, voire par des dispositifs expérimentaux, plutôt que donnée par la nature; ou, du moins, plutôt que de porter directement sur elle, comme on conçoit en général que le font les autres théories de la physique, plus classiques. En mécanique quantique, on parle de “préparation d'états”, de “théorie de la

mesure”, d'intervention irréductible de l'observateur sur l'objet observé, etc.; en physique des particules et des champs quantiques, on insiste sur le côté “artificiel” et l'apparence de jeux de construction (mathématique) des particules fondamentales à partir de théories de groupes de symétries, de nombres quantiques ou du concept de “jauge”. Ainsi des quarks avec leurs étranges propriétés de charges électriques et baryoniques non entières, leur “confinement”, leur “liberté asymptotique”, leurs “saveurs” et leurs “couleurs” À s'en tenir aux expressions, inventées par les physiciens pour les besoins

de la cause, il pourrait sembler à première vue que ces élaborations théoriques correspondent à un jeu formel plutôt qu'à la description des phénomènes de la nature et des propriétés objectives (de propriétés d'objets) qui s'imposeraient naturellement. Mais, en vérité, ces constructions ne sont pas gratuites, comme on peut en juger par les expériences effectuées dans ce domaine, qui révèlent ou créent des phénomènes qu'elles permettent d'analyser et de caractériser de manière circonstanciée et précise. La formulation des concepts mentionnés résulte de ces analyses, et les expériences correspondent en quelque sorte à des réponses de la nature aux questions qui lui sont posées dans ces termes.

En outre, des problèmes d'interprétation se sont longtemps manifestés, qui posaient la question du rapport entre le formel, sous-entendu, mathématique ("fonctions d'état" définies sur des espaces mathématiques de Hilbert, grandeurs "observables" comme "opérateurs hermitiens non commutatifs" opérant sur de tels espaces, etc.) et le physique, sous bénéfice de s'entendre sur ce que ce dernier qualificatif signifie exactement: l'empirique, le "donné aux sens", le mesurable, le naturel (physis), donné dans une relation, et laquelle? (pour ne pas dire crûment le réel, relatif à un certain domaine). Il est entendu, certes, que les phénomènes sont approchés "indirectement", ils sont incomplètement donnés par l'observation ou la mesure, ils sont déterminés de manière seulement probabiliste, etc.

Mentionnons, parmi d'autres problèmes d'interprétation, celui de la nature de la théorie et de son objet (ce dernier étant supposé décrit par celle-là); celui des propriétés assignables ou non à des systèmes physiques; l'éventualité de compléter la théorie par des "variables cachées" susceptibles de rétablir le déterminisme classique; la possibilité de concevoir ou de récuser la "non-localité" (plus précisément, la "non-séparabilité locale") pour des sous-systèmes corrélés; et encore, le raccordement entre le domaine quantique et le domaine classique, qui correspond à des objets et propriétés d'objets de conception plus directe . . .

Cependant, tous les concepts qui caractérisent les phénomènes quantiques s'organisent en une théorie cohérente et puissante, qui paraît bien correspondre à la "nécessité des phénomènes", en sorte qu'ils ne sont pas si éloignés que cela de l'objectivité. De quelle manière caractériserait-on le mieux la méthode d'accès à la connaissance de ce domaine de la physique: par construction, ou selon l'objectivité? Comment ces deux modes se concilient-ils, dans le travail des physiciens, et dans la

mise en oeuvre des résultats obtenus? Voire, qu'en est-il, pour les conceptions épistémologiques correspondantes, constructivisme ou objectivisme? Quelle est la place de la théorie et de l'expérience, respectivement, dans ces deux perspectives? Et, enfin, que peut-on dire de la nature de la théorie d'un tel domaine: est-elle fondamentalement mathématique, et appliquée, ou physique à proprement parler? (Il faut alors, d'ailleurs, préciser ce que l'on entend par ce dernier terme, c'est-à-dire la particularité de concepts, et de systèmes de concepts, physiques).

Notons encore que l'on peut distinguer deux types de propositions, en physique, qui peuvent se situer différemment l'une de l'autre par rapport au "constructivisme": celles qui se rapportent à des modèles théoriques, qui "collent aux phénomènes", comme on dit (c'est-à-dire qui tentent de les suivre dans les détails), et celles qui expriment avant tout des propriétés fondamentales, qui se rattachent à des traits structurels de ces phénomènes à travers leur représentation, et qui sont de portée plus générale (propriétés rassemblées, par exemple, dans la formulation de principes physiques, tels que des principes de symétrie et d'invariance).

Le résultat de l'élaboration théorique reçoit pour les deux modes de pensée (celui par modèles, et celui théorique proprement dit), un statut de vérité différent (partiel et pragmatique pour le premier, holiste et universalisant, voire plus normatif, pour le second). On peut aussi se demander si le critère de l'adéquation entre la représentation théorique et ce qui est représenté (l'"objet physique réel") suffit à épuiser la notion de vérité.

Ces jalons préliminaires étant posés - comme autant d'interrogations -, venons-en à la question qu'il s'agit ici d'éclairer, sur "l'objectivité et le constructivisme". J'y distingue, en ce qui concerne le domaine scientifique dont je veux parler (la physique, et plus particulièrement, la physique quantique), trois aspects, que j'aborderai successivement. Le premier aspect est celui de savoir si les concepts scientifiques (pour nous, ici, ceux de la physique, et plus particulièrement ceux de la physique quantique) correspondent à une réalité objective, ou à quoi que ce soit que l'on puisse qualifier d'objectif. Cet aspect correspond au débat "traditionnel" des physiciens et des philosophes sur l'interprétation en physique quantique, l'objet du débat étant, précisément, de qualifier ce "quoi que ce soit": réalité physique à proprement parler, ou entité mixte

“physico-observationnelle”? Cet aspect porte directement sur ce que l’on peut effectivement rencontrer dans la pratique intellectuelle de ce champ disciplinaire, quant à la forme et au contenu des connaissances et, en définitive, à leur signification.

Le second aspect concerne les processus par lesquels cette représentation est obtenue, que l’on peut rassembler sous le qualificatif de “construction”. C’est une construction non seulement intellectuelle, mais aussi sociale - et historiens et philosophes parlent dans ce sens, depuis quelques années, de “constructivisme”. La question posée de l’“objectivité” d’une telle construction ne coïncide pas nécessairement avec celle de la question précédente, qui s’en tenait aux formes et aux contenus. En prenant en considération les processus, les pratiques effectives et les contextes, on fait intervenir d’autres éclairages qui révèlent un certain degré au moins de contingence de ces contenus de connaissance élaborés et construits. Cette contingence fait, pour certains, s’évanouir la pertinence d’une référence trans-historique ou trans-sociale pour ces représentations supposées porter sur la nature: à cette aune, la science ne serait que le reflet de sa propre activité (essentiellement sociale) et ne nous dirait rien sur le monde. Les scientifiques (et d’autres avec eux, qui savent distinguer raisonnement et sophisme) admettront difficilement une position aussi extrême, qui ne fait pas de différence entre les divers genres d’activité humaine, sans considération pour les significations correspondantes. Leur bon sens - celui-là même qui accompagne leur propre pratique et intelligence de leur science - leur fait refuser à juste titre ce réductionnisme anthropo-sociologique qui ignore les contenus de sens.

Ces aberrations écartées, il reste cependant que les éléments de contingence dus aux circonstances socio-historiques de la production des connaissances ne sauraient être ignorés ou sous-estimés. Leur prise en compte et la réflexion sur eux constitue le troisième aspect de la question ici posée sur l’objectivité. Cet aspect porte sur la valeur même de la connaissance comme efforts et comme contenus. Nous nous demanderons, en particulier, dans quelle mesure l’on peut encore parler d’“objectivité” pour une construction de représentation d’un “objet naturel” supposé, et même, visé, mais dont les matériaux et les modalités seraient contingents par nature. Nous serons amenés à discuter du sens exact que l’on peut donner, pour la physique (parmi les sciences), à l’idée de “construction d’objectivité”, et dans quelle

mesure elle correspond à une “construction d’objets” qui ne soit pas factice et illusoire.

2. Les concepts scientifiques (physiques, quantiques) correspondent-ils à une objectivité?

Les concepts de la physique et, plus généralement, les concepts scientifiques, correspondent-ils à quelque chose d’objectif? c’est-à-dire (mais est-ce à dire?) à une réalité objective? Et, secondairement, de quelle manière se tiennent-ils dans cette correspondance: de manière d’abord abstraite, certes, ce que tout le monde admet, mais qui devient ensuite (ou non?) “directe”, “concrète”, “intuitive” ... C’est ce qui est en discussion.

Prenons, d’abord, “abstraite”. **Einstein** voyait dans la théorie de la relativité générale la marque d’un degré d’abstraction des concepts et des théories plus élevé qu’antérieurement, d’une distance qui irait sans cesse plus grande entre la représentation théorique et les données empiriques. Cette distance (conséquence logique au bout de la critique de l’induction, de **Hume** à **Mach** ou **Poincaré**) obligeait à faire acte de création.³ Cependant, ces éléments initialement abstraits étaient ensuite l’objet d’une appropriation par la pensée, et devenaient par là, d’une certaine façon, concrets. Ce que **Paul Langevin**, qui voyait là une constante dans l’histoire des sciences, exprimait à sa manière en disant: “Le concret, c’est de l’abstrait rendu familier par l’usage”.⁴ Est-ce également le cas avec la physique quantique? Nous y reviendrons.

