

in Kragh, Helge ; Vanpaemel, Geert & Marage, Pierre (eds), *History of Modern Physics. Proceedings of the XXth International Congress of History of Science, Liège, 20-26 July 1997*, vol. XIV, Collection de Travaux de l'Académie Internationale d'Histoire des Sciences, Brepols, Liège, 2002, p. 261-273.

Physique quantique et causalité selon Bohm - Analyse d'un cas d'accueil défavorable

*OLIVAL FREIRE JR. *, MICHEL PATY**, ALBERTO LUIZ DA ROCHA BARROS****

** IF – UFBA – Salvador, Brésil*

*** EQUIPE REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris, Paris, France*

**** IF - USP, São Paulo, Brésil. Décédé le 30.1.1999*

Introduction.- David Bohm et le réveil des variables cachées.- L'accueil de l'interprétation causale : la controverse sur le terrain philosophique.- La controverse sur le terrain scientifique.- Les adhésions au programme causal .- Einstein, Feynman et d'autres.- Les développements du programme causal.- Conclusion. L'absence de résultats nouveaux.

Introduction

David Bohm a proposé, au début des années cinquante, de réinterpréter la physique quantique en retrouvant une forme de causalité analogue à celle de la physique classique. Cette proposition théorique, l'activité scientifique de David Bohm et des chercheurs qui l'ont soutenu dans sa tentative, ainsi que l'accueil qu'elle a reçu au sein de la communauté des physiciens posent des questions intéressantes du point de vue de l'histoire des sciences. Pourquoi ces travaux ont-ils reçu un accueil aussi défavorable ? Quels ont été les critères effectifs de choix entre des propositions rivales ? Les avis sur ces questions sont partagés, comme nous le verrons. Nous nous sommes intéressés, dans ce travail, aux aspects scientifiques aussi bien que culturels, dans le sens le plus large, de cet épisode de l'histoire de la physique quantique. Les résultats de notre analyse nous amènent à conclure que cet accueil défavorable s'explique par des raisons strictement scientifiques, à savoir l'absence de résultats nouveaux, capables d'attirer l'attention de l'ensemble de la communauté des physiciens et d'obtenir l'adhésion d'une partie significative d'entre eux. Il sera intéressant de noter, cependant, que l'intérêt effectif de ces recherches "hétérodoxes" dépasse ce résultat négatif ou ce constat d'échec, car des éléments de la théorie de Bohm ont servi à certains approfondissements ultérieurs de l'interprétation de la physique quantique.

David Bohm et le réveil des variables cachées

Nous n'entrerons pas dans les détails techniques du modèle théorique élaboré par Bohm dans son article pionnier de 1952.¹ On peut aujourd'hui trouver ces détails et ceux concernant d'autres modèles de variables cachées dans divers ouvrages.² En utilisant ce modèle pour étudier certains systèmes simples, Bohm parvient aux mêmes résultats déjà obtenus par la physique quantique non-relativiste, mais cela lui permet une nouvelle interprétation de la physique quantique.

L'analyse de ce travail de Bohm suscite quelques remarques d'ordre plus général. En premier lieu, le modèle développé s'inscrit dans un cadre épistémologique entièrement étranger à celui de l'interprétation de la complémentarité. Ce n'est pas un hasard : l'objectif de Bohm était précisément d'obtenir une nouvelle interprétation, qui soit à la fois équivalente, du point de vue des résultats, à la physique quantique et capable de rétablir certaines idées du cadre conceptuel de la physique classique. Dans le contexte des débats suscités par son travail, *causal* fut presque toujours synonyme de *déterministe*, au sens du déterminisme de la mécanique classique, mais il ne s'agissait pas pour autant de "récupérer" tout le cadre conceptuel de la

physique classique, auquel le “potentiel quantique” qu’il introduit dans son travail était complètement étranger.

En second lieu, Bohm présente comme l’un des avantages de sa tentative la possibilité d’assouplir le modèle originel, tout en restant dans le même cadre conceptuel, pour faire front aux difficultés auxquelles se heurtait la physique théorique à cette époque. Si l’on prend en considération le contexte de la physique au début des années cinquante, l’inadéquation notée par Bohm est associée à trois problèmes : les quantités infinies qui apparaissent quand on quantifie le rayonnement électromagnétique, la quantification de l’interaction nucléaire et les nouvelles particules subatomiques qui venaient d’être découvertes depuis quelques années (mésons π , particules étranges, résonances). Selon lui, la nouvelle approche pouvait s’avérer utile sur ces plans, par exemple moyennant une extension du modèle original. On pouvait penser que le nouvel outillage conceptuel de son approche possède une rôle heuristique, confère un avantage opératoire. C’est donc dans un sens assez large que nous entendrons l’expression “résultats nouveaux” dans notre analyse des démarches des défenseurs du programme causal.