Considérons, ensuite, “directe”. Je l’entends au sens d’un enserrement de la description théorique qui adhère au plus juste à ce qu’elle décrit. A moins que ce ne soit l’inverse? Dans le premier cas, c’est le “donné”, d’origine empirique (mais pas seulement), qui gouverne le mouvement de l’élaboration d’une description théorique. Tel fut, effectivement, l’un des moments de la constitution de la théorie quantique, lorsque les phénomènes de physique atomique et du rayonnement révélèrent des caractères qui échappaient à la théorie (classique) disponible. Ces caractères firent l’objet d’une organisation théorique systématique avec la formulation (vers 1926) de la mécanique ondulatoire et quantique, comme cadre conceptuel et théorique, et ses prolongements dans la dynamique avec la théorie de la diffusion et la théorie quantique des champs. Le succès de ces formulations théoriques leur était donné par leur cohérence et par la confirmation de leurs premières prédictions par

³Sur cette réflexion d’**Einstein** affirmée à de multiples reprises, voir **Paty** [1993a], chapitre 9.

⁴**Langevin** [1934].

l'expérience. C'était, alors, la description théorique qui adhérerait au plus près aux caractères non classiques des phénomènes qu'elle se proposait de décrire.

Mais ensuite vient le moment (sans cesse renouvelé) de la mise à l'épreuve de la théorie ainsi constituée, et c'est alors le second cas qui est effectif, celui de la proposition inverse à celle que nous venons d'illustrer, si ce qui est décrit (l'"objet" de la description) se révèle très ajusté et comme moulé à sa description par la théorie. On doit alors considérer que l'objet, tel qu'il est décrit, est en fait donné dans une représentation théorique préalable aux expériences par lesquelles on s'efforce de le circonscrire. Des phénomènes, initialement non connus et non prévus antérieurement, et même impensables selon les canons des connaissances précédentes, résultent, par la logique de la forme, de l'arrangement théorique. Ce dernier aura révélé, en structurant conceptuellement les traits spécifiques indiqués (en mettant en forme les relations de concepts comme des relations entre les grandeurs correspondantes, d'expression mathématique), que leur cohérence en profondeur impliquait les phénomènes ainsi prédits et ensuite constatés.

Dit de cette manière, cela paraît être un aspect général des théories physiques, et non pas seulement de la théorie quantique. Mais la théorie quantique l'illustre à un bien plus haut degré que toute autre théorie physique connue, car il est possible de dire à son propos, toutes choses égales par ailleurs, en prenant les mots à la lettre, que ce qui est décrit (dans un ordre caractérisé de phénomènes) adhère au plus juste à sa description par la théorie. Par exemple que des particules quantiques "interfèrent avec elles-mêmes" selon l'expression de **Dirac** (1930), qu'elles sont indiscernables de toute autre identique à elles et qu'elles obéissent (pour cette raison même) à la "statistique quantique", qu'elles sont non-séparables localement, que leur comportement est gouverné par le "principe de superposition linéaire" de leurs fonctions d'état, etc., tous caractères constatés mais qui n'auraient pu être conçus et pensés sans la théorie, qui y oblige.

Cela (l'enserrement de l'objet par la théorie) paraît donc être le cas en physique quantique plus encore qu'avec aucune autre description théorique d'"objets" par la physique: mais c'est aussi que de tels "objets", s'il en est, se révèlent en physique quantique sous des modalités quelque peu surprenantes pour le sens commun, même celui des scientifiques, habitué à d'autres comportements. Cela peut éventuellement se dire encore: ces "objets" ont des "propriétés" surprenantes.

En vérité, pas si surprenantes que cela, puisqu'on peut les déduire rationnellement par la théorie: c'est à nous, donc, de "faire avec", en explicitant leur signification, en tirant le fil de leur caractère intelligible dont la théorie précisément nous assure, au prix, comme nous le verrons, de transformations de notre "intuition commune". Mais ce sur quoi nous voulions insister avec le début de la phrase précédente, c'est sur l'expression "ces" objets" ont des "propriétés", fussent celles-ci à première vue surprenantes.

Nous allons le voir, toute la question épistémologique fondamentale sur la mécanique quantique se ramène à celle sur la nature d'un objet et de ses propriétés. Il y a donc bien relation étroite, et "directe" dans ce sens, illustré par la prédictivité, entre la description et ce qu'elle décrit, c'est-à-dire son "objet", dans le sens logique et non ontologique du terme. Ce sens de "direct" évacue la signification vague qui est souvent attachée à cet adjectif en termes d'images ou d'analogies de forme: mais déjà l'évolution des idées scientifiques avait permis de dénoncer le caractère illusoire des apparences premières.

Après ce développement sur la modalité "directe" (ou non) de la description théorique, nous devons ensuite nous demander s'il est possible (ou non) de qualifier celle-ci de "concrète", après le moment de l'abstraction. Je l'entends au sens de la correspondance à des effets tangibles, occasionnés ou produits par ces "objets" (ce mot étant encore pris ici dans le sens relativement neutre d'"objets de la représentation"). La réponse ne paraît pas faire de doute, si l'on pense à toutes les réalisations obtenues, avec accroissement des connaissances, dans tous les domaines de la physique où la théorie quantique constitue le cadre de pensée conceptuel. Et, en premier lieu, la réalisation phénoménale de la prédiction théorique est bien la marque du "concret". Ce qui est concret, c'est le monde des phénomènes, et particulièrement la production de phénomènes.

Enfin, cette théorie est-elle "intuitive", ou du moins est-il possible de la concevoir et de la pratiquer comme telle? J'entends, par intuitive, que l'on dispose, par elle, d'une pénétration intellectuelle synthétique du contenu de signification (au sens de la physique, c'est-à-dire de la conception des phénomènes physiques ou des "systèmes physiques" qui les engendrent) de ce "concept-objet", ou que l'on acquiert, progressivement, cette pénétration. La réponse, ici encore, se trouve dans la réalité effective du travail des physiciens, c'est-à-dire dans leur pratique de la pensée des phénomènes de ce champ

disciplinaire: une pensée qui se rend effective en termes de phénomènes, une pensée qui s'éprouve dans les phénomènes à travers l'expérience (la synthèse étant ici la pensée du phénomène, qui rassemble et résume les propositions théoriques). La réponse à la question sur le caractère "intuitif" de la théorie est donc positive, comme pour les deux autres: nous y reviendrons.

Ces questions appartiennent au "débat quantique" bien connu (du moins, dont tout le monde a entendu parler, mais souvent sans en avoir une idée très précise et claire). Mais les réponses positives que j'ai mentionnées ne préjugent pas, pour l'instant, de la réponse à la question sur la "réalité physique objective" qui correspondrait aux concepts: on s'accordera sur l'"objectivité", et l'on discutera encore éventuellement sur la "réalité".

Dans leur pratique comme dans leurs convictions épistémologiques sur la physique, les physiciens du domaine quantique n'ont aucun doute sur l'objectivité de la connaissance qu'ils s'en donnent, ne serait-ce que par la reproductibilité des expériences, par les contrôles multipliés des résultats, par l'amplification des effets (par exemple: une fois découvertes, des "particules quantiques", d'abord rares, sont ensuite produites en faisceaux de haute intensité - des millions, voire des milliards d'individus - dont on contrôle à volonté les paramètres: faisceaux de neutrinos, "usines" à bosons intermédiaires ...)

La pratique des physiciens admet donc une objectivité sans que celle-ci soit, pour l'instant, nécessairement associée à un objet au sens strict. Mais qu'est-ce à dire? C'est une objectivité sans objet au sens habituel de la notion d'objet, c'est-à-dire d'une entité possédant des propriétés; ou encore, plus précisément, puisqu'il est question de physique, une objectivité sans objets physiques tels que les décrivent et les conçoivent les théories plus classiques ... On pourra alors, soit conclure qu'il n'y a plus d'objets, mais qu'il reste l'objectivité (mais on se demandera alors à quoi rapporter cette objectivité: aux procédures d'observation, par exemple, ou de production de phénomènes, sera-t-il

généralement répondu); soit déclarer que cette objectivité correspond encore à des "objets", mais selon une autre caractérisation théorique des objets, qui échapperait à la mécanique quantique, et qui nécessiterait de la réformer ou de la compléter. Ces deux réponses transcrivent celles des deux positions antagoniques principales du débat sur l'interprétation de la physique quantique tel qu'il était traditionnellement présenté jusque voici deux ou trois décennies.