En troisième lieu, comme J.S. Bell le ferait remarquer une dizaine d’années plus tard, le modèle proposé est autant non-local que la théorie quantique dans son formalisme usuel.³ Le potentiel quantique de la théorie de Bohm dépend de l’ensemble des variables des sous-systèmes qui composent le système étudié, de sorte qu’une perturbation survenue dans l’un de ces sous-systèmes affecte immédiatement les autres sous-systèmes. Dans les termes de Bohm, cette perturbation se propagerait instantanément à tous les composants du système : formulée ainsi, cette propriété reste problématique. Mais on peut la formuler autrement, avec l’inséparabilité quantique à laquelle elle tient : la corrélation a lieu, non par propagation instantanée, mais parce que ces sous-systèmes (et leurs fonctions d’état) sont inséparables, ne formant qu’un unique système descriptible par la mécanique quantique. Soulignons enfin que cette propriété du modèle de Bohm lui a permis précisément de survivre aux expériences de test des “inégalités de Bell”, au titre d’interprétation compatible, tout comme celle de la complémentarité, puisque la propriété soumise au test était la non-localité (ou non-séparabilité locale).

L’accueil de l’interprétation causale : la controverse sur le terrain philosophique⁴

Il est possible de classer l’ensemble des réponses faites à la proposition de Bohm (qui est aussi un programme), selon quatre groupes à peu près homogènes : l’appui épistémologique, la critique épistémologique, la critique concernant la consistance physique, et, enfin l’adhésion. Cette classification, utile, n’épuise pas la diversité des réponses au programme causal, car il existe d’autres réponses qui n’entrent pas dans ce schème.

E. Schatzmann⁵ et H. Freistadt⁶ ont soutenu la proposition de Bohm de la manière que nous avons appelée appui épistémologique. Ils ne se prononcent, en effet, dans leurs écrits, que de ce point de vue, sans analyser les détails techniques, mais en valorisant les caractéristiques épistémologiques du modèle, à savoir le rétablissement du déterminisme, ainsi que la position matérialiste qui se tenait aux prémisses philosophiques de la démarche théorique de Bohm. Ils étaient eux-mêmes marxistes, et leurs articles sont parus dans des revues culturelles de cette tendance, non spécialisées dans les problèmes scientifiques, et reflétant les débats de l’époque. La critique de la complémentarité, déclenchée en Union Soviétique à partir de la fin des années quarante, s’inscrit dans le cadre de ce que les historiens ont dénommé *jdánovisme*, une période que Graham a qualifiée comme étant celle de l’exil de la complémentarité en URSS.⁷

Les considérations qui appartiennent à la rubrique des “critiques épistémologiques” de notre classification sont de nature semblable aux précédentes en ce qu’elles mettent l’accent sur les aspects épistémologiques et non sur l’analyse critique des détails techniques de la théorie proposée. La différence est que, cette fois, c’est précisément la récupération du déterminisme et la primauté des images claires des objets dans le continuum de l’espace et du temps qui sont prises pour cibles et critiquées. L’interprétation causale est vue comme un retour en arrière face aux acquis conceptuels de la physique quantique. Mais les arguments de ces critiques épistémologiques ne sont pas les mêmes d’un auteur à un autre.

Prenons le cas de L. Rosenfeld. Résumé, son point de vue était de considérer “la relation de complémentarité comme donnée de l’expérience”⁸ et comme partie intégrante de la théorie

quantique. Une des conséquences de la complémentarité étant la description probabiliste, Rosenfeld jugeait toute tentative de retrouver le déterminisme comme une entreprise métaphysique. Sa critique épistémologique visait plusieurs cibles : d'un côté, les physiciens soviétiques, comme J. Frenkel et D. Blokhintzev qui critiquaient la complémentarité et soutenaient la primauté des descriptions ondulatoires, d'un autre côté, le modèle corpusculaire de Bohm et sa récupération d'un type de déterminisme analogue à celui de la physique classique. Il s'en prenait en même temps à Heisenberg, en affirmant que "frapper d'interdit la complémentarité sous prétexte qu'Heisenberg est un idéaliste, c'est jeter la graine avec la balle. Autant condamner les *Principia* parce que Newton y met sa dialectique à la sauce de la théologie puritaine". Les considérations scientifiques et épistémologiques de Rosenfeld étaient appuyées par des arguments plutôt philosophiques concernant le matérialisme et la dialectique, avec des références à F. Engels. S'il poussa "délibérément la discussion vers le domaine philosophique", c'était parce que, lui semblait-il, "la racine du mal était plutôt là que dans la physique."⁹

W. Heisenberg menait sa critique au nom d'une lutte "contre l'ontologie du matérialisme" – "pour utiliser un terme philosophique plus général", comme il l'indiquait lui-même –, "[c'est-à-dire] contre l'idée d'un monde objectif réel dont les plus minuscules parcelles existent objectivement, dans le même sens où existent les pierres ou les arbres, que nous les observions ou pas."¹⁰ Le physicien japonais T. Takabayasi¹¹ reconnaissait, quant à lui, malgré ses critiques épistémologiques de la théorie de Bohm, l'utilité d'explorer des modèles différents pour développer la physique théorique. Les critiques du physicien soviétique Fock étaient très proches de celles de Rosenfeld. Elles ne furent publiées qu'après 1957, en dehors de l'Union Soviétique, après la disparition de Staline et la fin de la période du *jdánovisme*.¹² Le cas de M. Schönberg, physicien brésilien, également marxiste, est particulier parce que – tout en maintenant des discussions régulières avec David Bohm à l'Université de São Paulo, où Bohm était alors professeur¹³ – il ne publia rien sur le sujet pendant cette période, tout en ayant une position très critique sur les variables cachées déterministes.¹⁴