L'enjeu philosophique fondamental de ce débat, axé autour des positions respectives de **Niels Bohr** et d'**Albert Einstein**, était celui du statut de la réalité physique, c'est-à-dire de la pertinence ou non, pour la nouvelle science qu'était la physique quantique, de la catégorie de pensée "réalité physique", généralement considérée comme relevant de l'"ontologie" (et rejetée avec la "métaphysique"). (Cette situation de fait a pu être parfois masquée sous les considérations relatives à la causalité et au déterminisme mises préférentiellement en avant par d'autres protagonistes. **Wolfgang Pauli** a été l'un des premiers commentateurs à souligner avec force que l'enjeu véritable du débat entre **Einstein** et **Bohr** était bien le réalisme).⁵

La première réponse, en termes de procédures d'observation, sous lesquelles s'évanouirait la notion de réalité physique, c'est-à-dire celle de système physique réel existant indépendamment de ses conditions d'observation (et même, concevable indépendamment de ces conditions⁶), correspond à la position connue comme étant celle de l'École de Copenhague (qui comporte en fait une certaine diversité de positions), et dont une forme atténuée récente est l'"anti-réalisme".⁷ La seconde, qui maintient la définition habituelle d'objet physique réel, estime que la mécanique quantique est une théorie incomplète, et elle comprend diverses directions pour concevoir une théorie complète: l'une, en termes de restauration du déterminisme par l'adjonction de variables cachées supplémentaires de type classique, avec **Louis de Broglie**, le "premier" **David Bohm**, **Jean-Pierre Vigié**, **Franco Selleri** ...⁸; une autre, en termes de maintien de la notion d'état physique réel pour des objets physiques individuels, localisés, et

⁵Voir son intervention dans la discussion entre **Einstein** et Max Born, publiée avec la correspondance entre ces derniers (**Einstein** & Born [1969]; voir **Paty** [à paraître, a]).

⁶Le choix de ces termes correspond à la formulation par **Einstein** de son exigence réaliste: toute la nuance (rarement aperçue) du réalisme critique se tient dans la distinction entre exister et concevoir (légitimement) l'existence: ce que nous pouvons dire n'échappe pas à l'espace de la pensée, mais se rapporte cependant à quelque chose qui est extérieur à celui-ci, le monde physique, la matière, en le caractérisant d'une manière précise, conceptuelle (cf. **Paty** [1988]).

⁷**Bohr** [1958], **Rosenfeld** [1979]. Sur l'anti-réalisme, voir **Fine** [1986], **van Frassen** [1991].

⁸**Bohm** [1952, 1980], **de Broglie** [1953], **Vigié** [1983], **Selleri** [2004].

de refondation théorique sur des concepts autres que les concepts "mécanico-quantiques", qui pourraient être obtenus par une voie indirecte, la mécanique quantique étant retrouvée à la limite classique: telle était la perspective revendiquée par **Einstein**.⁹

Bien que les positions en présence dans le débat sur l'interprétation de la physique quantique aient souvent été réduites aux deux directions indiquées, il est possible de concevoir une troisième éventualité, qui d'ailleurs s'avère exister de fait, comme nous le verrons: celle d'admettre sans restriction la théorie quantique en tant que théorie physique du domaine considéré, tout en approfondissant méta-théoriquement (en fait, épistémologiquement) les catégories de pensée qui la sous-tendent, notamment les notions mêmes d'objet physique et de propriété physique, en admettant qu'elles continuent d'avoir un sens - et même qu'elles sont nécessaires pour penser physiquement -, mais à la condition de se donner une nouvelle définition, élargie, de ces notions générales en tirant les leçons de la nouveauté des concepts et de la théorie quantique à cet égard.

Cette troisième position (ou plutôt, ce troisième groupe de positions), ne correspond pas toujours à une troisième réponse, qui serait unique, à la question sur l'objet et ses propriétés, car elle comprend dans ses variantes, aussi bien une direction philosophiquement sceptique ou indécise qu'une direction franchement réaliste (réaliste critique). Elle a moins fait parler d'elle parce qu'elle est plus récente (encore que des éléments en aient été suggérés antérieurement¹⁰), et parce qu'elle accepte la mécanique quantique comme théorie complète, tout en critiquant ou en rejetant ses interprétations philosophiques dominantes, observationalistes et non-réalistes; et encore, peut-être, parce qu'elle est soupçonnée (du moins pour ce qui est de la direction réaliste), de naïveté, en prenant pour argent comptant, c'est-à-dire pour physiques, des entités qui n'étaient jusqu'alors conçues que comme mathématiques, laissant dans l'ombre ce qui fait la différence entre une grandeur physique et une grandeur mathématique, ou s'abstenant de justifier ce qui pourrait les identifier, si c'est cela que ses partisans prétendent¹¹.

⁹**Einstein** [1948, 1949]. Voir **Paty** [1993, 1995, 2001].

¹⁰Par exemple : **Dirac** [1926 a et b], **Langevin** [1934].

¹¹Je rangerais dans cette catégorie, malgré des nuances parfois assez considérables, des conceptions qui vont d'un réalisme voilé "pour une objectivité faible" (**d'Espagnat**) à un réalisme de principe demandant une réinterprétation mais sans solution évidente en vue (**Bell**), et à un réalisme quantique " (les autres, avec encore des variantes) : **Bell** [1981], **Bunge** [1973], **d'Espagnat** [1994], **Lévy-Leblond** [1977], **Cini & Lévy-Leblond** [1990], **Omnès** [1994], **Paty** [1988, 1999, 200d, 2003k].

¹²Voir **Hacking** [1999].

¹³Pour autant que cette expression à la mode ait un sens ...

Arrêtons-nous un instant, avant de reprendre certaines des questions épistémologiques que nous avons rencontrées, notamment la dernière (sur le rapport des entités d'expression mathématique avec les phénomènes physiques), car elle me semble correspondre au problème épistémologique fondamental. Et reprenons vue, pendant cette pause, sur le problème posé en commençant: objectivité ou constructivisme?

Un résultat, du moins, est déjà clairement acquis, concernant le premier terme: quelle que soit la direction de leur propre interprétation épistémologique, les physiciens affirment (et réalisent) l'objectivité dans la connaissance de leur domaine. C'est un résultat que l'on peut, d'ailleurs, généraliser: il n'y a pas, aux yeux des physiciens, de physique sans objectivité, et satisfaire à l'objectivité est précisément le but de tout leur travail. La difficulté et les divergences de vue portent sur la possibilité de qualifier cette objectivité en termes d'objets (caractérisés par des propriétés).

Reste à voir le second terme: sinon le constructivisme, du moins la construction ...

3. Quel rapport y a-t-il entre le débat sur l'interprétation de la physique quantique et la dispute objectivité-constructivisme?

S'il y a un rapport entre le débat épistémologique sur la mécanique et la physique quantiques et la controverse diagnostiquée de nos jours, dans les débats sur la connaissance scientifique, surtout ceux suscités par les études sur la "construction sociale" des sciences¹², le moins qu'on puisse dire est que ce rapport n'est pas du tout évident et qu'il n'est pas nécessairement pertinent. Il semble même que les deux types de débats soient assez étrangers l'un à l'autre. Ce qui n'interdit pas (pensée dominante et se voulant hégémonique oblige) de forcer cette mise en rapport, aujourd'hui, en voyant dans le second la forme "post-moderne"¹³ du premier. Mais ceci n'irait pas sans déformation d'arguments et distorsions de raisonnements. Nous tenons déjà, en tout cas, un premier élément qui interdit l'identification entre les deux formes de débat: dans le débat quantique, et dans la pratique des physiciens, le constat d'objectivité est unanime.

D'un autre côté, la plupart des physiciens eux-mêmes ne s'effarouchent aucunement de qualifier des élaborations conceptuelles et théoriques comme celles de la physique quantique de constructions, mais c'est dans le sens de constructions intellectuelles. Cela est même, à leurs yeux, une nécessité de principe: il faut construire des représentations abstraites de ce domaine de la nature qui échappe à la prise des sens, quitte à les rendre ensuite concrètes en faisant en sorte qu'elles correspondent étroitement aux caractères des phénomènes physiques (tel fut d'ailleurs, déjà aux tout débuts, le sens des premières approches du domaine quantique à l'aide des probabilités conçues comme un outil mathématique)¹⁴.

Si l'on considère les réalisations, acquises ou entreprises, ce caractère de construction est tout à fait évident avec les théories des groupes de symétries telles qu'elles sont actuellement utilisées en physique fondamentale (par exemple, les symétries unitaires des particules élémentaires, ou les champs quantiques d'interactions de jauge unifiés ou en voie d'unification), mais le constat serait analogue si l'on remontait aux débuts de l'élaboration de la mécanique quantique elle-même (par exemple, la construction d'opérateurs pour exprimer les variables dynamiques, impulsion, énergie, moment angulaire, etc., à partir de générateurs infinitésimaux, de type classique). On dira, certes, que ce sont des constructions mathématiques, et non pas physiques, et on l'a dit, justement, atténuant par là-même la portée de la dimension constructive de ce travail de la pensée. Ce qui nous ramène à l'évocation des conceptions de l'École de Copenhague à ce sujet, pour laquelle ces constructions mathématiques sont purement instrumentales et auxiliaires pour la physique qui, elle, serait donnée dans l'expérience. Et pensée dans et par l'expérience aussi bien, d'ailleurs (et non pas seulement pensée en relation à l'expérience).