La controverse sur le terrain scientifique

En ce qui concerne les critiques de nature théorique, on notera tout d'abord qu'aucune ne voyait de conflit entre le modèle de Bohm et les résultats expérimentaux déjà connus. La première, et la plus importante, reconnaissance de la consistance logique de l'interprétation proposée est venue de W. Pauli.¹⁵ Celui-ci a analysé dans le détail la question de l'interprétation proposée par Bohm, y compris sur la première version de l'article de Bohm. Entre cette version et celle publiée finalement en 1952, des modifications ont été portées, qui tiennent compte des critiques de Pauli : par exemple, les références aux anciens travaux de L. de Broglie, ainsi que l'ajout de la deuxième partie de l'article qui concerne le problème de la mesure.¹⁶ Presque toutes les lettres de Bohm à Pauli - sept - ont été retrouvées et sont publiées. Par contre les lettres de Pauli à Bohm, sauf celle que nous venons de citer, ont malheureusement disparu;¹⁷ ce qui nous empêche de reconstituer, dans les détails, l'ensemble de la discussion. Nous pouvons cependant conclure, à partir de l'article publié par Pauli,¹⁸ que s'il a finalement conclu à la consistance logique de la tentative de Bohm dans sa version publiée, il a maintenu certaines de ses critiques théoriques et épistémologiques, dont nous parlerons plus loin.

L'un des arguments de la critique théorique du programme causal les plus significatifs par rapport à son développement est celui qui a trait au caractère non relativiste du modèle de Bohm : il ne pouvait prétendre concurrencer que la mécanique quantique non-relativiste. O. Halpern et T. Takabayasi assuraient que le modèle théorique n'était pas susceptible d'être modifié de façon à ce qu'une généralisation relativiste puisse en découler.¹⁹ Pour Pauli, l'absence de traitement relativiste était une preuve de la faiblesse de l'argument de Bohm : "(...) Je ne peux donc pas considérer comme profond un argument qui plaide pour la réforme de la théorie dans le domaine relativiste mais n'envisage que la partie non relativiste de la théorie, qui, elle, est correcte."²⁰ Par ailleurs, von Neumann, selon une indication de Bohm lui-même, "[pensait] que [s]on travail est correct et même 'élégant' mais il s'attendait à des difficultés lorsqu'on l'étendrait aux spins."²¹ Sensibles à cette critique, Bohm et les partisans de son programme la considèrent comme un défi à relever.

Une deuxième critique qui eut un impact parmi les adhérents du programme causal fut élaborée par Pauli et, indépendamment, par J.B. Keller.²² En bref, selon cet argument, on ne peut pas obtenir l'égalité de la fonction qui décrit la particule dans le modèle de Bohm et de la fonction d'onde de la physique quantique, parce que ces deux fonctions sont inscrites dans des cadres conceptuels très différents. Nous analyserons plus loin la voie adoptée par Bohm pour lever cette difficulté. On retiendra encore une autre critique : l'interprétation proposée par Bohm ne peut être développée que dans la représentation de l'espace et du temps, c'est-à-dire qu'elle n'est pas capable de rendre l'invariance de la théorie quantique dans les transformations unitaires. Cet argument fut soulevé par Pauli, Takabayasi et d'autres, mais c'est Pauli qui lui donna la forme la plus développée. Bohm ne voulut pas en convenir, estimant que si une interprétation alternative doit reproduire les résultats expérimentaux de la théorie usuelle, rien ne l'oblige toutefois à retrouver les mêmes grandeurs mathématiques utilisées pour l'obtention des résultats.²³ Mais cette réponse n'était que partielle, parce qu'elle ne prenait pas en compte la question, soulignée par Pauli et qui relève de la relativité, d'une asymétrie dans la théorie ne trouvant pas de contrepartie dans l'expérience.

Ajoutons, à propos de Pauli, que ses critiques théoriques n'étaient pas indépendantes de considérations d'ordre épistémologique ou philosophique. La critique d'une asymétrie dans la représentation sans contrepartie dans l'expérience est un argument plutôt épistémologique – il renvoie à celui d'Einstein pour la relativité restreinte²⁴ –, mais de tels critères d'ordre épistémologique étaient, pour un physicien comme Pauli, partie intégrante de ce qu'il considérait comme appartenant à des "raisons physiques"; par contre, il renvoyait à la "métaphysique" des arguments qui appartenaient plutôt au domaine de la philosophie.²⁵ Pauli n'exposait pas ses idées proprement philosophiques dans ses articles scientifiques, mais on les trouve dans sa vaste correspondance : elles sont structurées, selon Laurikainen qui en a fait l'analyse, autour de l'idée que "l'esprit et la matière, en tant qu'éléments de base de la réalité, doivent être considérés comme deux éléments complémentaires."²⁶

Dernière remarque sur la défense de la complémentarité contre le programme causal, soutenue par Pauli, Rosenfeld et Heisenberg : leurs conceptions philosophiques sous-jacentes n'étaient pas les mêmes. Dans la controverse entre Rosenfeld et Heisenberg, Pauli était plutôt du côté du second; c'est ainsi qu'il lui écrit : "Malheureusement, Rosenfeld veut monopoliser le thème de la complémentarité (...), j'aimerais au moins veiller à ce que Rosenfeld ne joue pas son rôle explicite de 'racine carrée de Bohr multiplié par Trotski', et qu'il n'orne pas son article de banalités sur le matérialisme."²⁷

Les adhésions au programme causal

L'adhésion la plus importante au programme causal eut lieu en France, autour de Louis de Broglie et Jean-Pierre Vigier. De Broglie, qui avait développé ces mêmes idées avant 1927 – théorie de l'onde pilote –, les avait abandonnées entretemps, en se ralliant aux partisans de la complémentarité. Une collaboration réunit Bohm, Vigier et de Broglie, après que ce dernier se fut reconverti à ses anciennes idées, et s'élargit à Takabayasi et à Terletsii, ainsi qu'à de jeunes physiciens, parmi lesquels F. Fer, G. Lochak, J.A. Andrade e Silva, P. Hillion, M. Thiounn, F. Halbwachs et Ph. Leruste.

Cependant la vulgarisation en France du programme causal s'accompagna d'une lecture excessivement philosophique, voire idéologique, qui l'assimilait au matérialisme dialectique. Malgré les critiques que les philosophes et des physiciens soviétiques firent à la complémentarité pendant cette période, on ne relève pas de leur part d'adhésions significatives au programme causal. C'est seulement plus tard, en 1959, que s'établit une coopération entre des physiciens soviétiques et français autour des recherches par Louis de Broglie d'une approche non-linéaire de la mécanique quantique dans la suite de son ancienne théorie de la double solution.

Remarquons en outre que Bohm, qui était lui-même marxiste dans la décennie des années 50, espérait de la part des physiciens marxistes un soutien plus actif au programme causal. Il se plaignait de l'absence de soutien de la part du physicien marxiste nord-américain Phil Morrison,²⁸ ainsi que de la part des physiciens soviétiques : "Il y a des philosophes à Moscou qui critiquent l'interprétation usuelle, cependant ils n'ont pas d'influence sur les physiciens. (...) Il est décevant qu'une société orientée vers une nouvelle direction ne soit pas encore

capable d'avoir une influence significative sur les manières dont les gens travaillent et pensent", écrivait-il à un correspondant.²⁹ Une autre adhésion, peu connue dans la littérature historique sur le sujet, fut celle de Mario Bunge, le futur philosophe des sciences, alors jeune physicien argentin venant de soutenir son doctorat de physique. Selon Bunge,³⁰ "aussitôt que l'article de Bohm est paru je lui ai écrit. J'ai fait certaines objections (...). Sa réponse a été : vous posez trop de questions pour qu'on puisse y répondre de façon satisfaisante dans une lettre. Pourquoi ne venez-vous pas pour une discussion en tête-à-tête ? (...) Je l'ai acceptée et je suis arrivé à São Paulo en avril 1953." Les questions de Bunge portaient sur le côté le plus délicat du programme causal, à savoir la question d'une généralisation relativiste.

Einstein, Feynman et d'autres

Critique de la complémentarité, Einstein était aussi critique des variables cachées, qui ne lui paraissaient pas aller assez au fond des choses et rester trop classiques. Son attitude théorique et épistémologique vis-à-vis du programme des variables cachées a été analysée ailleurs.³¹ On ne peut bien comprendre sa position qu'en prenant en compte son propre programme de développement de la physique théorique.³² Il ne pensait pas que l'on puisse aller loin si l'on se contentait de reformuler la physique quantique en partant d'elle – ce que faisait Bohm – et espérait de son côté la solution des difficultés de la théorie des quanta en même temps que celles du projet d'unifier la théorie du champ basée sur le continuum spatio-temporel. Une théorie "complète" du champ continu et de la source de champ éclairerait, pensait-il, par des relations de contrainte, les problèmes conceptuels et théoriques de la physique quantique. Malgré sa sympathie pour le non conformisme et la pénétration théorique de D. Bohm, il critiquait sa tentative, tout en l'encourageant à continuer de rechercher une théorie alternative.