L'«École de Copenhague», représentant l'interprétation dominante (du moins à la belle époque de l'apparition de la mécanique quantique et de ses premières consolidations), laissait aux mathématiques les grandeurs mathématiques, abstraites et «formelles» comme les vecteurs ou fonctions d'état définis sur des espaces de Hilbert et leur principe de superposition, et les variables dynamiques exprimées par des opérateurs non-commutatifs agissant sur ces fonctions (et dénommés, pour les besoins de la cause, «observables»). A la physique revenait ce qui concerne l'observation, c'est-à-dire ce qui ressortait de la mesure, laquelle s'effectuait

nécessairement à l'aide d'appareillages dont les résultats étaient en fin de compte lus (parvenant aux sens) par l'intermédiaire de processus de la physique classique. Cette école ne concevait comme grandeurs physiques que celles qui pouvaient être mises en correspondance directe avec des résultats de mesure, autant dire, des grandeurs de type classique (les appareils de mesure étant de type classique, par définition). Il était donc sous-entendu que les grandeurs devaient être exprimées, dans cette perspective, comme des fonctions à valeurs numériques. La spécificité des phénomènes quantiques obligeait donc, selon cette vue, tout en gardant la référence à des grandeurs classiques (les seules dont on puisse parler, pour **Niels Bohr**), à ôter à celles-ci leur signification physique directe pour la description des phénomènes ou des «systèmes» quantiques. On ne pouvait pas atteindre ou décrire des «objets quantiques», mais seulement des effets de mesure sur de tels systèmes, rendus par des grandeurs classiques, qui seules accèdent aux données de la perception. Mais, peut-on se demander, n'est-ce pas là un effet d'illusion? Les grandeurs classiques elles-mêmes ne correspondaient pas, lorsqu'elles furent formulées dans l'élaboration de la physique classique, à une évidence des données des sens, et elles ont résulté de constructions intellectuelles qui étaient loin de paraître évidentes ou directement accordées aux expériences des sens.

Dans la conception de l'École de Copenhague, les grandeurs «mathématiques» du formalisme théorique ne pouvaient donc pas être conçues comme «directement» physiques: elles n'étaient rapportées aux phénomènes et aux grandeurs physiques que par le moyen de règles d'interprétation (telles que l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde ou du vecteur d'état, celle des grandeurs observées comme valeurs propres des opérateurs, l'énoncé du principe de superposition, la réduction effective, dans l'opération de mesure, du vecteur d'état à l'une seulement des composantes de la superposition linéaire qu'il constitue, etc.). Parmi ces règles, certaines correspondent à des définitions de la signification physique de grandeurs par leur mise en rapport avec des contenus physiques, et sont neutres philosophiquement: elles appartiennent à la théorie quantique dans le sens strict, et sont communément acceptées avec la mécanique quantique, indépendamment de toute autre interprétation. D'autres règles, par contre, expriment une conviction philosophique sur la connaissance, comme, par exemple, l'observationnalisme ou la complémentarité selon **Bohr**, et l'affirmation corrélatrice de

¹⁴Voir **Paty** [2002f].

la nécessité de recourir toujours à des concepts classiques, y compris dans le domaine quantique, où ils sont affectés de limitations de validité compensées par la considération de concepts ou grandeurs complémentaires; ou encore, la conception du vecteur d'état comme étant le catalogue des connaissances que l'on a d'un système et non la représentation théorique de son état physique.

Cependant, cette position philosophique, associée au second genre ("philosophique") de règles, apparaît limitée par une sorte de naturalisme, qui lui fait considérer de manière privilégiée la perception comme ayant un rôle direct dans l'accès à la connaissance. Une conception de la connaissance comme élaboration intellectuelle, dans le sens explicite de construction par l'entendement, permet, au contraire, de concevoir une approche plus abstraite et faite de manière indirecte dans le moment de la construction (ces deux adjectifs, abstraite et indirecte, ont cependant un sens relatif, comme nous l'avons vu), mais qui réussisse à intégrer dans un schème théorico-conceptuel de connaissance les éléments d'origine empirique donnés dans la perception. Des éléments d'origine empirique sont, certes, indispensables à toute connaissance physique, mais ils sont toujours repris dans la connaissance selon l'entendement, qui est celle de la compréhension, pour être transformés en concepts et grandeurs susceptibles d'être mis en relation à d'autres et d'être intelligibles.¹⁵ Nulle limitation dans leur forme n'est imposée a priori dans une telle conception, sinon d'être relationnelles, comme le sont de manière privilégiée les grandeurs mathématiques.

Paradoxalement, alors que la connaissance des phénomènes atomiques et infra-atomiques était apparue de prime abord nécessiter des démarches constructives éloignée des données empiriques immédiates (puisque le monde des atomes et des radiations, des quanta, échappe à la prise des sens), une sorte de prudence, d'inspiration empiriste, aura accompagné et marqué l'accumulation de ses succès sur le plan théorique. Comme si l'exigence d'objectivité et de rationalité pour la connaissance du domaine quantique avait eu comme contrepartie la méfiance (pour ne pas dire le rejet) à l'égard des constructions intellectuelles abstraites, effectuées selon les formes mathématiques. Celles-ci étaient, en l'occurrence, retenues au titre d'un "formalisme", certes puissant, mais en fin de compte auxiliaire.

Au lieu qu'une théorie physique, telle qu'on l'avait généralement conçue jusqu'alors, de la physique classique à la relativité générale, constituait l'instance même de l'intelligibilité du domaine phénoménal considéré. Cette idée n'aurait-elle vraiment plus aucune pertinence pour le domaine quantique? C'est ce que nous nous proposons de discuter maintenant, en nous interrogeant sur le genre de construction qu'est la théorie quantique.

4. En quel sens peut-on parler de construction?

Les concepts et les théories sont donc des constructions intellectuelles sur le mode de la pensée symbolique, caractéristique de la présence et de la place de l'homme dans la nature, moyen de sa compréhension de la nature et de la communication avec ses semblables. Il est donc à première vue raisonnable de considérer que ces constructions ne sont pas seulement celles de pensées individuelles, mais qu'elles ont une dimension sociale.

Depuis quelque temps l'idée de "construction sociale" des sciences est devenu l'un des chevaux de bataille d'une nouvelle socio-anthropologie des sciences préoccupée du comportement social des scientifiques en groupe, de leurs réseaux, de leurs stratégies de pouvoir, apparents notamment dans les modes de fonctionnement de la "big-science". Mais cet intérêt exclusif, qui prétend s'étendre à l'ensemble de l'histoire des sciences, se développe malheureusement au prix du délaissement et de l'effacement des aspects proprement intellectuels du mouvement de la connaissance. On nous parle, par exemple, de la "construction sociale des quarks"¹⁶ (ces particules quantiques fondamentales des théories dynamiques actuelles de la matière, en théorie quantique des champs), voire de "construction sociale" de la rationalité ou de la vérité elles-mêmes.¹⁷

Ces nouvelles doctrines s'intéressent assez peu au travail rationnel effectif des physiciens et à la perspective d'objectivité qui les guident, et qu'ils revendiquent. Pour le constructivisme social radical, les concepts et les théories des physiciens sont des artefacts construits socialement, qui ne doivent leur acceptation qu'au consensus des acteurs et des manipulateurs des réseaux, occupés à des jeux de pouvoir bien plutôt qu'à la préoccupation de savoir comment le monde est fait, but illusoire, et halo idéologique sécrété par leur milieu socio-culturel, pour justifier leur activité à leurs propres yeux et à ceux du reste de la société; et les chercheurs qui s'imaginent

¹⁵Un exemple parlant de cette connaissance à deux niveaux, l'un perceptif, l'autre intellectuel, est la différence entre l'espace représentatif et l'espace géométrique, décrite par **Poincaré** (**Poincaré** [1902], chap. 4).

¹⁶**Pickering** [1984].

¹⁷**Shapin** [1994].

travailler dans (et pour) l'objectivité, ne sont, en fait, que des agents à produire des constructions sociales donnant l'illusion de l'objectivité¹⁸... Le but et les mobiles qu'ils invoquent de préférence, à savoir la solution de problèmes pour la description ou la représentation, ou pis encore, l'explication, du monde phénoménal ou du monde réel, recouvriraient des activités de nature moins noble et beaucoup plus prosaïque.

D'autres perspectives plus équilibrées et respectueuses de la dimension intellectuelle de la pensée humaine sont heureusement possibles. Considérer la production des sciences du point de vue de la construction sociale présente assurément un intérêt, quand aux conditions effectives de la production des connaissances dans les sociétés, et à leur rapport aux autres activités humaines, comme elles inscrites dans l'histoire. Mais cela n'interdit pas de prêter aussi attention aux leçons de l'épistémologie, qui est le point de vue qui s'intéresse aux contenus de connaissance, et qui seul permet d'entrer dans l'intelligibilité de ces contenus. Tenir les deux ensemble, parce que la réalité effective de la production des connaissances dans la société et dans l'histoire l'exige, est précisément la position du grand (et regretté) sociologue **Pierre Bourdieu**, qui décrit, quant à lui, la tâche de la sociologie des sciences comme étant celle d'élucider les "conditions sociales ou socio-épistémiques de possibilité des connaissances scientifiques". Elle ne se substitue aucunement à la perspective de l'épistémologie, et les deux s'éclairent en fait mutuellement pour comprendre la connaissance comme le résultat d'une activité de l'homme, être éminemment social. Du point de vue de l'épistémologie de la construction rationnelle objective, les concepts scientifiques doivent leur légitimité à un processus de caractérisation rationnelle qu'il est possible de retracer ou de retrouver par l'analyse, tant des contextes socio-historiques et culturels, que des éléments cognitifs rapportés à leur intelligibilité, tels que les représentations conceptuelles et théoriques de tels phénomènes ou entités physiques, la signification des expériences en relation à ces schèmes théoriques, et la possibilité de les penser et de les réaliser techniquement. De très nombreux exemples, pris dans

l'histoire, ou aussi bien contemporains, pourraient être examinés dans cette perspective, de l'élaboration de la mécanique quantique à la découverte des courants neutres, ou à la mise en évidence des quarks ou des bosons intermédiaires (bientôt peut-être des bosons de **Brout, Englert et Higgs**)¹⁹.

Andrew Pickering a cru décrypter (dans son ouvrage mentionné) la "construction sociale des quarks", et réduire ainsi la fabrique des quarks à celle d'un "consensus" au bout de "négociations"²⁰. A tout prendre, il pourrait en dire autant à cette aune de la construction des quanta, le "confinement" et les derniers aspects de la "big science" en moins.

Les quanta et leurs "particules" (quantiques) identiques indiscernables (si peu familiers, si peu pensables initialement) ne sont pas moins construits que les quarks. Prenons donc un instant les quarks. Suivons les élaborations rationnelles qui les ont constitués en relation aux données empiriques sur les propriétés des particules élémentaires (hadroniques).

On distingue, en particulier, dans ces élaborations, telles qu'on peut les suivre dans leur déroulement²¹, deux temps, ou deux faces de leur mise au jour (ou de leur production conceptuelle). C'est d'abord une élaboration mathématique, qui implique la théorie des groupes de symétrie pour les grandeurs quantiques qui représentent les "propriétés" des particules (opérateurs des diverses "saveurs", isospin, étrangeté, etc.): de ce point de vue, les particules, ramenées à leurs nombres quantiques, sont constituées de quarks "mathématiques". Ce sont, ensuite, les résultats des expériences de diffusion pénétrante de particules (leptons, photons) sur d'autres (nucléons) qui mettent en évidence des centres durs de diffusion dans ces derniers, dont les propriétés en termes quantiques s'avèrent être celles des quarks précédents ("mathématiques"). D'où l'identification des deux, les quarks "mathématiques" (d'abord purement formels) et les quarks "physiques", d'abord seulement empiriques. On doit aussi faire état d'un troisième pas de la construction, où interviennent les théories de symétrie de jauge des champs d'interaction, qui incorporent les

¹⁸Cf., p. ex., **Latour** [1989]. Voir, pour des critiques de ces vues : **Gingras** [1995], **Shinn** [2000], **Bourdieu** [2001], **Paty** [2001b].

¹⁹**Paty** [2003], chap. 7, p. 116, 218.

²⁰**Pickering** [1984].

²¹**Paty** [1988], chapitre 9 ; **Paty** [2003], chapitre 7.

²²Notamment leur "liberté asymptotique" aux très petites distances, qui rend possible l'approche en terme de champs quantifiés même pour l'interaction forte, car elle peut dès lors être traitée en série de perturbation de la constante de couplage (celle-ci, étant petite aux très petites distances, peut être associée à une série convergente).

²³Théorie dynamique du champ quantique de la "couleur" (la "couleur" est un nombre quantique caractérisant les quarks), considéré comme le champ fondamental des interactions nucléaires fortes. La terminologie, fantaisiste et parfois gratuite, joue peut-être, prise

quarks, en raison de leurs propriétés²², à titre d'“objets-sources” des champs (quantiques) d'interaction: c'est la construction de la “chromodynamique quantique”²³.

Suivre à la trace les processus de ces élaborations, de ces constructions théoriques, telles qu'elles ont été proposées, mûries et testées, interdit de les réduire à de pures pratiques sociales, instrumentales, décisionnelles.

Ces pratiques, certes, se laissent constater, qui sont la marque de la dimension sociale de ces processus d'élaboration ou de construction, c'est-à-dire du contexte social dans lequel elles ont été produites, du milieu où s'est alimenté socialement et culturellement l'activité des chercheurs scientifiques, qui les ont formulées dans leur pensée (dans l'activité de leur pensée). De toute évidence, les idées ne naissent pas directement d'un “milieu social”, mais d'individus et de pensées singulières vivant dans ce milieu. Les “négociations” et persuasions qui font accepter plus ou moins vite tel énoncé de connaissance, loin d'abolir l'exigence d'intelligibilité selon la rationalité, qui est celle des pensées singulières, doivent en tenir compte au contraire en en faisant leur règle: elle y tient le rôle d'une condition de crédibilité, à laquelle les malfaçons ne résisteront pas longtemps. **Bourdieu** parle fort justement à ce propos de “condition socio-transcendantale”²⁴.

Ces idées ont été constituées intellectuellement en vue d'un sens, et ce qui leur donne ce sens, et qui guide la pensée de leurs inventeurs, c'est une chaîne de considérations rationnelles, ordonnées à la pensée rationnelle, selon les modalités de celle-ci (c'est-à-dire conceptuelles, théoriques, et liées à des données d'expérience), qui appartiennent à un champ disciplinaire donné, et qui constituent intellectuellement ce champ. De telles élaborations sont formées par des processus de pensée qui portent sur de la pensée symbolique et en même temps sur du concret de pensée, cette dernière expression désignant des contenus physiques, se rapportant à des objets ou des phénomènes effectivement attestés (et par cela même contrôlables) qui ne suivent pas les grés de la mode, ou des circonstances budgétaires, et ne dépendent pas du relâchement et des reconfigurations des “réseaux”. Les “objets de pensée” ainsi constitués sont

stables à travers les transformations sociales, comme à travers les discours rhétoriques ou autres prononcés sur eux.

Le champ disciplinaire conçu aussi comme champ social, en toute légitimité, comme le “champ scientifique” de **Pierre Bourdieu**²⁵, ne peut effacer ou nier l'aséité de ce “concret-de-pensée”: d'ailleurs, dans ce dernier cas, comme on vient de le dire, loin de le nier ou de l'ignorer, il le prend en compte dans l'étude des modalités de son inscription sociale, contribuant ainsi à éclairer les circonstances de sa formation ou de son fonctionnement. L'étude des comportements sociaux, conçue de cette manière (elle aussi rationnelle et scientifique), ne se propose pas de réduire à ces derniers la rationalité spécifique qui se donne cours dans la construction intellectuelle étudiée; au contraire, elle en prend acte tout en la résultant dans les conditions concrètes, historiques et sociales, de son élaboration ou de sa mise en oeuvre et en caractérisant les lignes de force qui l'accompagnent dans cet ordre. L'approche sociologique de l'activité scientifique peut alors à bon droit se présenter comme l'étude des “conditions sociales de possibilité” de telle connaissance scientifique²⁶, ou de tel type de rationalité, et loin de concurrencer ou de rejeter l'approche philosophique et épistémologique des objets intellectuels du champ, elle la complète en apportant cette dimension, éclairante à son niveau.

Cependant il est probable que des aspects contingents, liés à une culture particulière du groupe des spécialistes du domaine, ont joué un rôle non neutre dans cette élaboration, aussi bien pour la physique quantique que pour les quarks, ou les neutrinos, ou les courants neutres, etc., aboutissant à ce qu'une interprétation (ou une voie de recherche), plutôt qu'une autre, soit prédominante durant un certain temps. Il serait, assurément, intéressant d'étudier de tels effets, combinant ici l'analyse épistémologique et l'enquête sociologique.²⁷

5. Pratique de la pensée des concepts et intelligibilité (un aspect “socio-cognitif” de l'interprétation de la mécanique quantique)

Par exemple, la longue domination de l'interprétation observationnaliste de la mécanique quantique est

superficiellement, contre la considération du caractère objectif et “réel” de ces entités; d'un autre côté, elle rend directement manifeste qu'il s'agit de constructions.

²⁴**Bourdieu** [2001].

²⁵**Bourdieu** [1976, 2001].

²⁶Cette expression de **Bourdieu**, déjà évoquée plus haut, fait assez voir, par sa référence implicite à **Kant**, qu'elle ne nie pas la préoccupation pour le rationnel, mais la complète par la mise en contexte.

²⁷Ce serait un genre d'enquête dans la direction des études de **Peter Galison** (**Galison** [1987, 1997] ; voir l'analyse qui en est proposée dans **Darrigol** [1998]), et de celles de **Terry Shinn** sur la recherche-technologie” (**Shinn** [1993, 1999, 2000], **Joerges & Shinn** [2001]).

indéniablement liée à la pression d'une "école" (celle de **Bohr**, l'École dite "de Copenhague"), stratégiquement influente pour des raisons que l'on peut décrire.

Elle obtint le ralliement presque général de la "communauté" des physiciens quantiques, à quelques "dissidents" près, le plus irréductible d'entre eux étant **Einstein**, qui refusait de transiger sur la question de la réalité physique comme étant à ses yeux l'objet même de la théorie physique. (**Einstein** invoquait l'idée d'une "réalité physique" d'une manière qui dépassait le simple positionnement "métaphysique" ou "ontologique", en la rapportant à des critères cognitifs propres aux déterminations de la physique: selon lui, la physique décrit des "éléments de réalité physique" individuels existant indépendamment de leur observation²⁸).