En ce qui concerne R. Feynman, son attitude face au programme causal fut tout d'abord d'attention, voire de sympathie.³³ Il séjourna au Brésil, à Rio de Janeiro, pendant la période brésilienne de Bohm à l'Université de São Paulo. Des discussions entre Feynman et Bohm eurent pour témoin le physicien brésilien J. Leite Lopes.³⁴ Bohm était très heureux de ses discussions avec Feynman. Il rapporta à H. Loewy : "Feynman a été convaincu qu'il s'agit là d'une possibilité logique, et que cette interprétation peut mener à des choses nouvelles."³⁵

Bohm discuta de sa théorie et de son interprétation avec d'autres physiciens pendant son séjour brésilien. En juillet 1952, il participa à un colloque scientifique international qui se tint au Brésil et y exposa son idée et quelques-uns de ses développements. Lors du débat qui suivit son exposé, les physiciens qui y participèrent manifestèrent une attitude d'expectative. H.L. Anderson, D.W. Kerst, M. Moshinsky et J. Leite Lopes demandèrent à Bohm comment on pouvait établir une différence entre sa façon de voir et l'interprétation usuelle; il leur répondit qu'il fallait développer davantage son programme théorique, et développer de même les possibilités expérimentales, pour y aboutir. Il rencontra surtout des attitudes sceptiques, comme celle de A. Medina, voire de franche contestation comme celle de I.I. Rabi, qui considérait l'interprétation causale comme incapable de fournir une perspective de développement pour la physique.³⁶

Les développements du programme causal

L'activité de Bohm et de ses collaborateurs au cours des années cinquante s'organisa autour de deux pôles de préoccupations. Le premier était de nature strictement scientifique : il concernait la recherche d'une justification conceptuelle du modèle original, ainsi que la généralisation relativiste de ce dernier et la possibilité de traiter des champs et des particules. Le second correspondait à une tâche plus épistémologique et philosophique : il s'agissait de fonder le choix d'une description causale, autrement dit déterministe, en montrant qu'elle était plus fondamentale qu'une description probabiliste comme celle de la mécanique quantique courante. La portée de l'objection soulevée par Pauli et Keller, rapportée plus haut, ne pouvait être sous-estimée, comme l'a bien reconnu J.P. Vigié dans une déclaration récente : "C'était aussi un des problèmes décisifs que Bohm n'avait pas traité dans ses papiers de 1952."³⁷ Dans un premier travail, Bohm annonça une preuve générale qui devait faire l'objet d'un article à paraître dans les *Anais da Academia Brasileira de Ciências*.³⁸ Contrairement à l'annonce, cet article ne

parut jamais. Et la résolution de la question posée n'aboutirait finalement qu'avec la coopération entreprise avec Vigier.³⁹

L'obtention d'une interprétation causale relativiste était une exigence inscrite dans la logique même du développement du programme initial de Bohm. Sans son obtention, on ne pourrait pas parler d'une équivalence complète entre les deux interprétations, ou programmes, celui de la causalité et celui de la théorie quantique ordinaire. Le programme causal se devait de répondre à ce défi.⁴⁰ Nous ne discuterons pas ici de la possibilité théorique d'obtenir ou non cette formulation relativiste, ni des développements tentés dans cette direction depuis les années quatre-vingts jusqu'à aujourd'hui. Nous nous en tiendrons à constater comme une matière de fait – un fait d'histoire – que, dans la période étudiée de la réception du programme causal, ses partisans n'ont pas réussi à bâtir une théorie causale relativiste. Le résultat le plus élaboré dans cette direction fut l'obtention de l'équation de Pauli – qui, comme on le sait, n'est pas encore relativiste –, succès obtenu par Bohm en collaboration avec deux autres physiciens, le brésilien Jayme Tiomno et le nord-américain Ralph Schiller.⁴¹

Les recherches en vue d'étendre le programme causal de Bohm à la classification du grand nombre de nouvelles particules qui étaient alors en train d'être découvertes constituent l'un des efforts les plus importants des protagonistes de ce courant de la physique. Il reste cependant grandement méconnu, comme il le fut par les physiciens des particules de l'époque, et les historiens de la physique eux-mêmes l'ignorent en général – même s'ils évoquent la tentative causale de Bohm, comme on va le voir. Ces recherches se développèrent à partir du milieu des années cinquante, avec Bohm lui-même, T. Takabayasi, et le groupe de l'Institut Henri Poincaré constitué par L. de Broglie, J.-P. Vigier, P. Hillion et F. Halbwachs, entre autres. L'idée directrice de cette approche, telle que la formulaient Bohm et Vigier, était de traiter une particule subatomique comme une structure étendue dans l'espace-temps de Minkowski, abandonnant de cette façon la représentation de ces particules comme des points dans cet espace – telle qu'elle subsiste dans la théorie quantique ordinaire.⁴² Les développements de cette idée permettaient de rapporter les différents degrés de liberté de la *particule-structure-étendue* à ses nombres quantiques. Le résultat le plus avancé dans cette voie reste sans doute la classification des particules qui reproduisait celle proposée en 1954 par Nishijima et Gell-Mann.⁴³ Il n'est pas besoin d'entrer dans les détails de ces travaux pour constater l'esprit de compétition qui animait les tenants du programme causal vis-à-vis de la voie plus courante.⁴⁴ Au même moment, un autre programme parvenait à une grande puissance explicative et prédictive : M. Gell-Mann et G. Zweig formulaient en 1963 leur modèle des quarks, qui devait être appelé au succès qu'on connaît, prolongé plus tard par d'autres et aboutissant à ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui le modèle standard de la physique des champs et des particules.