Les physiciens quantiques ont ainsi développé, autour de **Niels Bohr**, une "orthodoxie" qui a eu, d'ailleurs, des avantages: elle leur a permis de ne pas se laisser distraire par des insatisfactions quant aux fondements, et à continuer d'aller de l'avant dans les constructions de la physique atomique et subatomique (nucléaire et subnucléaire). Mais cette orthodoxie n'a finalement pas été maintenue envers et contre tout, et les idées se sont décantées avec le temps et l'expérience acquise, dissociant, en particulier, les considérations liées à l'interprétation philosophique et les énoncés purement physiques. Ces derniers continuent, en dehors de toute obédience "orthodoxe", à participer du bagage de tout physicien quantique et constituent des "invariants", alors que les positions générales comme l'observationnalisme et la complémentarité dans le sens philosophique (bohrien) se sont plutôt effilochées au fil des décennies: il en subsiste aujourd'hui surtout des résidus fossilisés dans le vocabulaire ("incertitude", "indétermination", "observables" ...), qui ne sont plus désormais que les vestiges témoins des circonstances contingentes (de nature socio-culturelle) des élaborations initiales.

Mais ici, un effet intéressant s'est produit, qui nous permet d'estimer que, malgré les distorsions indiquées, d'origine sociale et culturelle, malgré les effets de "construction sociale", la pensée scientifique est mue par un entraînement bien plus déterminant qui permet de les dépasser, et dont la force tient au jeu de l'activité rationnelle et de la nature (entendue comme la physis, le monde extérieur à la pensée et à la société), avec entre

les deux l'exercice d'une pratique de la pensée physique, théorique et expérimentale, par les physiciens des laboratoires de recherche. C'est que, au bout du compte, en étant "allés de l'avant", ces physiciens en sont venus, pour ainsi dire naturellement, à penser les systèmes physiques dont ils traitent comme des "objets" (c'est-à-dire des entités physiques ayant des propriétés), alors qu'une telle "simplification" leur avait été initialement interdite.

S'ils le peuvent désormais, ce n'est pas en ayant transgressé l'interdit dans les bonnes raisons qu'il avait (ne pas réduire le quantique au classique), mais en l'ayant contourné: ils ont maintenu l'exigence de penser les systèmes quantiques différemment des objets classiques antérieurs, puisqu'ils n'ont pas cessé d'appliquer le mode d'approche théorique-quantique, qui n'est autre que celui de la théorie quantique, avec ses grandeurs (dites) mathématiques (vecteurs d'état, opérateurs, ...) portées de fait (sans que cela soit dit tout haut) au rang de concepts physique, et son "formalisme" propres. Et ce dernier apparaît n'être autre, en fin de compte, dans leur pensée effective, que la forme même de la théorie (dans le sens de théorie physique pour un champ de phénomènes). Ils ont intégré ce mode d'approche (théorique-quantique) à ce qu'ils conçoivent de fait, dans la pratique de leur travail, comme étant des "objets physiques" et des "propriétés" de tels objets, ces derniers prenant leur sens de la théorie elle-même²⁹. Il l'ont d'autant mieux intégré qu'ils ont conçu et réalisé leurs expériences en fonction de lui. Ils ont, pour ainsi dire, matérialisé (ou concrétisé), dans les dispositifs expérimentaux mêmes, les concepts et la théorie quantique, leur faisant prendre corps en réalisant ce que **Bachelard** appelait une "phénoménotéchnique"³⁰.

Faisons à cet égard deux remarques. La première, que l'intégration dont il est question s'est faite par assimilation et intériorisation. La seconde, qu'il est possible, ce faisant, d'affiner notre conception d'"objets" et de "propriétés" (par extension de sens, de type catégoriel). De fait, l'idée d'assimiler entretient un lien avec l'idée de remodeler des catégories (comme celles de grandeur physique, d'objet et de propriété physique)³¹.

Remarquons en outre, incidemment, que l'on pourrait étudier sous cet angle, dans une enquête en même

²⁸ **Paty** [à paraître, a].

²⁹ **Paty** [1999].

³⁰ **Bachelard** parlait de la "réalisation du rationnel dans l'expérience physique" (**Bachelard** [1934], p. 5, 13). Voir aussi **Bachelard** [1949].

³¹ Voir, à propos des "grandeurs physiques" en général, **Paty** [2001a]; et sur l'assimilation dans le sens indiqué: **Paty** [2005o].

temps épistémologique et sociologique, l'activité effective des chercheurs en physique atomique, nucléaire, ou des particules élémentaires, aussi bien des théoriciens "phénoménologiques" (proches de l'expérience) que des expérimentateurs travaillant sur l'analyse des données, ou concevant et réalisant les appareillages, les accélérateurs, les faisceaux de particules quantiques et les détecteurs. Et parmi ces physiciens, en particulier, ceux (physiciens atomistes et opticiens quantiques) qui s'attachent à "fabriquer" et à étudier physiquement les phénomènes les plus simples et les plus "fondamentaux" du point de vue des bases conceptuelles et théoriques de la physique quantique, c'est-à-dire ces phénomènes "non classiques" que sont l'interférence d'une particule quantique avec elle-même, la condensation de Bose-Einstein, la décohérence, etc., dont nous reparlerons un peu plus loin.

Cependant, les recherches existantes d'histoire sociale des sciences ou de socio-épistémologie sur des domaines liés à la physique quantique n'ont pas envisagé, à ma connaissance, cette perspective, et leurs auteurs ne se sont pas intéressés jusqu'ici à ce problème précis, que nous pouvons désigner comme: les implications épistémologiques de la pratique scientifique et sociale de la physique quantique. Ce serait là, pourtant, un lieu très original de rencontre et de confrontation entre les questions fondamentales de l'épistémologie (ici, l'épistémologie de la mécanique quantique) et l'étude socio-historique du travail des physiciens qui oeuvrent dans ces domaines. C'est un fait que cette rencontre de terrain n'a pas encore eu lieu, car les épistémologues du débat quantique restent cantonnés aux approches purement philosophiques, ou prétendues telles, tandis que les sociologues et socio-épistémologues s'intéressent à d'autres problèmes de "construction" de la physique contemporaine qu'à ceux relatifs à la mécanique quantique elle-même. Je voudrais signaler, toutefois, les récentes études originales d'**Olival Freire** et de ses élèves sur l'institutionnalisation de la dimension épistémologique de la physique dans le champ disciplinaire de la physique quantique, qui a entériné la légitimité du débat sur les fondements et l'interprétation³².

Ce qui, du moins, a eu lieu, c'est l'expérience, faite régulièrement par les physiciens dans leur travail de recherche, de ce que les concepts théoriques de la mécanique quantique constituent de fait le cadre de

pensée par lequel ils accèdent aux systèmes et aux phénomènes physiques (quantiques) qu'ils étudient. En pratiquant l'exercice de la pensée physique dans ce cadre, celui-ci leur est devenu comme une seconde nature, ou encore, ce cadre de pensée leur est devenu proprement "intuitif"; et il perdait, par là-même, toute nécessité d'être interprété à l'ancienne manière ("orthodoxe"), qui rapportait le quantique au classique, certes sans le réduire, mais en prenant le mode classique de penser et d'observer pour référence indépassable.

Autrement dit, ces physiciens ont inventé, ou codifié, ce faisant, une autre manière de penser ces systèmes quantiques comme objets, en les rendant concrets, directs, intuitifs, dans un sens autre que celui relatif aux objets des conceptions antérieures, ce sens ayant été insufflé dans leur pensée (rationnelle) en physique par leur pratique de la physique quantique (pratique théorique ou expérimentale, parfois les deux ensemble). Ils ont, sans le dire et l'explicitier, conçu autrement ce qu'est un objet physique, et ils le font fonctionner pratiquement, dans leur pensée, sans nécessairement en avoir une conscience explicite. Souvent, d'ailleurs, tout en contrevenant ainsi par leur "pensée pratique" aux règles de l'interprétation orthodoxe, ils en répètent certains éléments du credo. En d'autres termes, leur épistémologie exprimée n'est pas toujours conforme à la pratique de leur pensée conceptuelle et théorique du domaine quantique (et même, qu'ils me pardonnent d'oser un tel jugement, elle reste bien en-deçà).

Dans la nécessité où ils se trouvaient de formuler des objets correspondant à l'objectivité qu'ils poursuivaient, ils ont, non seulement exploré ce domaine avec fruit, révélant de nouvelles propriétés, objectives encore, de la matière physique, mais ils ont même fabriqué en laboratoire de tels objets, impensables sans la théorie quantique. Et, en particulier, les "objets" les plus simples à décrire dans le cadre de la théorie quantique, en ce qu'ils correspondent exactement aux caractéristiques dites "mathématiques" (transposées en "représentation de systèmes et de propriétés physiques") des entités théoriques de la mécanique quantique, comme le vecteur d'état pour représenter et décrire l'état physique même (cette "fonction d'onde sans onde" des débuts de la théorie) et les opérateurs non-commutatifs (matrices, différenciation, etc.) pour représenter et décrire les propriétés de tels systèmes et de leurs états.

³²Freire [1999, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007]. On doit mentionner également les efforts et les réalisations concernant l'enseignement de la mécanique quantique de base, qui tiennent compte des leçons du débat sur l'interprétation : Bohm [1951]. Diu, Cohen-Tannoudji & Lalôé [1973] ; Lévy-Leblond & Balibar [1984], etc.

Tels sont les systèmes quantiques individuels qui engendrent à eux seuls des phénomènes spécifiquement quantiques, naguère conçus seulement de manière statistique (diffraction et interférence avec eux-mêmes d'électrons, de photons, de neutrons, d'atomes, produits individuellement, interaction d'atomes individuels avec leur propre champ électromagnétique, etc.); ou les systèmes quantiques identiques indiscernables, symétriques ou antisymétriques par la permutation de deux d'entre eux, donnant la condensation de Bose-Einstein dans un cas, le principe d'exclusion de **Pauli** dans l'autre, avec des conséquences physiques considérables (constatées) dans les deux. Ces phénomènes, qui eussent été impensables sans la théorie quantique et ses grandeurs, nous font comme "toucher du doigt" le vecteur d'état (ou la fonction d'onde) par le système quantique "simple" correspondant, qui engendre directement ces effets.

En quelque sorte, il y a un enserrement de ce qui est physique (ces états de systèmes quantiques) par la description théorique avec ses grandeurs propres, qui sont l'expression de ses concepts. Ces concepts, intellectuellement construits, peuvent être vus, dans leur expression mathématique même, comme de nouveaux modes de description ou de qualification de la "réalité physique", en ce sens que les grandeurs qui les transcrivent fournissent, par leurs relations, la description exacte des propriétés de ces systèmes. On peut y voir une extension de sens de la notion de grandeur physique, au-delà du purement numérique et du directement mesurable, alors que la conception de **Bohr** interdisait par principe une telle vue (puisque'il n'y avait, pour lui, de concept physique que classique)³³.

A supposer que tel soit effectivement le cas, ce ne serait jamais qu'une règle du jeu qui change, dira-t-on. Par quoi nous voici ramenés au "construit social" et à sa rhétorique fermée! Mais ce serait voir les choses par le petit bout de la lorgnette, et supprimer toute l'épaisseur, du point de vue cognitif, de l'activité pratique de cette pensée, qui a intériorisé le changement (avec toujours le recours à l'expérience comme pierre de touche du possible pour le réel), mais aussi qui l'a rendu concret, par la production d'effets physiques, matériels, immédiatement intelligibles. Car il semble bien nécessaire, pour identifier et recevoir de la nouveauté (dans une découverte) et pour l'assimiler, que la rationalité, à l'oeuvre dans le travail de la pensée, s'élargisse pour lui faire une place et l'inclure, pour l'intégrer, alors que cette nouveauté qui se présente ainsi était auparavant impossible

à concevoir, dans les cadres de pensée antérieurs trop étroits.

Ces élargissements de rationalité auraient sans doute été impossibles en dehors de l'existence d'une "communauté", d'un groupe social d'individus échangeant des pensées (par l'éducation, la recherche, la communication, la transmission, etc.). Mais, dans ces élargissements du rationnel (des formes de rationalité), ce qui pénètre le rationnel pour le transformer ce n'est pas du social, dans le cas considéré ici de la physique; c'est plutôt quelque chose du monde extérieur, par le biais du donné empirique qui demandait à être compris, c'est-à-dire à être intégré rationnellement. Ce qui s'est opéré ici, d'un point de vue fondamental, c'est que du rationnel s'est nourri d'empirique pour se transformer en quelque chose qui reste encore fondamentalement du rationnel, un rationnel plus large, à la manière d'un organisme qui croît et se complexifie en préservant la constitution de son milieu interne, les tendances de sa structuration propre³⁴.

Il reste que, dans cette assimilation-transformation de quelque chose d'empiriquement donné en du rationnel directement intelligible, qui aboutit (ou devrait aboutir) à un changement de l'interprétation, correspondant à une autre pensée du contenu physique de la théorie, la pratique des physiciens, comme activité individuelle et sociale, joue assurément un rôle considérable, qu'il serait intéressant d'analyser plus avant. Mais il ne s'agit aucunement de réduction du contenu de pensée scientifique à du "construit social".

La faiblesse congénitale de l'explication des connaissances scientifiques par la "construction sociale", c'est de vouloir ignorer la spécificité du rationnel, la capacité d'auto-consistance et d'élargissement de la pensée rationnelle, la présence et la résistance du monde extérieur (le "réel", la "nature"), et l'objectivité des différents champs scientifiques. Autrement dit, le social n'est pas un dissolvant d'objectivité et de rationalité, mais le milieu ambiant au sein duquel de l'objectivité est produite par construction, à partir de l'expérience du monde, selon les modes du rationnel. Par rapport à cela, tout discours d'extériorité et de pure rhétorique est vain et ne construit, au mieux, que des sophismes.

³³Paty [1999, 2000d, 2001a, 2002f, 2003k].

³⁴Paty [2005o].

Références Bibliographiques

- [1] **Bachelard, Gaston**. [1934]. *Le nouvel esprit scientifique*, Alcan, Paris, 1934; 9^e éd., Presses Universitaires de France, Paris, 1966.
- [2] **Bachelard, Gaston**. [1938]. *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, Paris, 1938.
- [3] **Bachelard, Gaston**. [1949]. *Le rationalisme appliqué*, Presses Universitaires de France, Paris, 1949.
- [4] **Bell, John S.** [1987]. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987. 1949.
- [5] **Ben-Dov, Yoav** [1988]. *Versions de la mécanique quantique sans réduction de la fonction d'onde*, Thèse de doctorat, Université Paris-13, 1988.
- [6] **Bohm, David** [1951]. *Quantum Theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (USA), 1951.
- [7] **Bohm, David** [1952]. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variable s", *Physical Review* **85**, 1952, 166-179, 180-193; repris dans **Bohm** [1980].
- [8] **Bohm, David** [1980]. *Wholeness and the implicate order*, Routledge and Kegan Paul, London, 1980.
- [9] **Bohr, Niels** [1958]. *Atomic physics and human knowledge*, New York, Wiley, 1958; trad. fr. par **Edmond Bauer** et **Roland Omnès**, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gauthier-Villars; nlle éd. établie par **Catherine Chevalley**, Paris, Gallimard, 1991.
- [10] **Bourdieu, Pierre** [1976]. Le champ scientifique, *Actes de la recherche en sciences sociales*, n°2/3, 1976, 88-103.
- [11] **Bourdieu, Pierre** [2001]. *Science de la science et réflexivité*, Raison d'Agir, Paris, 2001.
- [12] **Broglie, Louis de** [1953a]. *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*, Gauthier-Villars, Paris, 1953.
- [13] **Buchwald, Zed** (ed.) [1995]. *Scientific Practice: Theories and Stories of Doing Physics*, Chicago University Press, Chicago, 1995.
- [14] **Bunge, Mario** [1973]. *Philosophy of physics*, Reidel, 1973; tr. fr., *Philosophie de la physique*, Paris, Seuil, 1975.
- [15] **Cini, Marcello & Lévy-Leblond, Jean-Marc** (eds.) [1990]. *Quantum theory without reduction*, Adam Hilger, 1990.
- [16] **Darrigol, Olivier** [1992]. *From c -Numbers to q -Numbers. The classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press, Berkeley, 1992.
- [17] **Darrigol, Olivier** [1998]. Toward a new topology of scientific practice, *Historical Studies in the Philosophical Sciences*, **28**, 1998 (n°2), 337-351.
- [18] **Dirac, Paul A. M.** [1926a]. Quantum mechanics and a preliminary investigation of the hydrogen atom, *Proceedings of the Royal Society of London*, **A 110**, 1926, 561-579; repr. partiel dans **Waerden** [1967], p. 417-427.
- [19] **Dirac, Paul A. M.** [1926b]. On quantum algebra, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **23**, 1926, 412-418.
- [20] **Dirac, Paul A. M.** [1930]. *The principles of quantum mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 1930. 4th ed., 1958. Trad. fr. par **Alexandre Proca & Jean Ullmo**, *Les principes de la mécanique quantique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1931.
- [21] **Diu, Bernard, Cohen-Tannoudji, Claude & Laloe, Franck** [1973]1997. *Mécanique quantique*, Paris, Hermann, 1973, 2 vols.
- [22] **Einstein, Albert** [1948]. Quantenmechanik und Wirklichkeit, *Dialectica* **2**, 1948, 35-39. Trad. fr., *Mécanique quantique et réalité*, in **Einstein** [1989], p. 244-249.
- [23] **Einstein, Albert** [1949]. Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume, in **Schilpp** [1949], p. 663-693.
- [24] **Einstein, Albert & Max Born** [1969]. *Briefwechsel 1916-1955*, Nymphenburger Verlagshandlung GmbH, München, 1969. Trad. fr. par **Pierre Leccia**, *Correspondance 1916-1955, commentée par Max Born*, Seuil, Paris, 1972.
- [25] **Einstein, Albert** [1989-1983]. *Oeuvres choisies*, trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud et al., édition sous la dir. de **Françoise Balibar**, Seuil/éd. du CNRS, Paris, 1989-1993, 6 vols.
- [26] **D'Espagnat, Bernard** [1994]. *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*, Fayard, Paris, 1994.
- [27] **Fine, Arthur** [1986]. *The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, Chicago, 1986.
- [28] **Frassen, Baas van** [1991]. *Quantum Mechanics, an empiricist view*, Oxford University Press, Oxford, 1991.
- [29] **Freire, Olival** [1999]. *David Bohm e a Controversia dos Quanta*, Coleção CLE, n° 27, Centro de Lógica e Epistemologia, Unicamp, Campinas (SP, Brasil), 1999.
- [30] **Freire, Olival**[2003]. A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950-1970, *Science & Education*, **12**, 2003, 573-58.
- [31] **Freire, Olival** [2004]. The Historical Roots of "Foundations of Quantum Physics" as a Field of Research (1950-1970), *Foundations of Physics*, **34**, 2004, 1741-1760.
- [32] **Freire, Olival** [2005]. Science and Exile: David Bohm, the cold war, and a new interpretation of Quantum Mechanics, *Historical Studies in the Physical Sciences*, **36**, 2005, 1-34.
- [33] **Freire, Olival** [2006]. Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965-1982), *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **37**, 2006, 577-616.
- [34] **Freire, Olival** [2007]. Orthodoxy and heterodoxy in the research on the foundation of quantum physics: E. P. Wigner's case, in **Boaventura de Souza Santos** (ed.), *Cognitive Justice in a Global World. Prudent Knowledges for a Decent Life*, LexingtonBooks, Rowman & Littlefield, Lanham, 2007, p. 203-209.
- [35] **Galison, Peter** [1987]. *How Experiment End*, Chicago University Press, Chicago, 1987.
- [36] **Galison, Peter**[1997]. *Image and Logic: a Material Culture of Microphysics*, Chicago University Press, Chicago, 1997.
- [37] **Gingras, Yves** [1993]. Constructing a Tokamak, *Social Studies of Science*, vol. **23**, n°1, 1993, pp. 5-36.
- [38] **Gingras, Yves** [1995]. Un air de radicalisme. Sur quelques tendances récentes en sociologie de la science et de la technologie, *Actes de la recherche en sciences sociales*, n°108, juin 1995, 3-17.
- [39] **Gingras, Yves** [2001]. Mathématisation et exclusion: Socio-analyse de la formation des cités savantes, in **Wunenburger, Jean-Jacques** (éd.), *Bachelard et l'épistémologie française*, coll. Débats philosophiques, PUF, Paris, 2001.