L'activité de David Bohm pendant cette période ne se limita pas à ces travaux. Mentionnons les essais poursuivis en vue de fonder, sur le plan épistémologique, la supériorité d'un programme de variables cachées à descriptions déterministes⁴⁵ et, dans une autre direction, la découverte de l'effet Aharonov-Bohm.

Conclusion. L'absence de résultats nouveaux

De l'évocation de cette activité intense nous ne retiendrons pour l'instant que la conclusion suivante : le programme causal n'est pas parvenu à manifester la fécondité attendue ; il aboutit tout au plus à reproduire les résultats de la physique quantique non relativiste déjà connus. Les tenants des variables cachées n'ont pas obtenu de résultats capables de démarquer leur théorie, d'un point de vue empirique, par rapport aux autres développements de la physique théorique depuis la naissance de la théorie quantique, et n'ont pas obtenu de résultats nouveaux dans le sens large indiqué au début de cet article.

Tel est sans doute l'essentiel de la conclusion de notre étude. L'histoire de la connaissance scientifique, et de manière spécifique celle de la physique, nous enseigne sur de nombreux exemples que l'un des traits caractéristiques de son mouvement et de l'entraînement de nouvelles conceptions est, précisément, la prédiction de résultats inédits. Sur ce point, Bohm et ses partenaires n'ont pas réussi. Et l'on est en droit de penser que c'est bien l'absence de prédictions inédites qui a été l'une des raisons les plus fortes, voire la principale, d'une réception si défavorable.

Parmi les indications qui confortent cet argument, on retiendra le témoignage de Mario Bunge, qui poursuivit le programme causal pendant la décennie étudiée : “Toutefois, comme le temps s’est écoulé et que la nouvelle formulation n’a pas abouti à obtenir des prédictions nouvelles, j’ai commencé à avoir des doutes”. Et, poursuit Bunge – qui était, à l’époque déjà, porté vers l’épistémologie, ce qui ne l’empêchait pas, bien au contraire, de raisonner en physicien –, “une théorie qui ne fournit pas de résultats expérimentaux nouveaux ne vaut pas plus que celle qu’elle prétend remplacer. C’est pourquoi j’ai perdu tout mon intérêt pour les variables cachées.”⁴⁶

Des physiciens de grand renom ont examiné l’hypothèse des variables cachées et la théorie de Bohm. La majeure partie d’entre eux l’a refusée, en s’appuyant sur des arguments variés. Elle a bénéficié de l’appui scientifique d’un groupe très actif et, en dehors de ce groupe, de soutiens plutôt épistémologiques. Cependant J.T. Cushing a avancé dernièrement l’idée que l’interprétation causale a été refusée parce que les physiciens ne l’auraient pas étudiée ; suivant son “argument de contingence”, les physiciens du début des années cinquante avaient déjà adhéré à une interprétation,⁴⁷ celle de la complémentarité, ce qui les aurait empêchés d’en entrevoir une autre. Les éléments qui ressortent de la présente étude plaident pour une autre conclusion, pratiquement inverse. Si l’on suivait la logique de l’argument de Cushing, et si on le prenait comme critère décisif pour comprendre la concurrence entre différents programmes scientifiques, on devrait conclure qu’un programme qui a déjà reçu l’adhésion d’une communauté de scientifiques ne peut pas subir de défaite, être abandonné et remplacé par un autre. Mais la leçon de l’histoire de la physique depuis la fin du XIX^{ème} siècle est tout autre : la physique a connu des changements importants, malgré des conceptions bien ancrées. Il est juste, cependant, de reconnaître que Cushing ne considère pas de manière systématique que la contingence historique soit le seul critère de choix entre des théories scientifiques. Comme il l’indique lui-même, elle ne devient importante que dans certaines conjonctures critiques.⁴⁸

D. Peat a exposé à son tour des thèses proches de celles de Cushing, en supposant l’existence, parmi les physiciens de l’époque, d’une “conspiration du silence” à l’égard de la théorie de Bohm. Son analyse est cependant insuffisamment étayée du point de vue documentaire, c’est-à-dire historique,⁴⁹ bien qu’il ait largement consulté la correspondance personnelle de Bohm : il n’a pas pris en compte, par exemple, les articles publiés que nous avons cités. Peat estime que, parmi les physiciens de l’Institute for Advanced Study de Princeton, des considérations d’ordre politique auraient joué, dans le rejet à la théorie de Bohm, un rôle plus important que celles d’ordre scientifique. Rappelons cependant que, en matière de réception de nouvelles théories physiques, si des critères non rationnels peuvent jouer un rôle significatif sur le court terme, par contre sur le long terme ce sont des critères plus objectifs qui tendent à prévaloir.⁵⁰

NOTES

1. D. Bohm, “A Suggested Interpretation Of The Quantum Theory In Terms Of ‘Hidden Variables’”, I & II, *Phys Rev*, 85(2), p. 166-179 & 180-193.
2. D. Bohm, & B.J. Hiley, *The Undivided Universe : An Ontological Interpretation Of Quantum Theory*, London, Routledge, 1993.
3. J.S. Bell, “On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox”, *Physics* 1, 1964, 195-200. Repris dans J.S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum physics*, Cambridge, Camb. Univ. Press, 1987. Cf. M. Paty, “La non-séparabilité locale et l’objet de la théorie physique”, *Fundamenta Scientiae* 7, 1986, p. 47-87; M. Paty, “Sur les variables cachées de la mécanique quantique : Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie”, *La Pensée*, n. 292, 1993, p. 93-116.
4. Pour une analyse plus détaillée de la réception réservée au programme causal, y compris l’analyse des attitudes de Niels Bohr, Ralph Schiller, Aage Bohr, Erwin Schrödinger et Max Born, voir notre étude “La théorie des variables cachées déterministes de David Bohm, alternative à la mécanique quantique, ou le pot de terre contre le pot de fer”, à paraître; ainsi que O. Freire Jr., *David Bohm e a controvérsia dos quanta* [en portugais], *Coleção CLE*, 27, 1999, Campinas, Brésil.
5. E. Schatzman, “Physique quantique et réalité”, *La Pensée*, 42-43, 1952, p. 107-22.
6. H. Freistadt, “The Crisis in Physics”, *Science and Society*, 17, 1953, p. 211-37.
7. L.R. Graham, *Science and Philosophy in the Soviet Union*, New York, Knopf, 1972, p. 74-80. Voir aussi O. Freire Jr., “Quantum Controversy and Marxism”, *Historia Scientiarum*, Vol. 7-2, p. 137-52, 1997.
8. L. Rosenfeld, “L’évidence de la complémentarité”, in A. George, A. éd., *Louis de Broglie - Physicien et Penseur*, Paris, Albin Michel, 1953, p. 43-65.
9. Rosenfeld à Pauli, 20.03.1952, in W. Pauli, *Scientific Correspondence with Bohr, Einstein, a.o.*, Vol IV Part I, Springer, 1996, p. 587. L’acidité de Rosenfeld dans l’argumentation contribua à envenimer l’ambiance de la controverse. Par exemple, il répondit à une lettre de Bohm en lui disant : “j’ai envie de vous répondre que c’est