- [40] **Hacking, Ian** [1999]. *The social construction of what?*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1999.
- [41] **Jammer, Max** [1974]. *The philosophy of quantum mechanics. The interpretations of quantum mechanics in historical perspective*, Wiley and sons, New York, 1974.
- [42] **Joerges, Bernard & Shinn, Terry** (eds.) [2001]. *Instrumentation between science, state and industry*, Kluwer, Dordrecht, 2001.
- [43] **Langevin, Paul** [1934]. *La notion de corpuscules et d'atomes*, Hermann, Paris, 1934.
- [44] **Latour, Bruno** [1989]. *La science en action*, La Découverte, Paris, 1989.
- [45] **Leite Lopes, José & Paty, Michel** (eds.) [1977]. *Quantum Mechanics, a Half Century Later*, Reidel, Dordrecht, 1977.
- [46] **Levy-Leblond, Jean-Marc** [1977]. Towards a proper quantum theory, in **Leite Lopes & Paty** [1977], p. 172–205.
- [47] **Levy-Leblond, Jean-Marc & Balibar, Françoise** [1984]. *Quantique. Rudiments*, Ed. du CNRS-Interéditions, Paris, 1984.
- [48] **Mehra, Jagdish & Rechenberg, Helmut** [1982]. *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 4, Parts 1 and 2, Springer-Verlag, New-York, Berlin, 1992.
- [49] **Omnès, Roland** [1994]. *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, 1994.
- [50] **Paty, Michel** [1988]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.
- [51] **Paty, Michel** [1993a]. *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, 1993.
- [52] **Paty, Michel** [1993b]. Sur les variables cachées de la mécanique quantique: Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie, *La Pensée*, n° 292, mars-avril 1993, 93–116.
- [53] **Paty, Michel** [1995]. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics, *Foundations of Physics* **25**, 1995, n°1 (january), 183–204.
- [54] **Paty, Michel** [1999]. Are quantum systems physical objects with physical properties?, *European Journal of Physics* **20**, 1999 (november), 373–388.
- [55] **Paty, Michel** [2000b]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de Philosophie*, n° 212, 2–2000, 17–60.
- [56] **Paty, Michel** [2000d]. The quantum and the classical domains as provisional parallel coexistents, *Synthese* (Kluwer, Dordrecht/Boston), **125**, n° 1–2, oct.-nov. 2000, 179–200. (In **French, Steven; Krause, Décio; Doria, Francisco** (eds.), *In honour of Newton da Costa, on the occasion of his seventieth birthday*).
- [57] **Paty, Michel** [2001a]. La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique, in **Espinoza, M.** (éd.), *Deuxième Journée de Philosophie des Sciences Jean Largeault* (Paris, mai 1999), L'Harmattan, Paris, 2001, sous presse. Engl. transl.: *The idea of quantity at the origin of the legitimacy of mathematization in physics*, in **Gould, Carol** (ed.), *Constructivism and Practice: Towards a Historical Epistemology*, Rowman & Littlefield, Lanham (Md.,USA), 2003, p. 109–135.
- [58] **Paty, Michel** [2001b]. Uma visão antropológica do conhecimento científico (resenha de "Bruno Latour, *Ciência em Ação. Como seguir cientistas e engenheiros sociedade afora*, São Paulo, Editora Unesp"), *Ciência Hoje* (São Paulo, Br), vol. **28**, n°168, janeiro-fevereiro de 2001, 68–69.
- [59] **Paty, Michel** [2001c]. Intelligibilité et historicité (Science, rationalité, histoire), in **Saldaña, Juan José** (ed.), *Science and Cultural Diversity. Filling a Gap in the History of Science*, Cuadernos de Quipu 5, México, 2001, p. 59–95.
- [60] **Paty, Michel** [2002f]. La physique quantique ou l'entraînement de la forme mathématique sur la pensée physique, in **Mataix, Carmen & Rivadulla, Andrés** (eds.), *Física cuantica y realidad. Quantum physics and reality*, Editorial Complutense, Madrid, 2002, p. 97–134.
- [61] **Paty, Michel** [2003k]. The concept of quantum state: new views on old phenomena, in **Ashtekar, Abhay; Cohen, Robert S.; Howard, Don; Renn, Jürgen; Sarkar, Sahotra & Shimony, Abner** (eds.), *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics: Festschrift in Honor of John Stachel*, Boston Studies in the Philosophy and History of Science, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, p. 451–478.
- [62] **Paty, Michel** [2005d]. The problem of the physical interpretation of theoretical quantities and the intelligibility of the quantum world, in **Debru, Claude & Paty, Michel** (éds.), *Changes in interpretation and conceptual contents. Changements dans l'interprétation et contenus conceptuels*, in **Saldaña, Juan José** (ed.), *Science and Cultural Diversity*. Proceedings of the xxist International Congress of History of Science (Mexico, 2001), Universidad Autónoma de México & Sociedad Mexicana de Historia de la Ciencia y de la Tecnología, CD-Rom, México, 2005, vol. 37, p. 2774–2793.
- [63] **Paty, Michel** [2005o]. Des Fondements vers l'avant. Sur la rationalité des mathématiques et des sciences formalisées, *Philosophia Scientiae* (Univ. Nancy 2/Kimé, Paris), **9** (2), 2005, 109–130.
- [64] **Paty, Michel** [à paraître, a]. Einstein, les quanta et le réel (critique et construction théorique), à paraître.
- [65] **Paty, Michel** [en préparation]. La connaissance scientifique comme pensée symbolique.
- [66] **Pickering, Andrew** [1984]. *Constructing Quarks. A Sociological History of Particle Physics*, Edinburgh University Press, Edinburgh, 1984.
- [67] **Poincaré, Henri** [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, 1902.
- [68] **Rosenfeld, Léon** [1979]. *Selected papers*, edited by **Robert S. Cohen & John Stachel**, Reidel, Dordrecht, 1979.
- [69] **Schilpp, Paul-Arthur** [1949]. *Albert Einstein: philosopher-scientist*, The Library of Living Philosophers, Open Court, Lassalle (Ill.), 1949. Ré-ed. 1970.
- [70] **Selleri, Franco** [2007]. *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [71] **Shapin, Steven** [1994]. *A Social History of Truth. Civility and Science in Seventeenth Century England*, University of Chicago Press, Chicago, 1994.
- [72] **Shinn, Terry** [1993]. The Bellevue grand électroaimant, 1900–1940. Birth of a research-technology community, *Historical Studies in the Physical Sciences*, **24** (1) 1993, 157–187.
- [73] **Shinn, Terry** [1999]. Change or mutation? Reflections on the foundations of contemporary science, *Social Science Information* **38** (n°1, March), 149–176.

- [74] **Shinn, Terry** [2000]. Formes de division du travail scientifique et convergences intellectuelles. La recherche technico-instrumentale, *Revue Française de Sociologie* **41** (3), 447–473.
- [75] **Vigier, Jean–Pierre** [1983]. Le Débat Bohr-Einstein, in **Bitsakis, Eftichios** (ed.), *The Concept of Physical Reality*, Zacharopoulos, Athens, 1983, p. 51–109.
- [76] **Waerden, B. L. van der** (ed.) [1967]. *Sources of quantum mechanics*, North Holland, Amsterdam, 1967.
- [77] **Wheeler, John A. & Zurek, Wojcieh H.** (eds.) [1983]. *Quantum theory of measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.

Recibido: noviembre 26 de 2008

Aprobado: febrero 24 de 2009