- justement parmi vos admirateurs parisiens que je perçois quelques signes préoccupants de mentalité primitive” [Rosenfeld à Bohm, 30.05.1952, Archives “Bohm Papers”, Birbeck College, Londres, dorénavant BP]. Nous remercions le Dr. T. Powell, pour son aide dans nos recherches aux Bohm Papers.
10. W. Heisenberg, *Physique et philosophie*, tr. J. Hadamard, Paris, :Albin Michel, 1961, p. 165.
 11. T. Takabayasi, “On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures”, *Prog of Theor Physics*, 8(2), 1952, p. 143-182.
 12. V.A. Fock, “On the Interpretation of Quantum Theory”, *Czechosl. Journ. Phys.*, 7, 1957, p. 643-56.
 13. Voir O. Freire, *David Bohm e a controvérsia dos quanta*, op. cit.; O. Freire Jr., M. Paty, A. da Rocha Barros, “David Bohm, sua estada no Brasil e a teoria quântica”, *Estudos Avançados*, IEA, São Paulo, 20, 1994, p. 53-82.
 14. Voir le témoignage de M. Bunge, “Hidden Variables, Separability, and Realism”, *Rev. Bras. Fís.*, Vol. spéc. “70 anos de Mário Schenberg”, 1984, p. 150-68.
 15. Pauli à Bohm, 03.12.1951, in Pauli, *op. cit.*, p. 436-41.
 16. “La deuxième version est considérablement différente de la première. En particulier, dans la deuxième, je n’ai pas besoin d’utiliser le ‘chaos moléculaire’” (D. Bohm, lettre à W. Pauli, octobre 1951, in Pauli, *op. cit.*, 389-93). Dans un premier temps, Bohm n’était pas persuadé de l’antériorité des travaux de L. de Broglie concernant les variables cachées (*idem*). Mais il l’admit très vite et y fit référence dans l’article publié. (Einstein la lui avait indiquée lorsque Bohm lui montra son manuscrit : cf. A. Einstein et D. Bohm, lettres, Archives Einstein, cité in : M. Paty, “Sur les ‘variables cachées’ de la mécanique quantique” *op. cit.*; voir aussi A. Einstein, M. Born, *Briefwechsel 1916-1955*, München, Nymphenburger Verlag, 1969, trad. fr, *Correspondance 1916-1955*, Paris, Seuil, 1969, p. 206-207, 221).
 17. D. Bohm, lettre à K. von Meyenn (éditeur de la correspondance de Pauli), 2.12.1983, in Pauli, *op. cit.*, p. 345.
 18. Voir W. Pauli, “Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique”, in George, *op. cit.*, p. 33-42.
 19. O. Halpern, “A Proposed Re-Interpretation of Quantum Mechanics”, *Phys.Rev.* 87, 1952, p. 389; Takabayasi, *op.cit.*
 20. W. Pauli, lettre à D. Bohm, 3.12.1951, in Pauli, 96 p. 436.
 21. D. Bohm, lettre à M. Phillips, s/d [Probablement 1952], BP.
 22. Pauli (1953), *op. cit.*; J.B. Keller, “Bohm’s Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden”Variables”, *Phys Rev.* 89(5), 1953, p. 1040-41.
 23. D. Bohm, “Comments on an Article of Takabayasi Concerning the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures”, *Prog. Theor. Phys.* 9, 3, 1953, p. 273-87.
 24. Cf. M. Paty, *Einstein philosophe*, Paris, Presses Univ. de France, 1993.
 25. O. Freire est redevable à O. Darrigol pour des éclaircissements sur ce point.
 26. K.V. Laurikainen, *Beyond the Atom. The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli*, Berlin, Springer-Verlag, 1988, p. xi. Au moment même des discussions plutôt scientifiques qu’il avait avec Bohm, Pauli écrivait : “je ne suis pas surpris que catholiques et communistes en France [il se réfère, probablement à De Broglie, à vrai dire agnostique mais plutôt conservateur, et à Vigier] se soient unis contre la complémentarité (laquelle inclut l’indéterminisme). Les deux sont, voyez-vous, psychologiquement liés à une attente eschatologique, mais il est d’une importance mineure que l’on espère la réalisation de cette attente dans cette vie ou après celle-ci (...). Où en arriverions-nous si nous subordonnions le bouleversement attendu (la fin du monde pour les uns, la fin du capitalisme pour les autres) à un sondage tout probabiliste.” (W. Pauli, lettre à M. Fierz, 6.1.1952, in Pauli, 1996, p. 499-502.
 27. W. Pauli, lettre à W. Heisenberg, 13.5.1954, in W. Pauli, *Correspondance (1953-1954)*, à paraître. Nous remercions le prof. K. von Meyenn pour nous avoir obligeamment communiqué une copie de cette lettre.
 28. D. Bohm, lettre à M. Phillips, s/d, BP.
 29. D. Bohm, lettre à M. Phillips, 18.3.1955, BP.
 30. M. Bunge, communication écrite à O. Freire Jr., 1.11.1996.
 31. M. Paty, “Sur les “variables cachées” de la mécanique quantique”, *op. cit.* M. Paty, *Einstein, les quanta et le réel*, à paraître.
 32. Voir M. Paty, “The Nature of Einstein’s Objections to the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics”, *Found. of Phys.*, 25(1), 1995, p. 183-204.
 33. Voir R.P. Feynman, “The Present Situation in Fundamental Theoretical Physics”, *Anais Acad. Brasil. Ciênc.*, 26(1), 1954.
 34. R. Feynman avait l’intention d’écrire “quelques articles sur l’interprétation quantique de Bohm, pour les publier au Brésil”, voir J. Leite Lopes, “Richard Feynman in Brazil : personal recollections”, *Quipu*, 7(3), (1990), p. 383-397.
 35. D. Bohm, lettre à H. Loewy, [s/d, prob. 1952], BP.
 36. *Proceedings of New Research Techniques in Physics* (Rio de Janeiro & São Paulo, July, 15-29, 1952), Rio de Janeiro, 1954.
 37. J.-P. Vigier, entrevue avec O. Freire Jr., 27.1.1992.
 38. D. Bohm, “Proof that Probability Density Approaches $|\Psi|^2$ in Causal Interpretation of the Quantum Theory”, *Phys. Rev.*, 89 (2), 1953, p. 458-466.
 39. D. Bohm, & J-P. Vigier, “Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations”, *Phys. Rev.*, 96 (1), 1954, p. 208-216.
 40. On trouve des preuves de la valeur que Bohm attribuait à la solution de ce problème dans son rapport adressé au département de physique de l’Université de São Paulo (FFLCH-USP, 1954, microfilm 816/51).
 41. D. Bohm *et al.*, “A Causal Interpretation of the Pauli Equation (A & B)”, *Nuovo Cimento*, Suppl. Vol I(1), p. 48-66 & 67-91.
 42. D. Bohm & J-P. Vigier, “Relativistic Hydrodynamics of Rotating Fluid Masses”, *Phys. Rev.*, 109(6), 1958, p. 1882-91.

43. L. de Broglie *et al.*, "Rotator Model of Elementary Particles Considered as Relativistic Extended Structures in Minkowski Space", *Phys. Rev.*, 129(1), p. 1963,438-50.
44. J.-P. Vigièr, lettre à D. Bohm, 17.5.1962, *BP*.
45. D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics*, London, Routledge, 1957.
46. M. Bunge, Lettre à O. Freire Jr., 12.2.1997.
47. J.T. Cushing, *Quantum Mechanics. Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, Chicago, Univ of Chicago Press, 1994, p. 144.
48. "It is only at certain critical junctures that they may become important" (J. Cushing, Lettre à O. Freire Jr., 17.07.1998). D'autre part, Cushing a pris ses distances par rapport à l'analyse de David Peat évoquée ci-dessous (cf. *Physics Today*, 50, 1997, p. 77-78).
49. F. David Peat, *Infinite Potential. The Life and Times of David Bohm*, Addison-Wesley, 1996, p. 133-5.
50. O. Freire est redevable à une subvention de la CAPES et désire exprimer sa reconnaissance à Mme. C. Kelle pour son aide en français dans une première version du manuscrit.